

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

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

*Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів*

№ 34 (1256) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2017

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 34 (1256). – 80 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 рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.*

**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. С. 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. ДМИТРИСЕНКО, 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. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

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

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

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

**Заст. відповідального редактора:** В. Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** І. С. Варшамова, асистент.

**Члени редколегії:** Є. І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В. І. Мілих, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д.т.н., проф.; В. Ю. Райнін, д-р техн. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів», індексується в наукометричних базах **Index Copernicus, Російський Індекс Научного Цитування – РИИЦ, WorldCat і Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 27.10.2017 р.

УДК 621.3.04: 621.316

Е.И. БАЙДА, А.А. ЧЕПЕЛЮК

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА И НА НАГРЕВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

У статті досліджуються процеси зміни активного опору і нагріву доріжки друкованої плати в функції частоти сигналу внаслідок поверхневого ефекту і ефекту взаємного впливу струмів в провіднику. Розрахований коефіцієнт зміни активного опору доріжки в функції частоти. Запропоновано і випробувано алгоритм теплового розрахунку, що дозволяє значно спростити і прискорити рішення просторової задачі, використовуючи результати розрахунку 2D задачі розподілу струму в плоскому провіднику. Показано, що при заданому значенні зовнішнього струму збільшенні частоти призводить до значного збільшення еквівалентного активного і реактивного опорів провідника, що істотно збільшує його температуру нагрівання. Доведено коректність рішення електротермічної 3D задачі і намічені напрямки подальших досліджень.

**Ключові слова:** друкована плата, поверхневий ефект, електротермічний нагрів.

В статье исследуются процессы изменения активного сопротивления и нагрева дорожки печатной платы в функции частоты сигнала вследствие поверхностного эффекта и эффекта взаимного влияния токов в проводнике. Рассчитан коэффициент изменения активного сопротивления дорожки в функции частоты. Предложен и опробован алгоритм теплового расчета, позволяющий значительно упростить и ускорить решение пространственной задачи, используя результаты расчета 2D задачи распределения тока в плоском проводнике. Показано, что при заданном значении внешнего тока увеличению частоты приводит к значительному увеличению эквивалентного активного и реактивного сопротивлений проводника, что существенно увеличивает его температуру нагрева. Доказана корректность решения электротермической 3D задачи и намечены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** печатная плата, поверхностный эффект, электротермический нагрев.

**Introduction.** The article deals with the distribution of the current density and the heating of the conductors of the printed circuit board, depending on the frequency of the source at a fixed value of the current. In this case, the equivalent conductivity of the material depends not only on the temperature, but also on the frequency of the signal, which considerably complicates the solution of the spatial problem. In the article an algorithm is proposed which, on the basis of the solution of the plane problem, allows one to reduce the solution of the spatial quasistatic problem to the problem of heating conductors by direct current with equivalent conductivity. **Purpose.** The purpose of this article is to develop and test a mathematical model of electro thermal heating of printed circuit boards, depending on the frequency of the source in a flat and spatial form. **Methods.** The solution of the planar and spatial problems was carried out by the finite element method in the COMSOL package. **Results.** Mathematical models of PCB heating are developed and tested depending on the frequency. The value of the equivalent conductivity is obtained depending on the frequency of the signal and the temperature of PCB heating for a planar and spatial problem. The correctness of the solutions obtained is shown. **Conclusions.** An algorithm that allows reducing the problem of heating the conductors of a printed circuit board by a high-frequency alternating current to the problem of heating conductors with a direct current with equivalent conductivity is proposed and tested, which greatly simplifies the solution process. Areas for further research are outlined.

**Key words:** printed circuit board, surface effect, electro thermal heating.

**Введение и постановка задачи.** Печатные платы широко используются в качестве элементов электро- и радиотехнических схем, как на постоянном, так и на переменном токе в диапазоне частот от 0 Гц до сотен кГц. Вполне закономерно, что при таком диапазоне частот их электрические параметры существенно меняются. В статье рассматривается вопрос влияния частоты на температуру нагрева проводников печатных плат за счёт поверхностного эффекта и эффекта близости в диапазоне частот от 10 кГц до 150 кГц, в котором можно пренебречь энергией излучения. Эти вопросы представляют интерес для фирм, специализирующихся на разработке программного обеспечения расчета температуры нагрева печатных плат [1]. В программах, как правило, источник тепла рассчитывается на основании тепловых потерь по действующему значению тока с учетом зависимости проводимости материала от температуры, т.е. расчет при постоянном токе. Недостатком такого подхода является то, что эквивалентная проводимость материала зависит не только от температуры нагрева проводника, но и от частоты и взаимного расположения проводников, что не учитывается. Это связано с тем, что параллельное решение мультифизической задачи связывающей электромагнитные и тепловые процессы в трехмерном пространстве требует значительных объемов оперативной памяти, а сам процесс решения плохо обусловлен.

В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий обойти эту проблему: 1) решение квазистати-

ческой электромагнитной 2D задачи и определение значения активного сопротивления дорожек печатной платы в функции частоты при заданном значении тока; 2) решение 2D электромагнитной квазистатической и термической задач с учетом изменения сопротивления в функции частоты и температуры; 3) решение 3D электротермической задачи на постоянном токе с учетом тепловой и частотной зависимости активного сопротивления.

Такой подход позволяет: 1) сопоставить полученные результаты, что дает возможность убедиться в корректности полученного решения; 2) упростить решение 3D электротермической задачи; 2) не вносить существенных изменений в уже существующие программы, введя в них функциональную зависимость активного сопротивления от частоты, полученные на основе решения 2D задачи.

Одна из проблем решения сформулированных задач заключается в том, что ширина и толщина дорожки печатной платы отличаются на порядок. Так при действующем значении тока 3 А и толщине дорожки в 75 мкм её ширина равна 1,0 мм ( $\approx$  в 13 раз больше), что усложняет использование объемных конечных элементов.

В [2] приведено аналитическое решение задачи распределения плотности тока в прямоугольном проводнике. Но за счет принимаемых допущений, возможности такого решения ограничены. В большинстве случаев поверхностный эффект рассматривается для круг-

лого проводника или для случая падения плоской электромагнитной волны на тонкий проводник [3], что не соответствует реальной физической задаче.

В этой связи представляется актуальным: 1) определить распределение плотности тока в одиночном тонком и широком проводнике; 2) определить влияние частоты на активное сопротивление проводника в квазистатическом режиме; 3) решить 3D задачу нагрева проводника печатной платы с учетом функциональной зависимости удельной проводимости от температуры и частоты; 4) провести сравнительный анализ полученных результатов и сформулировать выводы о корректности предлагаемого алгоритма.

**Цель.** Целью статьи является разработка и тестирование математической модели электротермического нагрева дорожек печатной платы в зависимости от частоты источника в плоской и пространственной постановке.

**1. Распределение плотности тока по сечению прямоугольного проводника.** Размеры проводника показаны на рис.1. Направление тока - перпендикулярно плоскости рисунка.

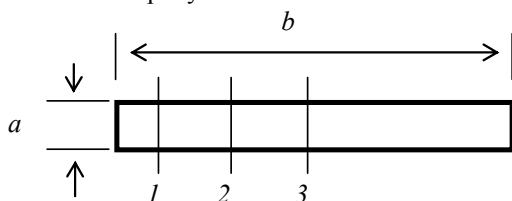


Рис. 1 – Проводник с током, где  $a = 0,075 \text{ мм}$ ,  $b = 1 \text{ мм}$

Уравнение для определения векторного магнитного потенциала в квазистатическом режиме и граничное условие

$$\left( j \cdot \omega \cdot \sigma - \omega^2 \cdot \varepsilon \right) \cdot \vec{A} + \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \nabla \times \vec{A} = 0, \tag{1}$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{H} = \vec{J}_s,$$

где  $\omega$  - круговая частота;

$\sigma$  - проводимость;

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость;

$\vec{A}$  - векторный магнитный потенциал в направлении оси  $z$ ;

$\mu$  - магнитная проницаемость;

$\vec{n}$  - нормаль;

$\vec{H}$  - напряженность поля;

$\vec{J}_s$  - поверхностная плотность тока.

Результаты расчета для частот (10, 50, 100, 150) кГц по ширине и высоте проводника приведены на рис. 2, рис. 3 (при температуре проводника  $40^\circ\text{C}$ ).

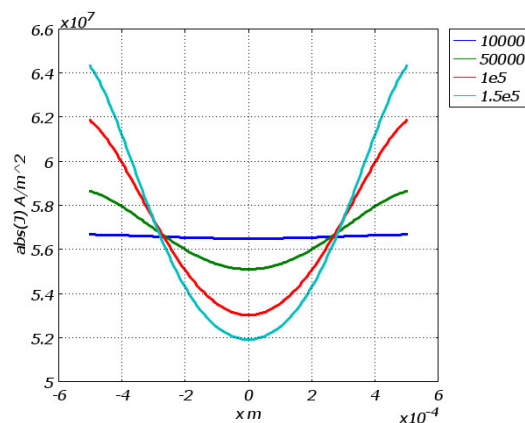


Рис. 2 – Распределение плотности тока по ширине проводника в функции частоты в среднем сечении

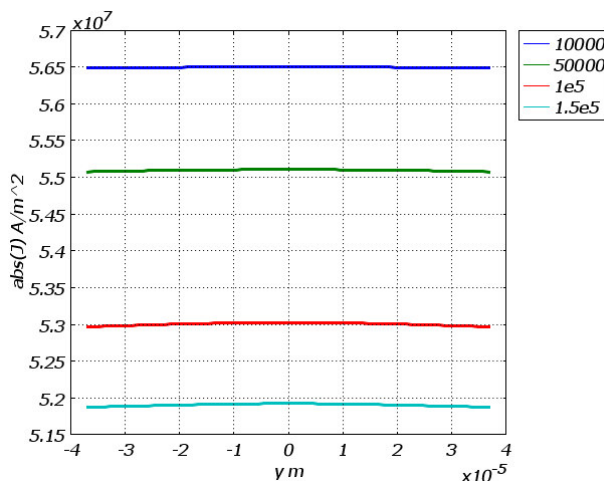


Рис. 3 – Распределение плотности тока по высоте проводника в функции частоты в среднем сечении

Как следует из результатов расчета, плотность тока по высоте проводника - постоянная величина для фиксированной частоты и фиксированного положения секущей плоскости (рис. 4).

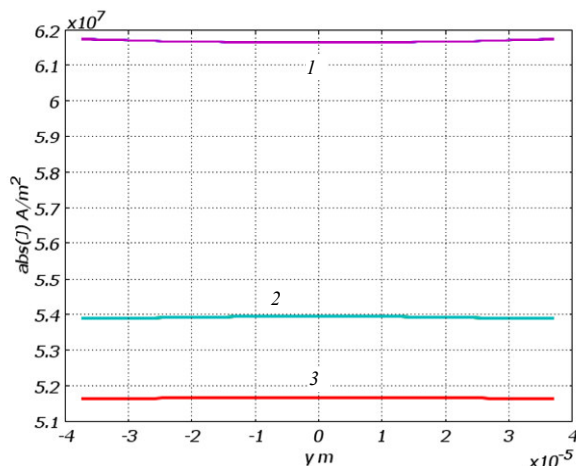


Рис. 4 – Распределение плотности по высоте проводника в сечениях 1-3 (рис. 1)

На рис. 5 показано 3D распределение модуля плотности тока по площади "дорожки" печатной платы.

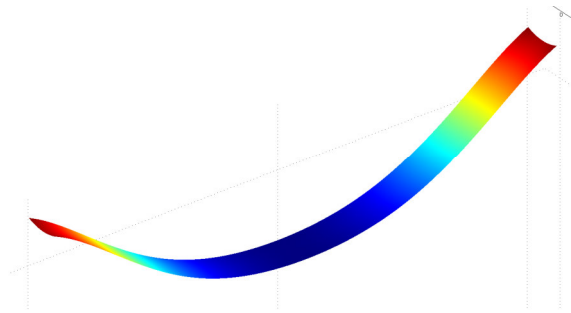


Рис. 5 – Распределение модуля плотности тока по сечению проводника

Из расчетов следует:

- в исследуемом диапазоне частот неравномерность распределения плотности тока наблюдается по ширине проводника;

- по высоте проводника (по оси  $y$ ) плотность тока  $J(x, y)$  постоянна при фиксированном значении координаты  $x$ .

**2. Расчет параметров дорожки печатной платы сложной конфигурации.** "Дорожки" платы имеют достаточно сложную конфигурацию, поэтому представляет интерес распределение плотности тока по сечению в случае, показанном на рис. 6. Так как распределение плотности тока по толщине проводника постоянно, то рассматривается 2D модель.

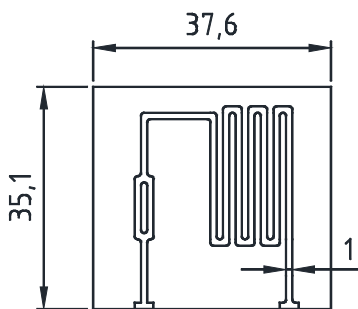


Рис. 6 – Конфигурация проводника и размеры платы в мм

На рис. 6 материал проводника - медь толщиной 75 мкм; основы – стеклотекстолит (FR4) с параметрами: проводимость -  $4 \cdot 10^{-3}$  S/m; относительная диэлектрическая проницаемость – 4,5.

Расчет был проведен в квазистатическом режиме с учетом токов смещения по формулам:

$$-\nabla \cdot d_i \cdot ((j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \cdot \vec{A} + (\sigma + j\omega\varepsilon) \cdot \nabla V - \vec{J}^e) = 0$$

$$d_i \cdot (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon) \cdot \vec{A} + \nabla \times d_i \cdot \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) +$$

$$d_i \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon) \cdot \nabla V = d_i \cdot \vec{J}^e$$

где  $d_i$  – толщина проводника или диэлектрика,

$V$  – электрический потенциал;

$\vec{J}^e$  – сторонняя плотность тока.

Граничные условия: на внешних границах

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0, \vec{n} \cdot \vec{J} = 0, \quad (3)$$

на входных терминалах

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0, \int_S \vec{n} \cdot \vec{J} dS = I_m \text{ и } \vec{n} \times \vec{A} = 0, V = 0, \quad (4)$$

где  $I_m$  – амплитудное значение внешнего тока.

Результат расчета представлен на рис. 7, где показано распределение плотности тока в проводнике при частоте  $1,5 \cdot 10^5$  Гц.

Из рис. 7 следует, что токи сосредоточены на внешних границах. Помимо этого, наблюдается асимметрия тока в самих проводниках, что связано с их взаимным влиянием.

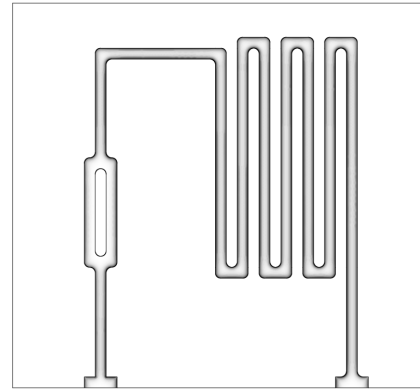


Рис. 7 – Распределение модуля плотности тока

На рис. 8 показано распределение плотности тока по ширине в одном из проводников в функции частоты.

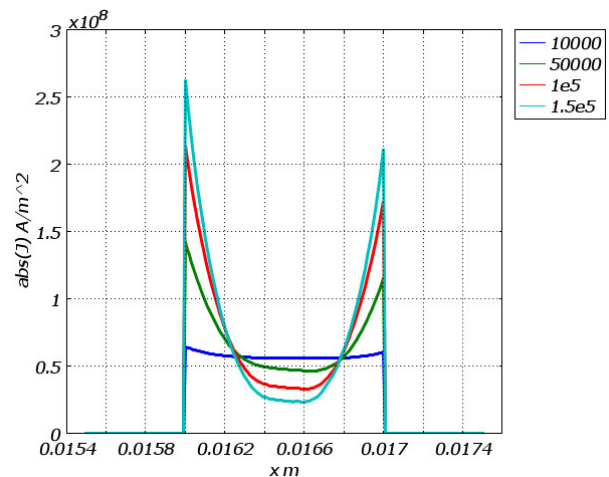


Рис. 8 – Распределение плотности тока по ширине проводника в функции частоты

Как следует из сравнительного анализа рис. 2 и рис. 8, на распределение плотности тока существенно влияет взаимное расположение проводников, увеличивая неравномерность распределения тока по сечению.

Неравномерность распределения тока приводит к изменению активного сопротивления проводника, которое показано на рис. 9 в относительных единицах. За единицу принималось активное сопротивление при частоте 10 кГц и температуре проводника 40 °С.

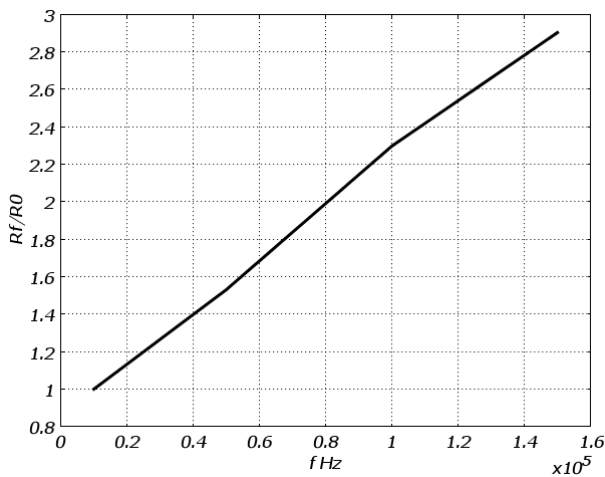


Рис. 9 – Зависимость относительного увеличения активного сопротивления проводника в функции частоты

Как следует из рис. 9, активное сопротивление увеличивается практически пропорционально частоте (в исследуемом диапазоне) и возрастает примерно в 3 раза при увеличении частоты с 10 кГц до 150 кГц (при фиксированном амплитудном значении тока в проводнике).

Аппроксимация зависимости рис. 9, проведенная на основании метода наименьших квадратов, дает следующую зависимость с максимальной погрешностью 2,2 %

$$k = 0,87 + 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot f, \quad (5)$$

где  $k$  – кратность увеличения активного сопротивления;

$f$  – частота в Гц.

Расчеты показывают, что тепловые потери для данной конфигурации проводника возрастают в большей степени, чем в случае уединенного проводника (после приведения к единой длине), что свидетельствует о значительном взаимном влиянии отдельных участков проводника.

Помимо активных потерь значительно увеличивается и реактивное сопротивление (примерно в 12 раз). Увеличивается и падение напряжения в проводнике при фиксированном значении тока в 9,7 раза с  $(0,224728 + i \cdot 0,26641)$  В при 10 кГц до  $(0,651916 + i \cdot 3,342732)$  В при 150 кГц.

Следует отметить, что в исследуемом диапазоне частот тепловые потери в диэлектрике малы ( $\approx 10^{-5}$  Вт) по сравнению с потерями в проводнике и их можно не учитывать.

**3. 2D расчет нагрева печатной платы в установившемся тепловом режиме.** Основным параметром, влияющим на долговечность работы любого электротехнического устройства, является температура его нагрева. В данном разделе исследуется установившееся значение температуры нагрева печатной платы в функции частоты сигнала.

В силу малой толщины проводника и основы (75 мкм и 500 мкм), можно предположить, что перепад температуры по их толщине незначителен. Это позволяет рассмотреть решение указанной задачи в 2D пространстве.

*Постановка задачи.* Рассчитать установившуюся температуру нагрева печатной платы в функции частоты

при естественных условиях охлаждения в воздушной среде при заданном амплитудном значении переменного тока.

*Расчетные уравнения.* Система дифференциальных уравнений включает уравнения электромагнитного поля и граничные условия (2) – (4) с учетом температурной зависимости проводимости  $\sigma(T)$  и уравнения теплопроводности, применительно к 2D пространству:

$$\nabla \cdot (-d_i \lambda_i \nabla T) = d_i Q_i + h_t (T_0 - T) + h_b (T_0 - T) + \varepsilon_t K (T_0^4 - T^4) + \varepsilon_b K (T_0^4 - T^4), \quad (6)$$

где  $d_i$  – толщина проводника или диэлектрика;

$\lambda_i$  – теплопроводность проводника или диэлектрика;

$T$  – температура;

$Q_i(T, f)$  – объемная мощность внутренних источников тепла как функция температуры и частоты;

$h$  – конвективный коэффициент теплоотдачи с верхней или нижней охлаждаемой поверхности;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$\varepsilon$  – коэффициент черноты верхней или нижней поверхности;

$K$  – постоянная Больцмана.

В качестве граничных условий на торцах платы приняты условия термоизоляции ввиду незначительной (0,5 мм) толщины объекта:

$$-\vec{n} \cdot (d_i \lambda_i \nabla T) = 0, \quad (7)$$

где  $\vec{n}$  – вектор нормали.

Расположение проводника на диэлектрической подложке, которая существенно снижает отводимый тепловой поток, учитывается заданием нулевых значений коэффициента теплоотдачи и степени черноты на нижней поверхности проводника.

Задача (2) – (7) нелинейная, что связано с температурной и частотной зависимостью коэффициентов системы дифференциальных уравнений.

Решение системы (2) – (7) было получено методом PARDISO, базирующимся на разложении Холецкого с последующим итерационным уточнением решения. Вид температурной поверхности при частоте 150 кГц показан на рис. 10.

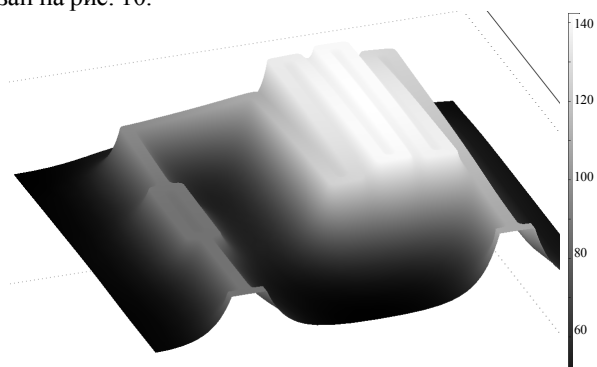


Рис. 10 – Поверхность установившейся температуры платы при максимальной частоте 150 кГц

Максимальное значение температуры нагрева дорожки равно 144 °С.

Изменение температуры одной из наиболее нагретых точек в функции частоты показано на рис. 11.

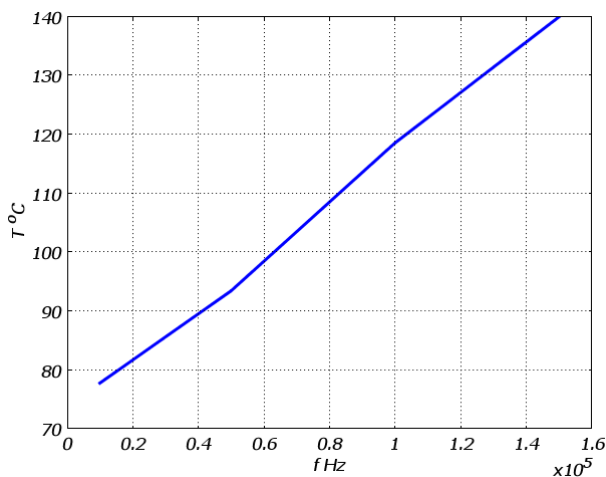


Рис. 11 – Изменение температуры наиболее нагретой точки платы в функции частоты

Из графика следует, что в принятом диапазоне частот температура практически пропорциональна частоте цепи и увеличивается с её ростом при фиксированном амплитудном значении тока, что является следствием поверхностного эффекта и эффекта взаимного влияния отдельных частей дорожки.

**4. 3D расчет нагрева печатной платы в установившемся режиме протекания постоянного тока с учетом функциональной зависимости удельного электрического сопротивления от частоты и температуры.** На рис. 12 показана объёмная расчетная модель.

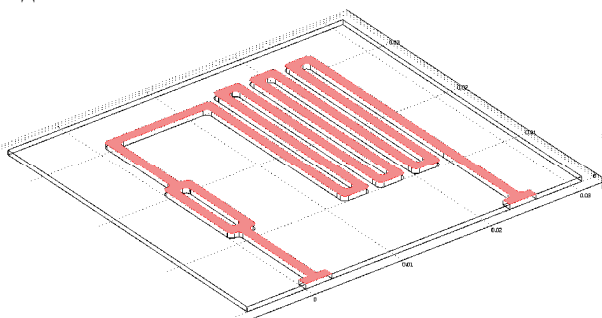


Рис.12 – Расчетная 3D модель печатной платы

Размеры расчетной области (35,1\*37,6\*0,5) мм<sup>3</sup>, размеры дорожки (1\*0,075) мм<sup>2</sup>. По определению, необходимо решить мультифизическую задачу нагрева печатной платы постоянным током, протекающим по проводнику с учетом температурной и частотной зависимости удельной электрической проводимости. Одной из проблем, возникающей при решении задачи - существенное различие в размерах расчетных областей (37 и 0,075) мм, что затрудняет использование 3D конечных элементов. Поэтому, для решения задачи можно воспользоваться следующим приёмом: решать тепловую задачу для 3D тела, а электрическую задачу для плоского 2D тела (уравнение аналогично уравнению теплопроводности (6)).

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\sigma d \nabla V - d \vec{J}^e) &= d Q_j, \\ \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) &= Q \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\sigma$  - проводимость материала проводника, зависящая от температуры и частоты (5);

$d$  - толщина проводящего слоя;

$V$  - электрический потенциал;  
 $\vec{J}^e$  - сторонняя плотность тока;  
 $Q_j$  - объемная плотность тока;  
 $\lambda$  - теплопроводность;  
 $Q$  - мощность внутренних источников тепла, зависящая от температуры и частоты.

Граничные условия для токовой задачи:

$$\vec{n} \cdot \vec{J} = 0 \quad \text{на внешних границах,}$$

$$-\vec{n} \cdot \vec{J} = J_n \quad \text{на входном терминале,} \quad (9)$$

$$V=0 \quad \text{на выходном терминале.}$$

Граничные условия для тепловой задачи (10):

$$-n \cdot (-\lambda \nabla T) = Q \cdot d + h(T_0 - T) + \varepsilon K(T_0^4 - T^4)$$

$$-\nabla \cdot (d \cdot \lambda \nabla T)$$

- для тонкого проводящего слоя,

$$-n \cdot (-\lambda \nabla T) = h(T_0 - T) + \varepsilon K(T_0^4 - T^4) \quad (10)$$

- для верхней и нижней поверхностей,

$$n \cdot (-\lambda \nabla T) = 0 \quad \text{- для торцов платы,}$$

где  $Q \cdot d$  - поверхностный тепловой поток в тонком проводящем слое;

$d$  - толщина проводящего слоя;

$\lambda$  - теплопроводность проводящего слоя.

Результат расчета для значения частоты 150 кГц показан на рис. 13.

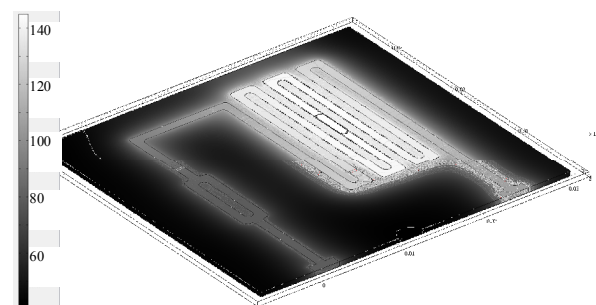


Рис. 13 – Тепловое поле 3D объекта

Сравнительный анализ (рис. 10 - рис. 13) показывает совпадение результатов расчетов (максимальная температура 144 °C). Следовательно, предложенный алгоритм теплового расчета 3D задачи на постоянном токе эквивалентен 2D задаче на переменном токе, что может служить подтверждением правильности предположений и полученных результатов. Эквивалентность результатов позволяет существенно упростить задачу расчета нагрева печатной платы, заменив протекание по проводникам переменного тока постоянным. Так при частоте 150 кГц эквивалентная глубина проникновения поля в проводник составляет  $\approx 0,15$  мм (при ширине проводника 1 мм), что требует чрезмерной дискретизации расчетной области (линейный размер  $\approx 0,03$  мм). Для 3D пространства это требует больших затрат времени счета и памяти ЭВМ (десятки гигабайт), что, в сочетании с очень плохой сходимостью решения, приводит к сложностям в получении результата. Эквивалентная трехмерная тепловая задача нагрева платы на постоянном токе требует значительно меньшей дискретизации расчетного пространства ввиду отсутствия быстроменяющихся функций, поэтому решение такой задачи может быть получено относительно легко, что и сделано в данной статье.

**Выводы.** Предложен и опробован алгоритм, позволяющий свести задачу нагрева проводников печатной платы высокочастотным переменным током к задаче нагрева проводников постоянным током с эквивалентной проводимостью, что существенно упрощает процесс решения.

1. Плотность тока по высоте проводника постоянная величина для рассматриваемой частоты и фиксированного сечения (рис. 4), что дает возможность трактовать задачу распределения тока в тонком проводнике в 2D постановке.

2. Установлено взаимное влияние проводников печатной платы, что выражается в более неравномерном распределении тока по сечению по сравнению с одиночным проводником.

3. В исследуемом диапазоне частот зависимость сопротивления от частоты хорошо аппроксимируется линейной зависимостью, что позволяет использовать этот факт в последующих тепловых расчетах.

4. При 15-ти кратном увеличении частоты, полное сопротивление увеличивается в 9,7 раза, что существенно влияет на падение напряжения в цепи.

5. В принятом диапазоне частот температура практически пропорциональна частоте и увеличивается (при фиксированном амплитудном значении тока) с 78 °С до 144 °С, что является следствием поверхностного эффекта и эффекта взаимного влияния отдельных проводников.

6. Показана эквивалентность тепловой задачи в 2D пространстве при протекании по проводникам

переменного тока и тепловой задачи в 3D пространстве при протекании постоянного тока с учетом изменения сопротивления в функции частоты.

7. Расчет по предлагаемому алгоритму позволяет значительно уменьшить требуемый объем памяти ЭВМ и затрачиваемое время, внося минимальные изменения в уже имеющиеся.

**Предполагаемые направления дальнейших исследований.** На основании предложенного алгоритма предполагается исследование нагрева многослойных печатных плат, а также расчет механических напряжений в дорожках, связанных с градиентом температур.

#### Список литературы

1. <http://www.adam-research.de>.
2. [https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d4721614/2009%20ICE%20\(Gerling\).pdf](https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d4721614/2009%20ICE%20(Gerling).pdf) Приближенный аналитический расчет скин-эффекта в прямоугольном проводе.
3. Демирхан К. С. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирхан, Л.Р.Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин - Питер, 1996. Т. 1-3. – 1377 с.

#### References (transliterated)

1. <http://www.adam-research.de>.
2. [https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d4721614/2009%20ICE%20\(Gerling\).pdf](https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d4721614/2009%20ICE%20(Gerling).pdf). Approximate Analytical Calculation of the Skin Effect in Rectangular Wires
3. Demirhan K. S. Teoreticheskie osnovi elektrotexniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. K.S. Demirhan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Hehurin - Piter, 1996. V. 1-3. – 1377 p.

Поступила (received) 30.06.2017

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

**Вплив частоти на розподіл щільності струму і на нагрів друкованих плат / Є.І. Байда, О.О. Чепелюк** // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 3–8. – Библиогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

**Влияние частоты на распределение плотности тока и на нагрев печатных плат / Е.И. Байда, А.А. Чепелюк** // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 3–8. – Библиогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

**Effect of frequency on distribution of current density and on heating of printed boards / E.I. Baida, A.A. Chepelyuk** // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 34 (1256). – P. 3-8. Bibliography: 3. – ISSN 2079-3944.

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

**Байда Евгений Иванович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Байда Євген Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Baida Evgeniy Ivanovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: [baida\\_kpi@i.ua](mailto:baida_kpi@i.ua).

**Чепелюк Александр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических аппаратов; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).

**Чепелюк Олександр Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; тел.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).

**Chepelyuk Aleksandr Oleksandrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Electrical Apparatus; tel.: (057) 707-68-64; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua).



УДК 621.316.9

В.Г. ДАНЬКО, Є.В. ГОНЧАРОВ, І.В. ПОЛЯКОВ

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКРАНОВАНОГО ІНДУКТИВНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ З ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЮ НАДПРОВІДНІСТЮ

Розглянуто принцип роботи та конструкцію екранованого високотемпературного надпровідного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу. Проведено порівняльний аналіз конструктивних особливостей обмежувачів струму з високотемпературними надпровідними екранами, мідною або надпровідною обмоткою.

**Ключові слова:** обмежувач струму, коротке замикання, високотемпературний надпровідник, індуктивність, магнітне поле, магнітопровід.

Рассмотрен принцип работы и конструкция экранированного високотемпературного сверхпроводящего ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа. Проведен сравнительный анализ конструктивных особенностей ограничителей тока с високотемпературными сверхпроводящими экранами, медной или сверхпроводящей обмоткой.

**Ключевые слова:** ограничитель тока, короткое замыкание, високотемпературный сверхпроводник, индуктивность, магнитное поле, магнитопровод.

The principle of operation and design of a shielded high-temperature superconducting short-circuit current limiter of inductive type are considered. Comparative analysis of the design features of current limiters with high-temperature superconducting screens, copper or superconducting winding is carried out.

**Key words:** current limiter, short-circuit, high temperature superconductor, inductance, magnetic field, ferromagnetic core.

**Вступ.** Надпровідний обмежувач струму короткого замикання (ОСКЗ) є аналогом традиційних струмообмежувальних реакторів. Перші розробки обмежувачів струму використовували фазовий перехід при втраті надпровідності для обмеження струму короткого замикання [1].

Розробка обмежувачів струму на рівні низькотемпературних надпровідників (4 К) була ускладнена через енергетичні витрати на охолодження. З появою високотемпературних надпровідних матеріалів у 1986 р., які охолоджуються рідким азотом (77 К), розпочалися розробки надпровідного обмежувача струму [2].

Таким чином, були розроблені резистивна та індуктивна конструкції високотемпературного надпровідного обмежувача струму, на яких у подальшому було засновано більшість інших [3].

**Мета та задача дослідження.** Метою статті є проведення порівняльного аналізу конструктивних особливостей індуктивного обмежувача струму короткого замикання з надпровідним екраном.

Задача роботи – аналіз впливу конструктивних особливостей на ефективність роботи обмежувача струму.

### Аналіз базових прототипів конструкцій ОСКЗ.

Резистивна конструкція обмежувача струму (рис. 1) заснована на нелінійності опору надпровідника.

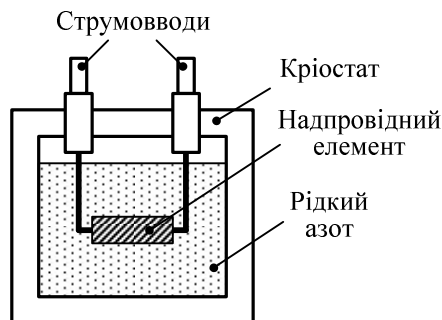


Рис. 1 – Схематична конструкція резистивного обмежувача струму

При короткому замиканні струм збільшується і досягає критичного значення для надпровідного елемента, який втрачає надпровідність та його опір багаторазово збільшується. Однак основним недоліком резистивного надпровідного обмежувача струму є тепловиділення і перегрів в режимі короткого замикання.

Компанія *ABB* (Швейцарія) розробила і протестувала конструкцію екранованого індуктивного трифазного надпровідного обмежувача струму фірми *ABB* потужністю 1,2 МВ·А (10,5 кВ, 70 А), який був встановлений у Женевській енергосистемі на електростанції в *Lontsch* (рис. 2) і експлуатувався протягом року [4].



Рис. 2 – Індуктивний обмежувач струму (підстанція *Kraftwerk am Lontsch*)

**Індуктивний надпровідний обмежувач струму з мідною обмоткою.** В індуктивних екранованих обмежувачах струму використовуються діамантні властивості надпровідного екрана 1, що перешкоджає проникненню магнітного поля в осердя 2.

Надпровідний екран 1 індуктивного обмежувача струму, що екранує магнітне поле обмотки 3, знаходиться у криостаті 4, який заповнено рідким азотом, та виготовляється з високотемпературних надпровідників (ВТНП), найчастіше у вигляді набору кілець або циліндрів (рис. 3).

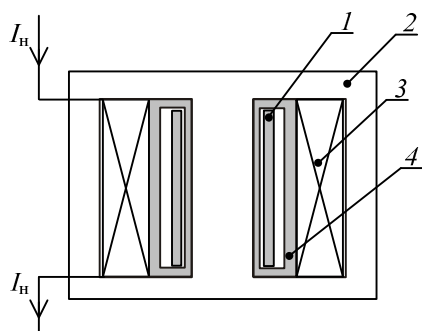


Рис. 3 – Схематична конструкція індуктивного обмежувача струму з мідною обмоткою

При номінальному режимі роботи високотемпературний надпровідний екран 1 екранує феромагнітне осердя 2 від магнітного поля (рис. 4 а), що створює первинна обмотка 3, таким чином, забезпечується дуже низький опір проходженню струму навантаження  $I_n$ . Спад напруги на обмежувачі при номінальному режимі суттєво не зменшує напругу на навантаженні (до 1–3 %) [5].

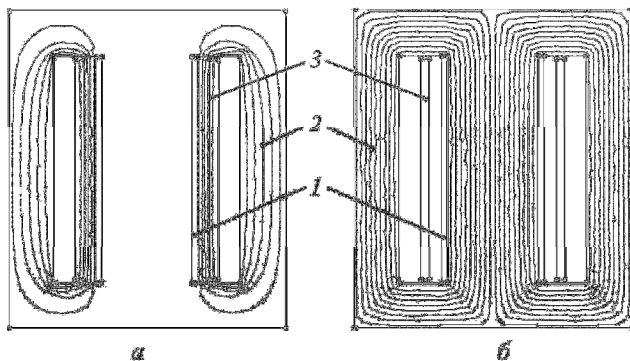


Рис. 4 – Розподіл магнітного поля у ОСКЗ:  
а – номінальний режим; б – коротке замикання;  
1 – екран; 2 – осердя; 3 – обмотка.

При виникненні короткого замикання струм в обмотці 3 збільшується та досягає значення, при якому напруженість магнітного поля для екрана 1 досягає критичного значення  $H_{кр}$ , та втрачаються надпровідні властивості екрана 1 (вторинної обмотки), магнітний потік проникає в осердя магнітопроводу 2 (рис. 4 б), що на два порядки збільшує індуктивність обмотки 3. Багаторазове збільшення індуктивності призводить до зростання індуктивного опору, що дозволяє обмежити струм короткого замикання. Обмежувач струму з мідною обмоткою має малу постійну часу і перехідний процес швидко закінчується [6]. Але наявність мідної обмотки характеризується небажаними втратами потужності у номінальному режимі.

**Індуктивний надпровідний обмежувач струму з надпровідною обмоткою.** У обмежувачі струму з надпровідною обмоткою при збереженні надпровідного стану обмотки індуктивність переважає активний опір  $X_{L_{обм}} \gg R_{обм}$  і перехідний процес сповільнюється. В результаті можливе як зростання струму, так і його зменшення відносно того значення, при якому була втрачена надпровідність екрана. При цьому конструкція обмежувача струму з надпровідною обмоткою аналогічна конструкції з мідною, але екран 1

разом з обмоткою 3, яка з'єднана з електромережею струмоводами 5, розміщені всередині кріостата 4 на середньому стержні осердя 2, що забезпечує зменшення втрат потужності у номінальному режимі (рис. 5) [7].

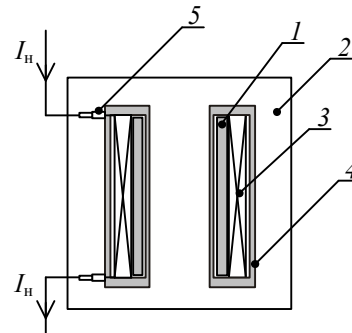


Рис. 5 – Схематична конструкція індуктивного обмежувача струму з надпровідною обмоткою

Можливі варіанти спрацьовування обмежувача струму з надпровідною обмоткою [8]:

1) при досягненні критичної напруженості магнітного поля  $H_{кр}$  на поверхні високотемпературного надпровідного екрана (втрата діаманітних властивостей екраном) суттєво збільшується індуктивний опір і починається перехідний процес при початкових умовах ( $t = 0$ )  $i = i_{кр} (H_{кр})$  зі сталою часу  $\tau = \frac{L_{обм}}{R_{обм}}$ .

Якщо високотемпературна надпровідна обмотка зберігає надпровідність ( $R_{обм} \rightarrow 0$ ), то усталений струм визначається повним опором обмежувача струму

$$I_y = \frac{U_n}{Z_{ос}}$$

а повний опір практично дорівнює реактивному ( $Z_{ос} \approx X$ ), відповідно, стала часу  $\tau \rightarrow \infty$ , тобто перехідний процес триває від  $I_{кр}$  до  $I_y$  дуже повільно;

2) надпровідний екран залишається надпровідним, а струм досягає значення  $I_{кр}$  для надпровідної обмотки ( $R_{обм} \gg 0$ ), тоді усталений струм  $I_y = \frac{U_n}{R_{обм}}$ , а реактивний опір практично відсутній ( $X_L \rightarrow 0$ ), відповідно стала часу  $\tau = \frac{L}{R_{обм}} \rightarrow 0$ , тобто перехідний процес швидко завершується. Це найбільш динамічний процес, з великими інерційними складовими;

3) значення критичного струму  $I_{кр}$  близьке і для надпровідного екрана, і для надпровідної обмотки, тому надпровідність і діаманетизм обмотки втрачаються одночасно. Це дає найменший усталений струм

$$I_y = \frac{U_n}{\sqrt{R^2 + X^2}} (R \gg 0) \text{ і стала часу } \tau \rightarrow 0, \text{ але перехідний процес триває більш повільно, ніж для другого випадку.}$$

Перехідний процес ускладнюється тим, що при збільшенні струму короткого замикання до критичного значення  $I_{кр}$ , що відповідає критичній напруженості магнітного поля  $H_{кр}(I_{кр})$  на поверхні ВТНП екрана, втрачаються надпровідні якості ВТНП екрана, а також втрачається надпровідність обмотки. І перше, і друге змінює як індуктивність обмежувача струму, так й

резистивний опір його обмотки, а це, в свою чергу, призводить до зміни повного опору і сталої часу обмежувача струму.

Таким чином, перехідний процес у електричному колі з індуктивним надпровідним обмежувачем струму з надпровідною обмоткою при виникненні короткого замикання може відбуватися у декілька етапів:

1) від початкового значення струму:  $i_{н0} = I_{нм} \sin(\psi_u - \varphi_n)$ , де  $I_{нм} = U_{нм} / Z_n$ ,  $\psi_u$  – початкова фаза короткого замикання,  $\varphi_n$  – кут навантаження, до втрати надпровідних властивостей екрана (або до втрати надпровідності обмотки);

2) від втрати надпровідних властивостей екрана до втрати надпровідності обмотки (або навпаки від втрати надпровідності обмотки до втрати надпровідних властивостей екрана);

3) від втрати надпровідності екраном і обмоткою до усталеного значення струму в електричній мережі.

Тривалість часу перехідного процесу у більшій мірі залежить від початкової фази короткого замикання  $\psi_u$ . На першому та другому етапі перехідного процесу тривалість часу зменшується в залежності від початкової фази короткого замикання, найменший час при  $\psi_u = \pi/2$ . Тривалість третього етапу перехідного процесу залежить від опору обмотки  $R_{обм}$  при втраті надпровідності [9].

Таким чином, реалізація того чи іншого варіанта спрацювання визначається характеристиками ВТНП матеріалів для екрана і обмотки відповідно їх критичних параметрів.

**Індуктивний надпровідний обмежувач струму з додатковим екраном.** Конструкція обмежувача струму короткого замикання з надпровідним подвійним екраном і надпровідною обмоткою (рис. 6), на відміну від попередньої, забезпечує зменшення магнітних полів розсіяння у номінальному режимі [10].

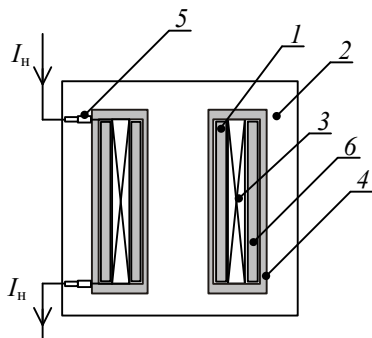


Рис. 6 – Схематична конструкція індуктивного обмежувача струму з додатковим екраном

У конструктивній схемі струмообмежувача короткого замикання основний надпровідний екран 1, надпровідна обмотка 3, яка з'єднана з мережею струмовводів 5, і додатковий надпровідний екран 6, розташований ззовні обмотки 3, аксіально розміщені у кристалі 4 на середньому стержні круглого перерізу магнітопроводу 2 [11].

При номінальному режимі надпровідна обмотка 3 послідовно з'єднана з навантаженням і крізь неї проходить струм навантаження  $I_n$ . Надпровідний екран 1 екранує середній стержень магнітопроводу від

магнітного поля, яке створює обмотка 3. Магнітні поля розсіяння ззовні обмотки 3 екрануються додатковим надпровідним екраном 6, що зменшує потужність втрат у осерді при номінальному режимі (до 0,5 % від загальних втрат), хоча при цьому декілька збільшиться маса (до 1 %).

Можливі варіанти спрацювання обмежувача струму з додатковим екраном при виникненні короткого замикання [5]:

1) струм в обмотці зростає до втрати надпровідності додатковим надпровідним екраном, при якому напруженість магнітного поля досягає критичного значення  $H_{кр}$  і магнітний потік проходить ззовні поверхні основного надпровідного екрана та проникає у крайні стержні магнітопроводу;

2) надпровідність втрачається основним екраном, тоді магнітний потік розсіяння розпоршується у вікні магнітопроводу, але проникає тільки у середній стержень осердя магнітопроводу.

Коли аварійний струм зростає до критичного значення, обмотка 3 втрачає надпровідність і набуває активний опір, що прискорює завершення перехідного процесу.

**Індуктивний надпровідний обмежувач струму з повним кріогенним охолодженням.** Конструктивна схема обмежувача струму з повним кріогенним охолодженням відрізняється від попередніх тим, що надпровідний екран 1, осердя 2 разом з надпровідною обмоткою 3, яка з'єднана з мережею струмовводів 5, потрапляють в зону кріогенного охолодження – криостат 4 (рис. 7) [12].

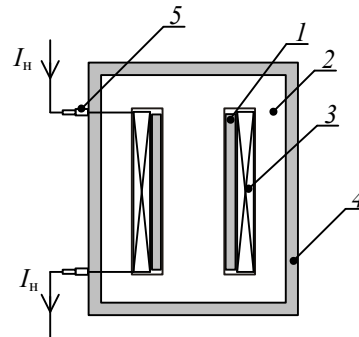


Рис. 7 – Схематична конструкція індуктивного обмежувача струму з повним кріогенним охолодженням

Винесення криостата із зони дії магнітних полів дозволяє виготовляти його з високоміцних металевих матеріалів. Крім цього, надпровідний екран 1, який максимально наближено до осердя, знаходиться безпосередньо на середньому стержні осердя, а не відділений від нього стінкою криостата, як у вище поданих конструкціях, що покращує екранування осердя [13].

Втрати на охолодження індуктивного надпровідного обмежувача струму з повним кріогенним охолодженням пов'язані як із зовнішніми припливами тепла:

- по струмовводах;
- крізь стінки криостата;
- так і внутрішніми:
- гістерезисні втрати;
- втрати потужності у осерді.

Потужність тепловиділень має такі складові:

$$P_{\text{тепл}} = P_{\text{ос}} + P_{\text{зовн}} + P_{\text{гіст}} + P_{\text{св}},$$

де  $P_{\text{ос}}$  – магнітні втрати в осерді магнітопровода;  
 $P_{\text{зовн}}$  – зовнішні припливи тепла крізь стінки кріостата;  
 $P_{\text{гіст}}$  – гістерезисні втрати;  
 $P_{\text{св}}$  – приплив тепла по струмоводах.

Для того, щоб вивести тепло з кріостата і підтримувати в ньому температуру рідкого азоту (до 77 К), необхідно витратити на охолодження потужність на порядок більшу (12 Вт) потужності тепловиділень [14].

При нормальній роботі магнітна індукція в осерді 2 буде дуже мала, а втрати в магнітопроводі пропорційні квадрату індукції, при цьому істотних тепловиділень можна не очікувати [15].

За порівняльним аналізом обмежувачів струму короткого замикання традиційного, резистивного та розглянутих індуктивних типів у залежності від конструктивного виконання подано діаграму втрат потужності у процентах (рис. 8) [4, 8, 16].

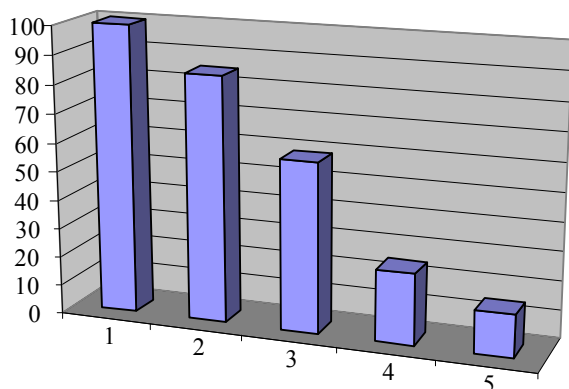


Рис. 8 – Втрати потужності ОСКЗ:

1 – традиційний реактор; 2 – резистивний ОСКЗ;  
 3 – індуктивний ОСКЗ з мідною обмоткою; 4 – індуктивний ОСКЗ з надпровідною обмоткою; 5 – індуктивний ОСКЗ з повним кріогенним охолодженням

**Висновки.** Поперечні розміри середнього стержня у всіх варіантах екранованої індуктивної конструкції обмежувача струму однакові, але відсутність кріостата на середньому стержні осердя обмежувача струму з повним кріогенним охолодженням призводить до зменшення розмірів і маси осердя магнітопровода, а також втрат потужності при одній і тій же висоті надпровідного екрана.

#### Список літератури

1. Leung E. M. Superconducting fault current limiters / E.M. Leung // IEEE Power Engineering Review. – 2000. – Vol. 20, № 8. – P. 1955–1960.
2. Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications / W. Paul, M. Chen, M. Lakner, et al. // Physica C. – 2001. – Vol. 354, № 1/4. – P. 27–33.
3. Данько В.Г. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія / Данько В.Г., Полянська І.С., Гончаров Є.В.; за ред. В. Г. Данько. – Х.: НТМТ, 2011. – 248 с.
4. Test of 1.2 MVA high- $T_c$  superconducting fault current limiter / W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, et al. // Superconductor Science and Technology. – 1997. – Vol. 10, № 12. – P. 914–918.
5. Данько В.Г. Аналіз особливостей роботи надпровідного індуктивного обмежувача струму з додатковим надпровідним екраном / В.Г. Данько, Є.В. Гончаров, І.В. Поляков // Електротехні-

- ка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2017. – № 4. – С. 16–20.
6. Данько В.Г. Аналіз роботи високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання / В.Г. Данько, Є.В. Гончаров // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2007. – № 6/5 (30). – С. 45–48.
7. Пат. 74741 Україна, МПК H02H 9/00. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання з екраном / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту НТУ “ХПІ”. – № у 201204751; заявл. 17.04.12; опубл. 12.11.12, Бюл. № 21. – 4 с.: 3 іл.
8. Гончаров Є.В. Підвищення експлуатаційних показників надпровідникового обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Гончаров Євген Вікторович; НТУ “ХПІ”. – Харків, 2016. – 20 с.
9. Данько В.Г. Особливості роботи надпровідного обмежувача струму при раптовому КЗ / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 6. – С. 30–33.
10. Пат. 112671 Україна, МПК H02H 9/00. Струмообмежуючий реактор з надпровідним комбінованим екраном / Гончаров Є.В. – № у 201606722; заявл. 21.06.16; опубл. 26.12.16, Бюл. № 24. – 4 с.: 1 іл.
11. Гончаров Є.В. Удосконалення екранування надпровідного індуктивно-резистивного струмообмежувача / Гончаров Є.В. // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: Матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 14-18 листопада – м. Київ: НУБіП – 2016. – С. 107–108.
12. Пат. 107531 Україна, МПК H02H 9/00. Високотемпературний надпровідний обмежувач струму короткого замикання з повністю кріогенним охолодженням / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту НТУ “ХПІ”. – № а 201312286; заявл. 21.10.13; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 4 с.: 1 іл.
13. Dan'ko V.G. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter / V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov // Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2016. – № 32 (1204). – С. 3–7.
14. Gubser Donald U. Superconductivity: an emerging power-dense energy-efficient technology / U. Gubser Donald // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, № 4. – P. 2037–2046.
15. Dan'ko V.G. Analysis of energy efficiency of a superconducting short circuit current limiter / V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov, I.V. Polyakov // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – Т. 6, № 5(84). – С. 4–12.
16. CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212 / J. Bock, F. Breuer, H. Walter, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1955–1960.

#### References (transliterated)

1. Leung E.M. Superconducting fault current limiters. E. M. Leung. IEEE Power Engineering Review. – 2000. – Vol. 20, № 8. – P. 1955–1960.
2. Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications. W. Paul, M. Chen, M. Lakner, et al. Physica C. – 2001. – Vol. 354, No 1/4. – P. 27–33.
3. Dan'ko V.G. Vykorystannya vysokotemperaturnoyi nadprovidnosti v elektroenergetychnomu obladnanні [Use of high-temperature superconductivity in electric power equipment]: monograph. V.G. Dan'ko, I.S. Polyanska, E.V. Goncharov; edited by V.G. Dan'ko. – Kh.: NTMT, 2011. – 248 p.
4. Test of 1.2 MVA high- $T_c$  superconducting fault current limiter / W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, et al. Superconductor Science and Technology. – 1997. – Vol. 10, No 12. – P. 914–918.
5. Dan'ko V.G. Analiz osoblyvostey roboty nadprovidnoho induktyvnoho obmezhuвача струму z dodatkovym nadprovidnym ekranom [Analysis of the functioning modes of the superconducting inductive current limiter]. V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov, I.V. Polyakov. Electrical engineering & electromechanics. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – No 4. – P. 16–20.
6. Dan'ko V. G. Analiz roboty vysokotemperaturnoho nadprovidnykovoho obmezhuвача струму korotkoho zamykannya [Analysis of high-temperature superconducting short-circuit current limiter]. V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2007. – Vol. 6/5 (30). – P. 45–48.

7. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Nadprovidnyy obmezhuвач strumu korotkoho zamykannya z ekranom [Superconducting short-circuit current limiter with screen]. Patent UA, no 74741.
8. Goncharov E.V. Improving Operational Performance of Superconducting Fault Current Limiter of the Inductive Type [Text] : abstract diss cand. tech. sci : 05.09.01. Goncharov Evgen Victorovich; NTU "KhPI". – Kharkiv, 2016. – 20 с.
9. Dan'ko V. G. Osoblyvosti roboty nadprovidnoho obmezhuвачa strumu pry raptovomu KZ [Features of the superconducting current limiter at the sudden short-circuit]. V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov. Electrical engineering & electromechanics. – Kharkiv: NTU "KhPI" – 2014. – No 6. – P. 30–33.
10. Goncharov E. V. Strumoobmezhuuyuchy reaktor z nadprovidnym kombinovanyim ekranom [Superconducting current-limiting reactor combined screen]. Patent UA, no 112671.
11. Goncharov E. V. Udoskonalennya ekranuvannya nadprovidnoho induktyvno-rezystyvnoho strumoobmezhuвачa [Improving shielding of superconducting inductively resistive short-circuit current limiter]. E.V. Goncharov. Problems of modern energy and automation system of nature: Materialy nauk.-tekhn. konf., Kyiv 14-18 November – Kyiv: NUBiP – 2016. – P. 107–108.
12. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Vysokotemperaturnyy nadprovidnyy obmezhuвач strumu korotkoho zamykannya z povnistyu kriohen-  
nym okholodzhennyam [High-temperature superconducting short-circuit current limiter with a fully cryogenic cooling]. Patent UA, no 107531, 2015.
13. Dan'ko V.G. Synthesis aspects of cryogenic high-temperature superconducting shielding inductive short-circuit current limiter. V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HPI» – 2016. – No 32(1204). – P. 3–7.
14. Gubser Donald U. Superconductivity: an emerging power-dense energy-efficient technology. U. Gubser Donald. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, No 4. – P. 2037–2046.
15. Dan'ko V.G. Analysis of energy efficiency of a superconducting short circuit current limiter. V.G. Dan'ko, E.V. Goncharov, I.V. Polyakov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 6, No 5(84). – C. 4–12.
16. CURL 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212. J. Bock, F. Breuer, H. Walter, et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, No 2. – P. 1955–1960.

*Поступила (received) 31.08.2017*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз конструктивних особливостей екранованого індуктивного обмежувача струму з високотемпературною надпровідністю / В. Г. Данько, Є. В. Гончаров, І. В. Поляков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 9–13. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Анализ конструктивных особенностей экранированного индуктивного ограничителя тока с высокотемпературной сверхпроводимостью / В. Г. Данько, Е. В. Гончаров, И. В. Поляков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 9–13. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Analysis of design features of shielded inductive current limiter with high-temperature superconductivity / V. G. Dan'ko, E. V. Goncharov, I. V. Polyakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 9–13. – Bibliography: 16. – ISSN 2079-3944.**

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

**Данько Володимир Григорович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри загальної електротехніки, м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

**Данько Владимир Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры общей электротехники; г. Харьков, тел.: (057) 707-64-27.

**Dan'ko Vadymir Grigorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of Department of general electrical engineering, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

**Гончаров Євген Вікторович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків, тел.: (057) 707-64-27.

**Гончаров Евгений Викторович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры общей электротехники, г. Харьков; тел.: (057) 707-64-27.

**Goncharov Yevgen Viktorovich** – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of General electrical engineering, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

**Поляков Ігор Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

**Поляков Игорь Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры общей электротехники, г. Харьков; тел.: (057) 707-64-27.

**Polyakov Igor Vladimirovich** – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of General electrical engineering, Kharkiv, tel.: (057) 707-64-27.

УДК 621.613

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, Р.С. ЛЕОНОВ, А.В. КАРПУК

## МОЖЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Пропонуються методи регулювання розподілу напруженості уздовж опорної ізоляційної покривки газонаповнених трансформаторів струму. У запропонованих методах розглядається колона з послідовно з'єднаних опорних ізоляторів, головними елементами схеми заміщення обрані особиста ємність окремої частини опорного ізолятора і його часткові ємності на землю та струмоведучі елементи. Таким чином зроблено висновок щодо можливості покращення розподілу напруги та зменшення неоднорідності електричного поля.

**Ключові слова:** розподіл напруженості, ізоляційна покривка, напівпровідне покриття, екран, ємність.

Предлагаются методы регулирования распределения напряженности вдоль опорной изоляционной покрывки газонаполненных трансформаторов тока. В предложенных методах рассматривается колонна из последовательно соединенных опорных изоляторов, главными элементами схемы замещения выбраны определенная емкость отдельной части опорного изолятора и его частичные емкости на землю и токоведущие элементы. Таким образом сделан вывод о возможности улучшения распределения напряжения и уменьшения неоднородности электрического поля.

**Ключевые слова:** распределение напряженности, изоляционная покрывка, полупроводниковое покрытие, экран, емкость.

There have been proposed methods of intensity distribution regulation along external isolator of gas-filled current transformers. In the offered methods the column from sequentially connected insulators is considered, the principal circuit elements of substitution selected a certain capacity of a separate part of the reference isolation center and its partial capacities on the earth and conductive elements. Thus, it was concluded a possibility of improving of intensity distribution regulation and reduction of non-uniformity of an electric field.

**Keywords:** intensity distribution, external isolator, semiconductor covering, screen, capacity.

**Вступ.** Ізоляція є найважливішим елементом конструкції електричних апаратів і суттєво впливає як на її конструкцію, так і на експлуатаційну надійність, особливо в апаратах на зверх високі напруги. В цих умовах форма електродів така, що утворює різномірне електричне поле та, як наслідок цього-суттєву нерівномірність електричного навантаження на ізоляцію. У таких апаратах, як вимірвальні трансформатори струму та напруги, обмежувачі перенапруг, які мають опорну ізоляційну конструкцію (покривку) з проходячими всередині неї заземленими або струмоведучими частинами утворюється різна нерівномірність розподілу напруги і напруженості поля уздовж ізоляційної покривки від електрода з високим потенціалом до землі.

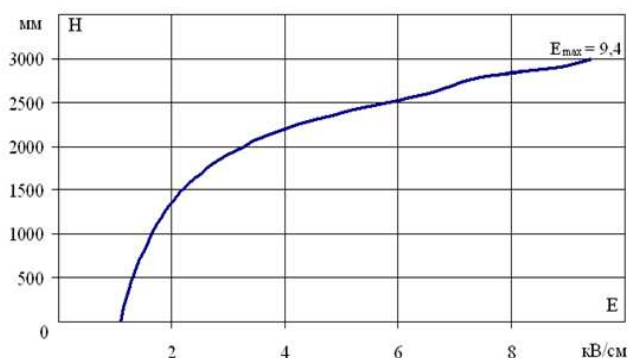


Рис. 1 – Розподіл напруженості електричного поля уздовж поверхні ізоляційної покривки без застосування способів вирівнювання електричного поля

У сучасному апаратобудуванні для виготовлення ізоляційних покривок все ширше використовують полімерну ізоляцію. В цьому випадку покривка виконується у вигляді комбінованого ізолятора, який складається з ізоляційного циліндру, армованого скловолокном з наплавними силіконовими ребрами. Крім суттєвих переваг такої конструкції вона має

такий недолік, як знижена, у порівнянні з фарфоровою ізоляцією, робоча напруженість поля, яка не повинна перевищувати (6...7) кВ/см [1, 2]. Тому оцінка і аналіз розподілу напруженості поля по висоті такої ізоляційної конструкції з урахуванням засобів по вирівнюванню розподілу напруги (зовнішні тороїдальні екрани, внутрішня конденсаторна ізоляція) мають суттєвий інтерес для подальшого вдосконалення апаратів високої напруги та підвищення їх експлуатаційної надійності.

Характерною рисою електростатичного поля полімерних ізоляторів є наявність максимуму напруженості поблизу електрода. Полімерні ізолятори схильні до старіння через дії нерівномірного електричного поля в більшій мірі, ніж їх порцелянові аналоги. Тому важливим етапом проектування стає розрахунок і дослідження електричних полів.

У більшості випадків при конструюванні електричної ізоляції не вдається використати крашу її форму з точки зору отримання найбільш вигідного для роботи електроізоляційних матеріалів рівномірного поля. У рівномірному полі ділянки електроізоляційного матеріалу навантажуються практично однаковою напруженістю поля, тобто має місце краще його використання. В нерівномірному полі окремі ділянки електроізоляційної конструкції несуть підвищене електричне навантаження, що може привести до досить швидкого руйнування матеріалів перевантажених областей, а на решту частин буде діяти підвищена напруженість поля, що також призводить до руйнування. Метою регулювання електричного поля є підвищення однорідності електричного поля. Вирівнювання електричного поля в тілі ізолятора і по його поверхні дозволяє зменшувати габарити ізоляційних конструкцій.

Високовольтне обладнання підстанцій (силові і вимірвальні трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, розрядники і ін.) забезпечується спеціальними екранами, призначеними для обмеження коронного розряду на елементах

конструкцій, що знаходяться під високою напругою. Залежно від місця розташування екранів їх поділяють на зовнішні і внутрішні. Зовнішні екрани встановлюються на обладнанні поза основної частини твердої ізоляції. Зовнішні екрани у вигляді куль, кілець, рогів, що встановлюються на кінцях і по довжині конструкції, вирівнюють електричне поле і тим самим підвищують напругу появи коронного розряду, а в деяких випадках і пробивна напруга. Внутрішні або вбудовані екрани встановлюються в межах основних габаритних розмірів твердої ізоляції. Внутрішні екрани знаходять застосування в ізоляції прохідних і опорних ізоляторів, електричних машин, трансформаторів і інших конструкцій. У порівнянні з зовнішніми екранами внутрішні мають ту перевагу, що їх установка не призводить до збільшення зовнішніх габаритних розмірів конструкції. Екрани використовуються також для вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційних конструкцій електричних апаратів. Завдяки цьому вдається помітно підвищити їх електричну міцність в сухому стані і при дуже слабкому зволоженні, коли струм витоку по поверхні ізоляторів досить малий [5].

Градування ізоляції як спосіб підвищення електричної міцності ізоляції найбільшого поширення набув у високовольтних конструкціях з комбінованою ізоляцією, перш за все кабелях з паперово-масляною ізоляцією. Є також досвід його використання в кабелях з полімерною ізоляцією. Якщо поблизу електрода, що задає неоднорідність електричного поля, помістити електроізоляційний матеріал з більшою діелектричною проникністю (для пристроїв, що працюють на змінному та імпульсному напруженні) або з більшою провідністю (для пристроїв постійної напруги), то область з максимальною напруженістю поля переміщається на кордон шарів діелектрика, а абсолютне значення  $E_{max}$  істотно знижується, т. е. коефіцієнт неоднорідності поля зменшується, коефіцієнт використання ізоляції збільшується. Застосування градування ізоляції економічно доцільно лише в кабелях на найвищій класі напруги (1000 кВ і вище). Для дискових і стрижневих ізоляторів струмопроводу з елегазовою ізоляцією, для прохідних ізоляторів, трансформаторів перспективним способом підвищення  $U_{пр}$  і  $U_{пер}$  є безперервне градування, здійснюване введенням в монолітну полімерну ізоляцію наповнювачів (наприклад, рутилової кераміки, титанату кальцію).

Ідея секціонування тіла ізолятора з метою зменшення неоднорідності поля за допомогою проміжних електродів виникла на основі зручного і широко поширеного способу регулювання поля в високовольтних пристроях з паперово-масляною, паперово-плівкового ізоляцією за допомогою конденсаторних обкладок. Вони являють собою додаткові напilenі або фольгові електроди під «плаваючим» потенціалом. При змінному і імпульсному напруженні розподіл поля визначається співвідношенням ємностей, утворених обкладками і електродами, а при постійній напрузі - опором шарів ізоляції. Підбором розмірів, числа і взаємоположення додаткових електродів вдається істотно зменшити

ступінь неоднорідності поля в основній ізоляції, як в радіальному, так і в осьовому напрямку. Для високовольтних конденсаторів перспективними діелектриками виявилися полімерні плівки, які при малій товщині мають дуже високу  $E_{пр}$ . Такі ізоляційні структури широко застосовуються в конденсаторах, трансформаторах і кабелях [15].

Методи розрахунку зовнішніх екрануючих пристроїв для вирівнювання розподілу напруги уздовж опорної ізоляції розглянуті в [1, 2, 5], внутрішніх конденсаторних обкладок у [4]. У цих роботах розглядається колона з послідовно з'єднаних опорних ізоляторів, головними елементами схеми заміщення обрані особиста ємність окремої частини опорного ізолятора і його часткові ємності на землю та струмоведучі елементи (шини). Активна провідність при умові сухої та чистої поверхні ізоляторів у порівнянні з ємнісною не враховується. За допомогою зовнішніх екранів у вигляді кільцевої або більш складної форми змінюють співвідношення часткових ємностей окремих ділянок опорної ізоляційної конструкції. Таким чином можливо покращити розподіл напруги та зменшити неоднорідність електричного поля.

На відміну від збірної колони опорних ізоляторів ізоляційна покривка вимірювальних трансформаторів є монолітною та має всередині конструктивні елементи, які розміщені у середині труби. Вони можуть мати високий потенціал (виводи трансформатора струму) або заземлені (виводи трансформатора струму). Для проведення аналізу розподілу напруги уздовж покривки її можливо уявити як еквівалентну схему заземлення. Для її побудови циліндричну покривку з висотою  $l$  умовно поділяємо на випадкову кількість рівних по висоті відрізів (елементів) висотою  $l_i$ . З урахуванням того, що на кожному зі зрізів покривки точки, що рівновіддалені від вертикальної осі, будуть мати однакові потенціали, ємнісну схему заміщення зовнішньої ізоляції можливо уявити у зручному для аналізу вигляді, що представлено на рис. 2. В цьому випадку ізоляційна покривка апроксимується у вигляді електричного елемента  $C1$ , ємність елемента по відношенню до центральної труби  $C4$ , то числове значення цих ємностей можливо визначити за умовами [5]. Для розглянутих класів напруг висота ізоляційної покривки  $l$  суттєво перевищує значення емпіричного коефіцієнту ( $a$ ), тобто  $l \gg a$ , тому величина ємностей  $C1 \dots C4$  у фарадах визначаються з умов

$$C1 = \frac{35,4 \cdot 10^{-14} \cdot \epsilon \cdot r}{1 - 0,637 \cdot \frac{r}{l}} \quad (1)$$

$$C2 = 1,11 \cdot \epsilon \left( 1 + \frac{r_e}{2h_e} + \frac{r_e^2}{4h_e^2} \right) \cdot 10^{-12}, \quad (2)$$

$$C3 = (0,10 \dots 0,12) C2 \dots \quad (3)$$

де  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу;

$r$  – радіус ізоляційної частини покривки, см;

$l$  – висота ізоляційної частини покривки, см;

$r_e$  – радіус еквівалентної кулі, яка апроксимує

елемент ізоляційної покривки, см  

$$r_e = 0,2235(b + d), \quad (4)$$

де  $b, d$  – відповідно висота та діаметр елемента покривки, см.

$h_e$  – середня висота від центру еквівалентної кулі, якою апроксимується верхній електрод до землі, см.

Середня висота від центру еквівалентної кулі визначається з умови

$$h_e = 0,5l + 250 \dots \quad (5)$$

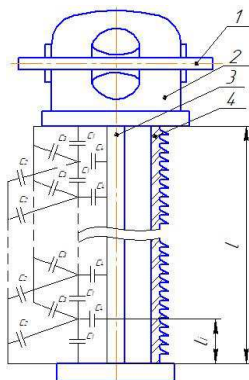


Рис. 2 – Ємнісна схема заміщення ізоляційної покривки

Ємність елемента покривки по відношенню до центральної труби  $C_4$  визначається як ємність циліндричного конденсатора за умовою [2]

$$C_4 = \frac{2\pi\epsilon \cdot l_i}{\ln \frac{r}{r_T}}, \quad (6)$$

де  $l_i$  - висота елемента ізоляційної покривки;  
 $r, r_T$  - відповідно радіуси покривки та центральної труби.

Необхідні початкові дані та методика розрахунку розподілу напруги уздовж ізоляційної покривки приведені у [5]. Для проведення досліджень ефективності впливу системи екранування на розподіл напруги уздовж покривки газонаповненого трансформатора струму розроблено програмне забезпечення Red.Volt., що дозволяє за результатами розрахунку обрати оптимальне співвідношення параметрів системи екранування. Результати досліджень впливу діаметра труби екрана, діаметра екрана та висоти його встановлення показані на рис. 3, а-3, в.

Як показують дані рис. 3, а, використання внутрішнього тороїдального екрана крива у межах габариту бака трансформатора дозволяє суттєво вирівняти розподіл напруги та зменшити навантаження на ізоляцію до 20% у порівнянні з стандартним базовим вбудованим екраном без суттєвого зростання масо-габаритних показників трансформатора.

Підвищення діаметра труби екрана здійснює значно менший вплив на розподіл напруги, однак може підсилити ефект вирівнювання розподілу напруги додатково до 5% (крива 6).

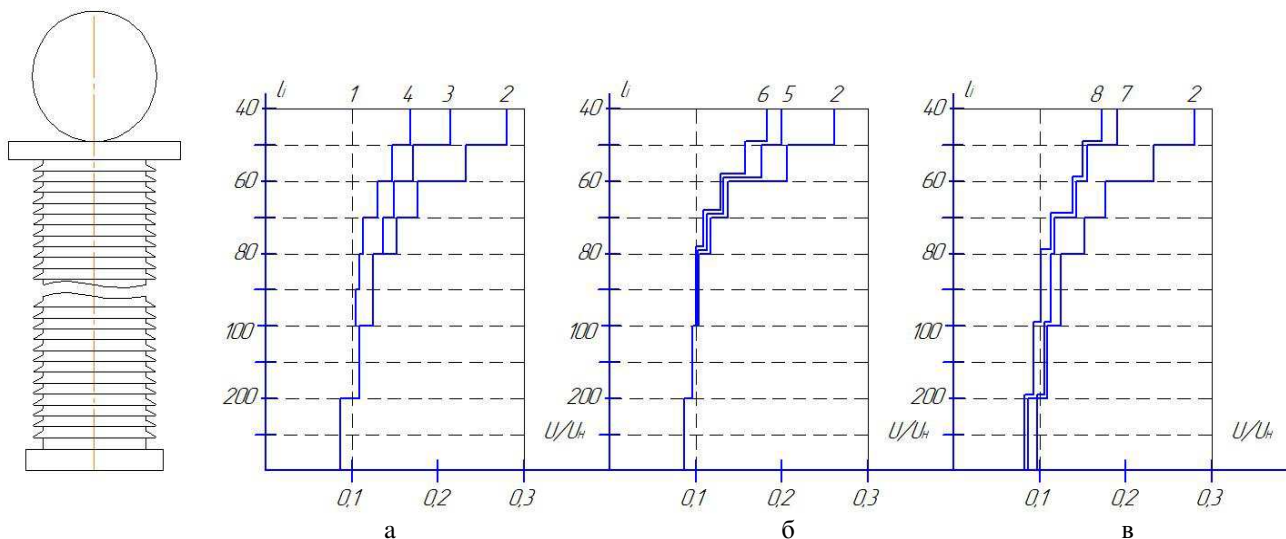


Рис. 3 – Вплив параметру екрана на розподіл напруги уздовж ізоляційної покривки трансформатора струму ТОГ-232: а - вплив діаметру екрана; б - вплив діаметру труби екрана; в – вплив висоти встановлення екрана;

Висота встановлення екрана у порівнянні з базовим варіантом виконання практично не впливає на розподіл напруги (крива 7). Однак використання подвійного екрана (крива 8) діє можливість додатково знизити неоднорідність розподілу напруги.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє оцінити комплексний вплив змінених параметрів системи екранування, наприклад при подальшому вдосконаленні окремих конструктивних елементів, заміні матеріалів для їх виготовлення та ін.

**Висновки.** Як показує аналіз отриманих даних величини часткових ємностей  $C_1 \dots C_3$  для конкретної конструкції ізоляційної покривки відносно стабільні та їх регулювання потребує суттєвих конструктивних рішень. Більшого впливу на зменшення нерівномірності розподілу напруги можливо досягнути змінюючи величину часткової ємності  $C_4$ . Ефективність цього процесу можна показати на рис. 4 при умові змінених ємностей окремих елементів покривки у верхній її частині, де має місце найбільш



неоднорідний розподіл напруги. В якості засобу регулювання ємності можна використовувати напівпровідні покриття внутрішньої поверхні ізоляційної покриття.

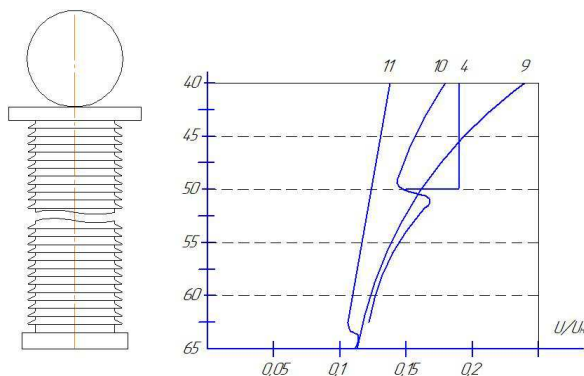


Рис. 4 – Ефективність впливу змінення  $C_4$  на розподіл напруги уздовж ізоляційної покриття

Як приклад оцінки ефективності цього засобу є використання напівпровідного покриття з  $S=.....$  відрізка (40...50)см (крива 10) на відрізка (40...65)см (крива 10), використання конденсаторних обкладок (крива 9). Більш точного визначення впливу вищезазначених методів регулювання розподілу напруги можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань.

#### Список літератури

- Александров, Г.Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учеб. / Г. Н. Александров, В. Л. Иванов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
- Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока: учеб. / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
- Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
- Бачурин, Н.И. Трансформаторы тока: учеб. / Н.И. Бачурин. – М.: Энергия, 1964. – 376 с.
- Дмитревский, В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. / В. С. Дмитревский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
- Колечицкий, Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е. С. Колечицкий. – М.: Энергоиздат, 1983. – 168 с.
- Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: учеб. / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
- Куртенков, Г. Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного электрооборудования: учеб. пособие / Г. Е. Куртенков. – Томск: издательство НТЛ, 1999. – 276 с.
- Лебедь, К. В. Применение полупроводящих покрытий в изоляции высоковольтных электрофизических установок / К. В. Лебедь // Современная техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – С. 60-62.
- Лебедь, К. В. Электропроводность и разрядные характеристики неорганических диэлектриков с полупроводящим покрытием: автореф. дис. к. т. н.: 20.06.2011 / К. В. Лебедь; [Национальный исследовательский Томский политехнический университет]. – Т., 2011. – 20 с.
- Левшунов, Р. Т. Исследование изоляторов, покрытых полупроводящей глазурью / Р. Т. Левшунов // Электрические станции. – 1954. – №4. – С. 36-41.
- Полтев, А. И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения: учеб. / А. И. Полтев. – Л.: Энергия, 1979. – 240 с.
- Полтев, А. И. Элегазовые аппараты: учеб. / А. И. Полтев. – Л.: Энергия, 1978. – 240 с.
- Тарасюк, Г. М. Планирование діяльності підприємства: навч. посібник / Г. М. Тарасюк, Л. І. Шваб. – К.: «Каравела», 2003. – 432 с.
- Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
- Чунихин, А.А. Аппараты высокого напряжения: учебно-пособие для вузов: учеб. / А.А. Чунихин, М.А. Жаворонков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
- Экономика предприятия: учебник / под ред. С. Ф. Покропивного. – К.: КНЭУ, 2001. – 432 с.
- ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. – Введ. 1997-04-12. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 50 с.
- ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Введ. 2002-03-13. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 33 с.
- ТУ 16-505.357-78 Провод обмоточный с эмалево-волоконистой изоляцией
- ТУ 6-02-12-49-83 Элегаз повышенной чистоты
- А. с. 2010409 РФ, МПК H02K3/40 Способ контроля эмали для покрытия, регулирующего электрическое поле / Ваксер Б. Д., Коган В. О. – 5032954/07; заявл. 17.03.1992; опубл. 30.03.1994, Бюл. № 9. – 4 с.
- ОАО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ea.spb.ru>
- Trenchcompany [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trenchgroup.com/en>
- КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.

#### References (transliterated)

- Aleksandrov, G.N. Insulation of high-voltage electric apparatus: Proc. GN Aleksandrov, VL Ivanov. - L.: Energoatomizdat, 1984. - 208 p.
- Afanasyev, V.V. Current transformers: Proc. V.V. Afanasyev, N.M. Adoniev, V.M. The cable. - L.: Energoatomizdat, 1989. - 416 p.
- Bazutkin, V. V. Technique of high stresses. VV Bazutkin, VP Lariонов, Yu. S. Pinal. - M.: Energoatomizdat, 1986. - 446 p.
- Bachurin, N.I. Transformers: teaching. N.I. Bachurin. - M.; - L.: Energy, 1964. - 376 p.
- Dmitrevsky, VS Calculation and design of electrical insulation: Proc. V.S. Dmitrevsky. - M.: Energoizdat, 1981. - 392 p.
- Kolechitsky, ES Calculation of electric fields of high-voltage devices. ES Kolechitsky. - M. Energoizdat, 1983. - 168 p.
- Kuchinsky, GS Insulation of high voltage installations: Proc. GS Kuchinsky, VE Kizevetter, Yu. S. Pinal. - M.: Energoatomizdat, 1987. - 368 p.
- Kurtenkov, GE Fundamentals of designing the insulation of high-voltage electrical equipment: Textbook. allowance. GE Kurtenkov. - Tomsk: NTL Publishing House, 1999. - 276 p.
- Lebed, K. V. Application of semiconducting coatings in the insulation of high-voltage electrophysical installations. K. V. Lebed. Modern techniques and technologies. - 2008. - T. 1. - P. 60-62.
- Lebed, K. V. Electrical conductivity and discharge characteristics of inorganic dielectrics with a semiconducting coating: the author's abstract. dis. Cand. Sc.: 20.06.2011. K.V. Lebed; [National Research Tomsk Polytechnic University]. - T., 2011. - 20 seconds.
- Levshunov, RT Investigation of Insulators Covered with Semiconducting Icing. RT Levshunov. Electric Stations. - 1954. - № 4. - P. 36-41.
- Poltev, AI Designs and calculation of high-voltage SF6 apparatus: Proc. AI Poltev. - L.: Energy, 1979. - 240 p.
- Poltev, A. I. Elegazoapparaty: training. AI Poltev. - L.: Energy, 1978. - 240 p.
- Tarasyuk, G.M. Planuvannya діяльності підприємства: навч. Posobnik. G.M. Tarasyuk, L.I. Schwab. - K.: "Caravel", 2003. - 432 p.
- Ushakov, V. Ya. Insulation of high voltage installations. V. Ya. Ushakov. - M.: Energoatomizdat, 1994. - 496 p.
- Chunikhin, A.A. Apparatuseshigh stress: training for universities: Textbook. A.A. Chunikhin, M.A. Larks. - M.: Energoatomizdat, 1985. - 432 p.
- The economy of the enterprise: a textbook. ed. SF Pokropivnogo. - K.: KNEU, 2001. - 432 p.

18. ГОСТ 1516.3-96 AC electrical equipment for voltage from 1 to 750 kV. - Enter. 1997-04-12. - M.: Publishing house of standards, 1997. - 50 p.
19. ГОСТ 7746-2001 Current transformers. General specifications. - Enter. 2002-03-13. - M.: Publishing house of standards, 2002. - 33 p.
20. TU 16-505.357-78 Winding wire with enamel-fibrous insulation
21. TU 6-02-12-49-83 High-purity gas monoxide
22. A. with. 2010409 RF, IPC H02K3. 40 Method of enamel control for coating that regulates the electric field. Vakser BD, Kogan VO - 5032954/07; claimed. 17.03.1992; publ. 30.03.1994, Bul. № 9. - 4 with.
23. JSC VO "Electroapparat" [Electronic resource] - Access mode: <http://www.ea.spb.ru>
24. Trenchcompany [Electronic resource] - Access mode: <http://www.trenchgroup.com/en>
25. KO "Zaporozhye plant of high-voltage equipment" [Electronic resource] - Access mode: <http://www.zva.zp.ua>.

Поступила (received) 31.08.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 14–18. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Возможности компенсации напряженности электрического поля внешней изоляции высоковольтных газонаполненных трансформаторов тока / Л.Б. Жорняк, А.И. Афанасьев, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 14–18. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.**

**The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers / L.B. Zhornyak, A.I. Afanasiev, R.S. Leonov, A.V. Karpuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 14–18. – Bibliography: 25. – ISSN 2079-3944.**

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

**Жорняк Людмила Борисівна** – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя; тел.: (050) 257-05-10.

**Жорняк Людмила Борисовна** – кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье. тел. (050) 257 10.

**Zhornyak Lyudmila Borisovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Zaporizhya National Technical University; tel.: (050) 257 10.

**Афанасьєв Олексій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя; тел.: (067) 833-70-35

**Афанасьєв Алексей Иванович** – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье. тел.: (067) 833-70-35.

**Afanasiev Alexej Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Zaporizhya National Technical University; tel.: (067) 833-70-35.

**Леонов Роман Сергійович** – Запорізький національний технічний університет, студент; тел.: (066) 695-87-67; e-mail: [leonov5555@ukr.net](mailto:leonov5555@ukr.net).

**Леонов Роман Сергеевич** – Запорожский национальный технический университет, студент; тел.: (066) 695-87-67; e-mail: [leonov5555@ukr.net](mailto:leonov5555@ukr.net).

**Leonov Roman Sergeevich** – Zaporizhya National Technical University, student; tel.: (066) 695-87-67; e-mail: [leonov5555@ukr.net](mailto:leonov5555@ukr.net).

**Карпук Антоніна Василіївна** – Запорізький національний технічний університет, студент; тел.: (063) 484-27-89.

**Карпук Антонина Васильевна** – Запорожский национальный технический университет, студент; тел.: (063) 484-27-89.

**Karpuk Antonina Vasilievna** – Zaporizhya National Technical University, student; tel.: (063) 484-27-89.

УДК 621.315.626

*Л.Б. ЖОРНЯК, О.Г. ВОЛКОВА, М.А. МАКОГОН***К ВОПРОСУ ОБ УЛУЧШЕНИИ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В данной работе исследованы вопросы повышения надежности электрической изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов, которые находятся в эксплуатации в различных энергообеспечивающих системах, методы повышения срока службы такого электротехнического оборудования. Обоснована возможность применения в них перфтортрансформаторного масла в качестве жидкого диэлектрика с целью повышения эксплуатационных характеристик.

**Ключевые слова:** измерительные высоковольтные трансформаторы, старение изоляции, бумажно-масляная изоляция, диэлектрические потери, жидкий диэлектрик, электрическая изоляция, перфтортрансформаторное масло, ди(октафторпентиловый) эфир

У даній роботі досліджені питання підвищення надійності електричної ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів, які знаходяться в експлуатації в різних енергозабезпечуючих системах, методи підвищення терміну служби такого електротехнічного обладнання. Обґрунтовано можливість застосування в них перфтортрансформаторного масла в якості рідкого діелектрика з метою підвищення експлуатаційних характеристик.

**Ключові слова:** вимірювальні високовольтні трансформатори, старіння ізоляції, паперово-масляна ізоляція, діелектричні втрати, рідкий діелектрик, електрична ізоляція, перфтортрансформаторне масло, ді (октафторпентиловий) ефір

In this paper, the issues of increasing the reliability of electrical insulation of high-voltage measuring transformers, which are in operation in various power supply systems, and methods for increasing the service life of such electrical equipment researched. The possibility of using perfluorotransformer oil as a liquid dielectric in them for the purpose of improving the performance characteristics is substantiated.

**Keywords:** measuring high-voltage transformers, insulation aging, paper-oil insulation, dielectric losses, liquid dielectric, electrical insulation, perfluorotransformer oil, di (octafluoropenty) ether

**Введение.** Высокое развитие электроэнергетики, повышение номинальных напряжений и токов электрооборудования, создание объединенных энергосистем требует применения новых, более современных электрических аппаратов в системах измерения, защиты и контроля. К таким электрическим аппаратам относится высоковольтные измерительные трансформаторы тока и напряжения (ТТ и ТН). Высоковольтные измерительные трансформаторы тока и напряжения, являющиеся основными устройствами защиты и измерения в электроэнергетике, отличаются от применяемых в низковольтной области трансформаторов уровнем изоляции между первичной и вторичной обмотками. От надежности этих аппаратов зависит непрерывное снабжение электроэнергией потребителей. Длительная работа в номинальном режиме, а также работа в аварийном режиме приводит к постепенному ухудшению свойств трансформаторов, особенно качества изоляции. Следовательно, от состояния качества трансформаторного масла, залитого в маслосистемы высоковольтного оборудования, зависит надежность работы этого оборудования [1, 2].

В электроэнергетике Украины, также как и в других странах, в настоящее время в эксплуатации находится около 70% измерительных трансформаторов с длительным сроком службы, который в основном составляет 25 лет, и значительная часть этого оборудования уже отработала этот нормативный срок. В связи с этим некоторая часть трансформаторов на электростанциях и подстанциях требует замены или ремонта, а это приводит к существенным финансовым вложениям, и не всегда целесообразно с точки зрения технических и экономических затрат.

Известно, что элементы внутренней изоляции в высоковольтных конструкциях в процессе эксплуатации подвергаются сильному электрическому, тепловым и механическим воздействиям, а это, в свою очередь, приводит к ухудшению диэлектрических свойств изоляции, которая “старее” и утрачивает свою электри-

ческую прочность. Электрическая прочность изоляции под действием естественного старения снижается годами и зависит от качества изоляционных материалов, конструкции изоляции и культуры эксплуатации. При нормальных условиях изоляция должна работать десятки лет. Для имеющей наибольшее распространение изоляции класса А максимальная температура может равняться 105° С, при которой срок службы изоляции равен примерно 7 годам. Практика показывает, что превышение температуры на 8° С сверх максимальной сокращает срок службы изоляции вдвое. Когда через диэлектрик проходит ток, то происходит его нагрев, а потери энергии на нагрев называются диэлектрическими и возникают при промышленной частоте в основном за счет поляризации диэлектрика. Параметр tg δ характеризует диэлектрические потери в изоляции, является показателем наличия в изоляции посторонних включений и увлажнения изоляции. Тепловые воздействия обусловлены тепловыделениями в активных частях оборудования (в проводниках и магнитопроводах), а также диэлектрическими потерями в самой изоляции. В условиях повышения температуры значительно ускоряются химические процессы в изоляции, которые ведут к постепенному ухудшению ее свойств [5, 6, 15].

Пробой внутренней изоляции электрооборудования под воздействием высокого напряжения приводит к полной или частичной утрате электрической прочности. Большинство видов внутренней изоляции принадлежит к группе несамовосстанавливающейся изоляции, пробой которой означает необратимое повреждение конструкции. Это означает, что внутренняя изоляция должна обладать более высоким уровнем электрической прочности, чем внешняя изоляция, т.е. таким уровнем, при котором пробой полностью исключается в течение всего срока службы. Необратимость повреждения внутренней изоляции сильно осложняет накопление экспериментальных данных для новых видов внутренней изоляции и для вновь разра-

батываемых крупных изоляционных конструкций оборудования высокого и сверхвысокого напряжения. Ведь каждый экземпляр крупной дорогостоящей изоляции можно испытать на пробой только один раз.

Остаются неизменными требования, предъявляемые к диэлектрикам, используемым для изготовления высоковольтной, и не только, внутренней изоляции электрооборудования. Они должны обладать комплексом высоких электрических, теплофизических и механических свойств и обеспечивать необходимый уровень электрической прочности, а также требуемые тепловые и механические характеристики изоляционной конструкции при размерах, которым соответствуют высокие технико-экономические показатели всей установки в целом. Диэлектрические материалы должны также:

- обладать хорошими технологическими свойствами, т.е. должны быть пригодными для высокопроизводительных процессов изготовления внутренней изоляции;

- удовлетворять экологическим требованиям, т.е. не должны содержать или образовывать в процессе эксплуатации токсичные продукты, а после отработки всего ресурса они должны поддаваться переработке или уничтожению без загрязнения окружающей среды;

- не быть дефицитными и иметь такую стоимость, при которой изоляционная конструкция получается экономически целесообразной.

Длительная практика создания и эксплуатации различного высоковольтного оборудования показывает, что во многих случаях весь комплекс требований наилучшим образом удовлетворяется при использовании в составе внутренней изоляции комбинации из нескольких материалов, дополняющих друг друга и выполняющих несколько различные функции. Так, только твердые диэлектрические материалы обеспечивают механическую прочность изоляционной конструкции; обычно они имеют и наиболее высокую электрическую прочность. Детали из твердого диэлектрика, обладающего высокой механической прочностью, могут выполнять функцию механического крепления проводников. Высокопрочные газы и жидкие диэлектрики легко заполняют изоляционные промежутки любой конфигурации, в том числе тончайшие зазоры, поры и щели, чем существенно повышают электрическую прочность, особенно длительную. Использование жидких диэлектриков позволяет в ряде случаев значительно улучшить условия охлаждения за счет естественной или принудительной циркуляции изоляционной жидкости [18].

**Цель работы.** Изучение возможностей повышения надежности работы измерительных трансформаторов за счет улучшения внутренней изоляции, использования новейших технологических решений и материалов, а также мониторинговых испытаний эксплуатируемого оборудования является, на наш взгляд, актуальным вопросом. поэтому целью данной работы, в конечном счете, есть анализ возможности применения новейших материалов как во вновь разрабатываемом высоковольтном оборудовании, так и находящемся в эксплуатации долгое время.

**Анализ конструктивных методов повышения надежности измерительных трансформаторов.** Повышения надежности измерительных трансформаторов можно достичь за счет усовершенствования как конструкции самих трансформаторов, так и технологии их изготовления. В новых сериях трансформаторов проводятся принципиальные изменения, связанные с конструктивными особенностями основных узлов и позволяющие улучшить потребительские свойства трансформаторов, а также снизить затраты на их изготовление. Разработки и исследования в связи с этим связаны с вопросами улучшения свойств трансформаторных сталей для магнитопроводов, обмоток и внешней металлоконструкцией, а также повышения качества и надежности изоляционных материалов [5-10].

Например, ведущие мировые фирмы и предприятия предложили наряду с трансформаторами с бумажно-масляной изоляцией, которые имеют вполне удовлетворительные характеристики при работе с энергооборудованием до 750 кВ и выше, применять трансформаторы с твердой, газовой и другими видами изоляции. ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока» (СЗТТ) в 1997 году выпустил трансформатор с литой эпоксидной изоляцией. Такие трансформаторы зарекомендовали себя как надежные, более всего подходящие для работы в условиях с высокой загрязненностью (на металлургических, химических предприятиях и предприятиях горнодобывающей отрасли), а их качество подтверждается бесперебойной работой от крайнего севера до субтропиков [11]. Долгое время данный вид изоляции применялся только в трансформаторах на класс напряжения до 35 кВ включительно, т.к. эпоксидные компаунды не пригодны для трансформаторов наружной установки, поскольку разрушаются под воздействием солнечной радиации и климатических факторов. Однако, ОАО «СЗТТ» решил данную проблему технологическим путем: делая две заливки (первая - из обычного компаунда, а вторая, которая определяет внешнюю форму трансформатора, выполняется из материала, устойчивого к внешним воздействиям. Данное техническое решение позволило изготовить трансформатор, предназначенный для работы в сетях до 110 кВ (рис.1). Концерн АВВ разработал трансформаторы с песчано-масляной изоляцией (рис.2). По сути, трансформаторы являются маломасляными, так как их внутренний объем заполнен кварцевым песком, пропитанным минеральным маслом [13]. Такая конструкция позволяет добиться высоких механических характеристик и повысить стойкость к сквозным токам короткого замыкания.

Однако данный вид изоляции имеет свои недостатки. Так, песок для высоковольтной изоляции необходимо использовать только определенных месторождений, требуется его тщательная промывка, прокаливание и магнитная сепарация для удаления проводящих частиц. Однако, проводящие частицы, которые по своей природе антимангнитные, удалить невозможно. Оставаясь в изоляции, они становятся источниками концентрации местных зарядов, участвующих в развитии ползущих разрядов. В составе песка всегда присутствуют частицы кремниевых соединений, ко-

торые поглощают влагу и при колебаниях температуры эта влага перераспределяется, увлажняя бумажную изоляцию. Кроме того, присутствие кварцевого песка в масле вызывает образование большого количества водорода, выделение газовых пузырьков, что вызывает микро пробой в изоляции. Накопление парогазовых пузырьков является причиной относительно быстрого пробоя бумажно-масляной изоляции. Это явление достаточно хорошо исследовано при аварии трансформатора тока серии ИМВ на подстанции "Итатская", которые имели песочно-масляную изоляцию. Повреждения трансформаторов происходили с периодичностью от 1 месяца на подстанции "Итатская" до 12 часов на подстанции "Беркут" с момента включения.

Для оборудования напряжением до 1100 кВ как правило применяют трансформаторы с элегазовой изоляцией (рис. 3), основным преимуществом которых является их полная пожаробезопасность, что по-

зволяет уменьшить размеры подстанций или помещений, где они размещены, и снизить их стоимость в целом. Однако нужно отметить, что такие трансформаторы имеют большие эксплуатационные расходы, а элегаз в результате действия разрядов токсичен [12].

На сегодняшний день заводом КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» решена проблема, которая возникала при аварийных ситуациях в сетях, где установлены маслonaполненные трансформаторы. Иногда повреждение трансформатора сопровождалось разрушением изолятора с разлетом осколков и разбросом масла, что, в свою очередь, влекло за собой повреждение рядом стоящего оборудования. Применение современных материалов, в частности высокопрочных изоляторов и сильфонных компенсаторов, дало маслonaполненным измерительным трансформаторам статус взрывобезопасных (рис. 4) [14].



Рис. 1 – Трансформатор ТОЛ-110



Рис. 2 – Трансформатор ИМВ-110



Рис. 3 – Трансформатор ТОГ 110

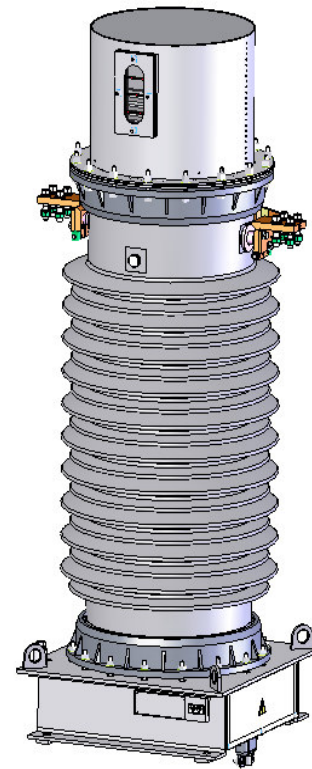


Рис. 4 – Трансформатор ТФ3М 110 (производство КО «ЗЗВА»)

Наряду с конструктивными методами повышения надежности трансформаторов, существуют также технологические методы. Поэтому от состояния качества трансформаторного масла, залитого в маслосистемы высоковольтного оборудования, зависит надежность работы этого оборудования. Известно, что трансформаторное масло, являясь жидким диэлектриком, обеспечивает надежную изоляцию в электрических маслонаполненных аппаратах (силовых и измерительных трансформаторах, реакторах, высоковольтных вводах и др.), охлаждает активные части этих аппаратов, а также в некоторых случаях служит для гашения электрической дуги. Поскольку на протяжении эксплуатации всего оборудования подстанций необходимо проводить постоянный мониторинг качества масла и, по статистике, через год оно требует очистки, а через 4-5 лет – регенерации, то актуален вопрос повышения качества масла различными способами. Одним из таких способов является ингибирование трансформаторных масел антиокислительной присадкой.

**Используемые и перспективные жидкие диэлектрики.** В настоящее время во вновь вводимом в эксплуатацию оборудовании в соответствии с Монреальским протоколом до 2030 года должны быть запрещены к применению продукты и материалы, которые негативно влияют на окружающую среду. Задача во всем мире стоит в том, что в действующем оборудовании они также должны быть заменены на другие продукты. А в США, Японии и некоторых европейских странах они уже были запрещены к применению с 1979 г. в связи с их высокой токсичностью и устойчивостью к процессам биоразложения.

Поиски альтернативных вариантов жидких диэлектриков привели к созданию таких веществ, как кремнийорганические жидкости (КОЖ), синтетические

сложные эфиры, углеводородные жидкости, парафины, фторуглеводороды. Все жидкие диэлектрики - заменители хлорфторсодержащих веществ должны удовлетворять следующим требованиям: температура воспламенения выше 200 °С, рабочий диапазон температур от -65 до +155 °С, диэлектрическая проницаемость 4-6 на частотах 50-10000 Гц, tg δ менее 0,02 при и частотах 50-10000 Гц, удельное сопротивление более  $2 \cdot 10^{10}$  Ом·см при 90 °С. Они должны быть самогасящимися, нетоксичными, биоразлагаемыми, иметь низкий коэффициент объемного расширения при нагреве.

В случае замены трансформаторного масла кремнийорганическими жидкостями (КОЖ) или, так называемыми «силиконовыми маслами», не содержащими реакционноспособных функциональных групп, они сохраняют текучесть в широком диапазоне температур (от -135 до 250-300 °С). Кремнийорганические жидкости бесцветны и по виду напоминают очищенные нефтяные масла. Для них характерны такие ценные свойства, как, относительно малое изменение вязкости с изменением температуры, более высокая по сравнению с жидкими углеводородами сжимаемость (до 36% по объему при 4000 МПа), низкие температуры застывания и стеклования, гидрофобность, химическая инертность, высокие термическая (240-350 °С) и термоокислительная (150-300 °С) стабильности, хорошие диэлектрические свойства.

В работе [21] авторы справедливо отмечают, одной из самых актуальных проблем является обеспечение электрической изоляции действующих высоковольтных устройств - трансформаторов, емкостных накопителей, высоковольтных вводов и кабелей. Применяемые с этой целью вещества принято подразделять по своему происхождению на нефтяные масла и синтетические жидкие диэлектрики.

Недостатками нефтяных масел являются пожаро- и взрывоопасность, невысокая стойкость к тепловому и электрическому старению, гигроскопичность, горючесть. Поэтому в процессе их эксплуатации необходим постоянный контроль основных параметров: влагосодержания, кислотности, пробивного напряжения, тангенса угла диэлектрических потерь. В частности в трансформаторах с массой масла 1000 кг и более для поддержания необходимого качества изоляции, замедления старения, масло должно подвергаться непрерывной регенерации в термосифонных или адсорбционных фильтрах. Трансформаторы напряжением 110 кВ и выше должны иметь воздухоосушительные фильтры для замедления процесса увлажнения масла. Для замедления процесса старения рекомендуется вводить в масло стабилизирующие присадки, например, такие как ионол.

Перспективным способом улучшения качества масла является метод введения в трансформаторное масло фторорганической жидкости (фторуглеродов) взамен органических [5-8]. Поскольку фтор является самым сильным окислителем, более сильным, чем кислород, а фторорганическая жидкость инертна по отношению к любым воздействиям, в т.ч. стабильна под действием электрического поля и температуры, то фторорганические жидкости выступают, как пожаробезопасные жидкие диэлектрики. Замена атома водорода на атом фтора позволяет использовать перфтортрансформаторное масло в качестве морозостойкой смазки, поскольку при нормальных условиях оно приобретает свойства твердого диэлектрика.

Применение перфтортрансформаторного масла в высоковольтном оборудовании, например, в измерительных трансформаторах, позволит значительно улучшить их внутреннюю изоляцию, за счет его свойств и возможностей, таких как: негорючесть; высокая термическая и химическая стабильность; инертность по отношению к металлам, твердым диэлектрикам и резинам; нетоксичность, отсутствие цвета и запаха [4-6, 15]. Важной особенностью является достаточно высокая электрическая прочность в газообразном (парообразном) состоянии - до 200-300 кВ/см, т.к. фторуглеродные молекулы имеют высокое сродство с электроном, т.е. они являются электроотрицательными. Из других свойств отметим не только негорючесть, но и термостабильность до температуры более 400 °С. Хотя теплопроводность фторуглеродов в два-три раза ниже, чем у трансформаторного масла, но исключительно высокий коэффициент температурного расширения приводит к возникновению мощных конвективных потоков. При этом конвективный теплоотвод оказывается в 3-4 раза выше, чем у трансформаторного масла. Главный недостаток этого масла – дороговизна (оно дороже трансформаторного масла в несколько десятков раз).

По мнению авторов [19-21] наиболее перспективными с точки зрения высоких эксплуатационных показателей есть полифторированные жидкие диэлектрики, в частности ди(октафторпентиловый) эфир. Это органическое вещество, способ получения которого не требует больших энергетических затрат, производства нового оборудования, и, как следствие, имеет невысокую стоимость. Его получение возможно при произ-

водстве спиртов на основе побочного продукта – октафторпентанола. «Рассматриваемый эфир представляет собой бесцветную жидкость, обладает высокой термической стабильностью и химической стойкостью, а также обладает водо- и маслоотталкивающими свойствами.

Отличительной особенностью ди(октафторпентилового) эфира является отсутствие у него температуры вспышки, воспламенения, самовоспламенения, температурных и концентрационных пределов распространения пламени. По многим электроизолирующим свойствам данная жидкость не хуже перфторуглеродов, а по отдельным имеет лучшие показатели» [18, 21]. Авторы отмечают, что, обладая электрическим сопротивлением, сравнимым с сопротивлением перфтортрансформаторного масла, характеризуется более низким тангенсом угла потерь ( $10^{-4}$ ), равным значением пробивного напряжения (50 кВ/мм). При этом ди(октафторпентиловый) эфир имеет в три раза большую диэлектрическую проницаемость. Они считают, что «такое вещество позволит осуществить замену устаревших, затратных при эксплуатации электроизолирующих жидкостей на другие, а именно на ди(октафторпентиловый) эфир. Причем, принципиальные изменения в конструкции электротехнических аппаратов не нужны, а их заполнение предлагаемым жидким диэлектриком возможно при плановой замене нефтяного масла или синтетического наполнителя».

Однако, на наш взгляд это невозможно, т.к. раньше эти же авторы утверждали, что эфир «обладает водо- и маслоотталкивающими свойствами». А поскольку эксплуатируемые трансформаторы после ремонта (в частности, после старения масла его замены) имеют все же пропитанную внутреннюю бумажную изоляцию, то заполнение их эфиром кажется нам сомнительным. Также рекомендации по заполнению трансформаторов новых разработок эфиром могут быть после более детальных исследований. Неизвестно, как будет себя вести бумажная изоляция при заполнении такого оборудования ди(октафторпентиловым) эфиром. Ведь технологии заполнения маслом высоковольтного оборудования, приемосдаточных испытаний и мониторинга их основных параметров во время эксплуатации уже отработаны, то утверждение о том, что это вещество есть наиболее перспективным с точки зрения «высоких эксплуатационных показателей» нам представляется также сомнительным.

Напротив, перфтортрансформаторное масло, которое относится к коллоидным растворам, при температурах, близких к 20-ти градусам Цельсия, приобретает свойство твердого диэлектрика. А это очень важно в трансформаторостроении с точки зрения электрической прочности, т.е. способности материала противостоять разрушению его электрическим напряжением и электрическими потерями, характеризующимися тангенсом угла потерь, нагревостойкостью, характеризующейся температурой, предельно допустимой для данного диэлектрика при его длительном использовании в электрооборудовании. В дальнейшем, при нагреве активной части трансформатора это масло начинает переходить в жидкое состояние, что приводит к возникновению мощных конвективных потоков. В связи с тем, что на данном этапе работы мы не обладаем данными по теплопроводности и кинематической вязко-

сти, то в сравнительной таблице приведены данные именно для коллоидных растворов [3-6, 9]. Количество теплоты, отдающееся с поверхностей нагретых частей высоковольтного трансформатора, в основном зависит от условий конвективного теплообмена, поэтому большое значение имеет какое количество теплоты, отводимого конвекцией. Из теории теплообмена следует, что протекание сложных процессов определяется не отдельными физическими факторами, а комплексом параметров [7-9].

В диэлектриках с повышением температуры коэффициент теплопроводности увеличивается. Как правило, для материалов с большей плотностью коэффициент теплопроводности имеет более высокое значение. В связи с тем, что плотность перфтортрансформаторного масла в несколько раз больше плотности трансформаторного, то можно сделать вывод, что перфтортрансформаторное масло обладает высокой теплопроводностью, как у твердых диэлектриков.

Исходя из данных, проведенных в табл. 1 можно сделать вывод, что с увеличением теплопроводности и кинематической вязкости, и приближением свойств перфтортрансформаторного масла к свойствам твердого тела, будут заметно улучшаться изоляционные свойства, а также увеличиваться коэффициент теплоотдачи.

Таблица 1 – Физические характеристики изоляционных материалов

Показатель \ Материал	Трансформаторное масло	Бумага, пропитанная маслом	Коллоидные растворы
Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·°К)	0,09-0,14	0,21	0,71
Кинематическая вязкость, $\nu$ , м <sup>2</sup> /с	28-30·10 <sup>-6</sup>	33·10 <sup>-6</sup>	66·10 <sup>-6</sup>

По нашим расчетам коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе увеличивается в 8 раз за счет увеличения коэффициента теплопроводности и кинематической вязкости.

**Выводы.** Повышение энергоэффективности промышленного производства в настоящее время возможно как с внедрением передовых технологий, так и с модернизацией функционирующих систем.

Необходимо отметить, что озоноразрушающий потенциал перфтортрансформаторного масла относительно хлорфторуглеводородов равен нулю, а следовательно, он, обладая высокими диэлектрическими свойствами, не может нанести вред окружающей среде. Проведенный анализ показывает, что замена широко распространенных жидких диэлектриков, нефтяных масел и диэлектриков на основе полихлордифенилов (ПХД), на перфтортрансформаторное масло обоснована высокими изоляционными свойствами, экологической безопасностью и открывает широкие перспективы для повышения эксплуатационных характеристик высоковольтного электротехнического оборудования такого, как высоковольтные измерительные трансформаторы.

Поскольку трансформаторы, заполненные новыми жидкостями, в основном имеют конструкцию, близкую к традиционной, и в большинстве случаев

остается требование их герметизированного исполнения. Причина этого - повышенное влагопоглощение, интенсивное выделение паров жидкости, либо другие соображения, то это дополнительный аргумент в пользу применения перфтортрансформаторного масла в качестве жидкого диэлектрика маслонаполненного высоковольтного оборудования [2, 18].

Проведенные исследования по повышению надежности и долговечности различного высоковольтного оборудования энергосистем показывают, что перспективным направлением все же является повышение качества изолирующих материалов, в частности масла. Применение новых технологий позволяет качественно изменять свойства трансформаторного масла, а темпы же развития этих технологий позволяют сделать вывод о том, что стоимость таких усовершенствований со временем будет уменьшаться, а значительное снижение эксплуатационных расходов в дальнейшем сможет многократно окупить вложения в производство.

#### Список литературы

1. Энергетика світу та України. Цифри та факта. - Київ: Українські енциклопедичні знання. - 2005. - 404 с.
2. Гончар, В.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения: учеб. пособие / В.С. Гончар. - СЗТУ. - СПб., 2006. - 228 с
3. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло [Текст] / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. - М.; Энергоатомиздат. - 1983 г. - 296 с.
4. Жорняк, Л.Б. Проблемы надежности и способы повышения эффективности работы высоковольтных вводов [Текст] / Л.Б. Жорняк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - 2005. - № 48. - С. 48 - 51.
5. Жорняк, Л.Б. Повышение надежности и эффективности высоковольтных вводов [Текст] / Л.Б. Жорняк, Е.Ю. Райкова, В.И. Осинская // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Вип. 4/2008 (51). Ч. 1. - С. 95-99.
6. Жорняк, Л.Б. Основные направления улучшения качества высоковольтных вводов оборудования энергосистем [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.Ю. Райкова, В.І. Осинська, В.М. Снігірьов // Електротехніка та електромеханіка. - 2008. - № 3. - С. 17-21
7. Славинский, А.З. Новые программы и перспективные разработки ЗАО «Мосизолятор» [Текст] / А.З. Славинский // Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение». - 2005.
8. Соколов В.В. Проблемы надежности мощных трансформаторов после длительной эксплуатации [Текст] / Соколов В.В. Тезисы докладов XI международной научно-технической конференции «Трансформато-ростроение». - 2005.
9. ГКД 34.20.302-2002. Приемная, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Методичні вказівки. НД/Енергетики, Київ - 1998.
10. <http://vvod-kulikov.ru>. ТД «Калуга-энергопоставка»
11. <http://www.marketelectro.ru> - Московский завод «Изолятор» им. А. Баркова
12. <http://www.sermir.narod.ru/tryd/Posob> журнал «Электрофизика»
13. <http://www.abb.ru> - Концерн АBB
14. <http://www.zva.zp.ua/>
15. Николаев, Г.А. Техническое состояние маслонаполненного оборудования тяговых подстанций и система его комплексного диагностирования [Текст] / Г.А. Николаев, А. В. Кузнецов // Вестник ВНИТ. - <http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2003-4>
16. <http://www.belenergo.by> - НПІ «БелЭнергоСпецОбор»
17. <http://master-oil.com/theory/3/>
18. Бормосов, В.А. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Текст] / В.А. Бормосов, М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, Н.Е. Смольская // Информационный портал "TRANSFORMаторы"
19. Рахимов, А.И. Электроизолирующие свойства ди(октафторпентилового) эфира [Электронный ресурс] / А.И. Рахимов, В.П. Заярный, Л.В. Хоперскова // Исследования технических наук: электрон. науч. журнал. - 2012. - Вып. 1 (январь-март). - С. 8-11. - Режим доступа: <http://www.researches-of-technical-sciences.ingnpublishing.com>
20. Рахимов, А.И. Новая реакция полифторированных спиртов с



тионилхлоридом [Текст] / А.И. Рахимов, А.В. Мирошниченко // FluorineNotes (Фторные заметки): on-line журнал. [Электронный ресурс]. - 2011. - № 3.

21. Рахимов, А.И. Способ повышения эксплуатационных характеристик высоковольтного электротехнического оборудования [Текст] / А.И. Рахимов, В.П. Зяряный, Л.В. Хоперскова // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2014. - С. 66 - 67.

#### References (transliterated)

1. Yenergetika svitu ta Ukraïni. Tsifri ta fakta. - Kiïv: Ukraïns'ki yentsiklopedichni znannya - 2005. - 404 s.
2. Gonchar, V. S. Tekhnika vysokikh napryazheniy. Izolyatsiya i perenapryazheniya: ucheb. posobiye. V. S. Gonchar.- SZT. SPb., 2006. 228 s.
3. Lipshteyn, R. A. Transformatornoye maslo [Tekst]. R. A. Lipshteyn, M. I Shakhnovich. - M. ; Energoatomizdat. - 1983 g. - 296 s.
4. Zhornyak, L. B. Problemy nadezhnosti i sposobov povysheniya effektivnosti raboty vysokovol'tnykh vvodov [Tekst]. L. B. Zhornyak. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPİ». - 2005. No 48. - S. 48-51.
5. Zhornyak, L. B. Povysheniye nadezhnosti i effektivnosti-zhizni vysokovol'tnykh vvodov [Tekst]. L. B. Zhornyak, Ye. YU. Raykova, V. I. Osinskaya. Visnik KDPU imeni Mikhayla Ostrogradskogo. Vip. 4/2008 (51). CH. 1. - P. 95-99.
6. Zhornyak, L. B. Osnovnyye napravleniya uluchsheniya kachestva vysokovol'tnykh vvodov oborudovaniya ener-gosistem [Tekst]. L. B. Zhornyak, O. YU. Raykova, V. I. Osinska, V. M. Snigiriov. Yelektrotekhnika i yelektromekhanika. - 2008. No 3. - C. 17-21.
7. Slavinskiy, A.Z. Novyye programmy i perspektiv-nyye razrabotki ZAO «Mosizolyator» [Tekst]. A. Z. Slavinskiy. Tezisy dokladov XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Transformatorstroyniy». - 2005.
8. Sokolov V. V. Problemy nadezhnosti moshchnykh transformatorov posle dlitel'noy ekspluatatsii [Tekst]. Sokolov V. V. Tezisy dokladov XI mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya

- konferentsiya «Transformatorstroyniy». - 2005.
9. GKD 34.20.302-2002. Priymannaya, zastosuvannya ta yekspluatatsiya transformatornikh masel. Metodichni vkazivki. ND. Yenergetiki, Kiïv - 1998.
  10. <http://vvod-kulikov.ru>. TD «Kaluga-energo-postavka»
  11. <http://www.marketelectro.ru> - Moskovskiy zavod «Izolyator» im. A. Barkova
  12. [http://www.sermir.narod.ru/tryd/Posob-zhurnal «Elektrofizika»](http://www.sermir.narod.ru/tryd/Posob-zhurnal/Elektrofizika)
  13. <http://www.abb.ru> - Kontsern ABB
  14. <http://www.zva.zp.ua/>
  15. Nikolayev, G. A. Tekhnicheskoye sostoyaniye maslonapol-nennogo oborudovaniya tyagovykh podstantsiy i sistema yego kompleksnogo diagnostirovaniya [Tekst]. G. A. Nikolayev, A. V. Kuznetsov. Vestnik VNIT. <http://www.css-rzd.ru/vestnik-vniizht/v2003-4>
  16. <http://www.belenergo.by> - NPP «BelEnergoS-petsObor»
  17. <http://master-oil.com/theory/3/>
  18. Bormosov V.A. Perspektivy i sostoyaniye razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh seriy [Tekst]. V. A. Bormosov, M. N. Kostousova, A. F. Petrenko, N. Ye. Smolskaya. Informatsionnyy portal "TRANSFORMatory"
  19. Rakhimov, A. I. Elektroizoliruyushchiye svoystva di (oktaftorpentilovogo) efira [Elektronnyy resurs]. A. I. Rakhimov, V. P. Zayarnyy, L. V. Khoperskova. Issledovaniya tekhnicheskikh nauk: elektron. nauch. zhurnal. - 2012. - Vyp. 1 (yanvar'-mart). - P. 8-11. - Rezhim dostupa: <http://www.researches-of-technical-sciences.ingnpublishing.com>
  20. Rakhimov, A.I. Novaya reaktsiya polifloriro-vannykh spirtov s tionilkhloridom [Tekst]. A. I. Rakhimov, A. V. Miroshnichenko. FluorineNotes (Ftornyye za-metki): on-layn zhurnal. [Elektronnyy resurs]. - 2011. No 3.
  21. Rakhimov, A.I. Spособ povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik vysokovol'tnogo elektrotekhnicheskogo oborudovaniya [Tekst]. A. I. Rakhimov, V. P. Zayarnyy, L. V. Khoperskova. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2014. - P. 66-67.

Надійшла (received) 07.10.2017

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

**До питання про покращення якості внутрішньої ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів / Л.Б. Жорняк, О.Г. Волкова, М.А. Макогон // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 19–25. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов / Л.Б. Жорняк, О.Г. Волкова, М.А. Макогон // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 19–25. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**To the question of improving the quality of internal insulation of high-voltage measurement transformers / L.B. Zhorniak, O.G. Volkova, M.A. Makohon // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 19–25. – Bibliography: 16. – ISSN 2079-3944.**

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

**Жорняк Людмила Борисівна** – доцент, кафедра електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Запоріжжя; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

**Жорняк Людмила Борисовна** – доцент, кафедра электрических и электронных аппаратов ЗНТУ, Запорожье; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

**Zhorniak Liudmila** – associate professor, Department of Electrical and Electronic Apparatus of ZNTU, Zaporozhye; e-mail: zporoton@zntu.edu.ua.

**Волкова Ольга Григорівна** – доцент, кафедра теоретичної і загальної електротехніки ЗНТУ, Запорожье; e-mail: volkova@zntu.edu.ua

**Волкова Ольга Григорьевна** – доцент, кафедра теоретической и общей электротехники ЗНТУ, Запорожье; e-mail: volkova@zntu.edu.ua.

**Volkova Olga** – Associate Professor, Department of Theoretical and Environmental Engineering of ZNTU, Zaporozhye; e-mail: volkova@zntu.edu.ua

**Макогон Михайло Андрійович** – студент, кафедра електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Запоріжжя.

**Макогон Михаил Андреевич** – студент, кафедра электрических и электронных аппаратов ЗНТУ, Запорожье.

**Makohon Mykhailo** – student, Department of Electrical and Electronic Apparatus of ZNTU, Zaporozhye.

УДК 621.3

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.К. СЛОЄВ

## СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОСУДУ, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ НА ІНДУКЦІЙНІЙ КУХОННІЙ ПЛИТІ

З використанням пакета програм EleFAnT2D, розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія, виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів в побутових індукційних плитах і посуді, що нагрівається. Розрахунок нестационарного температурного поля виконується у двовимірній постановці методом скінчених елементів з урахуванням процесу конвективного теплообміну з оточуючим середовищем.

**Ключові слова:** індукційна кухонна плита, теплове поле, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів.

С использованием пакета программ EleFAnT2D, разработанного в Институте основ и теории электротехники Технического университета г. Грац, Австрия, выполнено компьютерное моделирование тепловых процессов в бытовых индукционных плитах и нагреваемой посуде. Расчет нестационарного температурного поля выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов с учетом процесса конвективного теплообмена с окружающей средой.

**Ключевые слова:** индукционная кухонная плита, тепловое поле, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Using EleFAnT2D code developed at the Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria computer modeling of thermal processes in induction cookers and heated dishes is carried out. Transient temperature field calculation is carried out in 2D formulation by the Finite Element Method taking into account convective heat transfer with the environment.

**Index terms:** induction cooker, thermal field, computer simulation, the Finite Element Method

**Вступ.** В роботі [1] розроблено методику комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу у просторі та часі теплового поля індукційних кухонних плит і посуду, що нагрівається. Розрахунки доцільно виконувати з використанням програмних продуктів, що призначені для моделювання нестационарних теплових полів у двовимірній постановці. Чисельні дослідження теплових процесів в індукційних кухонних плитах і посуді розпочато під час переддипломної практики студентів кафедри «Електричні апарати» Електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ" в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія з використанням пакета програм EleFAnT2D [2], розробленого у зазначеному Інституті. Виконання розрахунків продовжується на кафедрі «Електричні апарати» Національного технічного університету «ХПІ» за допомогою вказаного програмного забезпечення, люб'язно наданого розробниками. В даній роботі описано та проаналізовано отримані попередні результати комп'ютерного моделювання, що демонструють область використання розробленої методики.

**Мета роботи** – апробація розробленої методики комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів теплових процесів в індукційних кухонних плитах, попередній аналіз отриманих чисельних результатів.

**Математична модель теплових процесів в індукційних плитах і посуді** детально описана в [1]. Чисельний аналіз розподілу теплового поля індукційної кухонної плити виконується у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів) у декартовій системі координат. Рівняння, що підлягає розв'язанню, записується наступним чином [1]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q, \quad (1)$$

де  $T$  – температура, що змінюється у просторі та у

часі;

$\lambda$  – теплопровідність матеріалу;

$\rho$  – щільність матеріалу;

$c_p$  – теплоємність матеріалу;

$Q$  – потужність внутрішніх джерел тепла.

У загальному випадку, величини  $\lambda$ ,  $\rho$  та  $c_p$  (теплофізичні властивості матеріалів) залежать від температури. Розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла)  $Q(x,y,t)$  у електропровідних елементах конструкції вважається відомим за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів  $J_e(x,y,t)$  [3]:

$$Q = \frac{|J_e|^2}{\gamma}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – питома електрична провідність матеріалу.

Нестационарне рівняння у часткових похідних (1) розв'язується за наступними початковими умовами [1]:

$$T(x,y,0) = T_0, \quad (3)$$

де  $T_0$  – початкове значення температури (при дослідженні нагріву посуду на індукційній кухонній плиті – кімнатна температура 20 °С, постійна по всьому перетину конструктивних елементів, що розглядаються).

Розподіл електромагнітного поля індукційної кухонної плити визначається [3, 4] стосовно її індукторної системи, що складається з наступних електропровідних та неелектропровідних елементів (рис. 1): тривитковий мідний індуктор; посуд, що нагрівається (алюмінієва сковорода з феромагнітним шаром); магнітопровід; діелектрик (повітря) Комп'ютерне моделювання теплового стану доцільно виконувати [1] у рамках єдиної обчислювальної процедури лише стосовно окремо кожного з електропровідних конструктивних елементів, а саме посуду та магнітопроводу, виключаючи з розгляду суттєві за об'ємом діелектричні підобласті. Це дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати, необхідні для комп'ютерного розв'язання задачі. Як і при розрахунках електромаг-

нітних процесів, доцільно врахувати умови геометричної симетрії конструкції, а також симетричного розподілу теплового поля в ній: віссю симетрії є вертикальна вісь ординат  $Oy$  (див. рис. 1), отже розрахунок виконується лише для половини кожного з конструктивних елементів, що розглядаються. Це теж дозволяє значно заощадити потрібні обчислювальні ресурси.

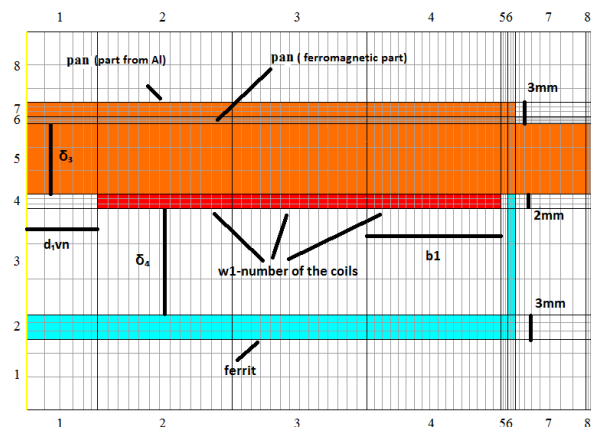


Рис. 1 – Розрахункова модель індукторної системи побутової індукційної плити

В даній роботі досліджувалось теплове поле саме посуду, що нагрівається. При цьому, рівняння (1) розв'язувалось з наступними граничними умовами:

• на вертикальній вісі ординат  $Oy$ : так звані природні граничні умови симетрії [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (4)$$

де  $n$  – зовнішня нормаль до вісі ординат  $Oy$ , отже умови (4) приймають вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

• на усіх інших границях посуду: граничні умови третього роду [1], що описують конвективний теплообмін електропровідної поверхні з оточуючим простором:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\infty}), \quad (6)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу відповідної електропровідної поверхні;

$n$  – зовнішня нормаль до поверхні, що розглядається;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну з зовнішнім середовищем (у вихідних даних задавалось  $\alpha = 20 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$  – природній конвективний теплообмін із нерухомим повітрям навколо посуду);

$T_{\infty}$  – температура зовнішнього середовища (приймалась рівною  $20^{\circ}\text{C}$  для нерухомого повітря).

У зв'язку з відносно невеликою температурою посуду, що нагрівається (не вище  $280^{\circ}\text{C}$ ), залежності теплофізичних властивостей матеріалів  $\lambda$ ,  $\rho$  та  $c_p$  не враховувались.

#### Результати розрахунків і їх попередній аналіз.

Розрахунки виконувались за допомогою програмного комплексу EleFAnT2D [2], розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія. Отримані чисельні результати проілюструємо на прикладі сталого у часі розподілу

температури сковороди (рис. 2), що нагрівається на індукційній плиті з параметрами (див. рис. 1)  $w_1=3$ ,  $d_{1vn}=2$  мм,  $b_1=16$  мм,  $\delta_3=2$  мм,  $\delta_4=2$  мм. Частота струму в індукторі – 20 кГц.

Як свідчить рис. 2, просторовий розподіл температури у перетині сковороди, що нагрівається, носить достатньо рівномірний характер, що свідчить про вдалий вибір режиму роботи індукційної кухонної плити. Подальші висновки щодо впливу частоти струму в індукторі та геометричних параметрів індукторної системи на процес нагріву посуду можуть бути зроблені за результатами багатоваріантних розрахунків розподілу електромагнітного та теплового полів.

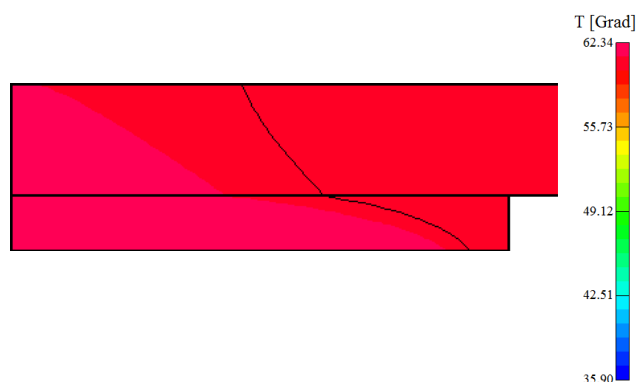


Рис. 2 – Просторовий розподіл температури нагрітого посуду

**Висновки.** З використанням розробленої раніше методики виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів у посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті. Детальний аналіз отриманих чисельних результатів буде виконаний у наступних роботах.

#### Список літератури

1. Пантелет М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоелементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.
2. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
3. Пантелет М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
4. Пантелет М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоелементний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36.

#### References (transliterated)

1. Pantelet M.G., Trofimov A.V. Finite Element Analysis of the Heat Condition of an Induction Cooker and Heated Cookware. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2015. – No 13 (1122). – С. 36-44.
2. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
3. Pantelet M.G., Gurentsov Yu.V. Method of computer simulation by the finite element distribution of the electromotor field of an induction cooker. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2014. – No 41 (1084). – С. 16-24.
4. Pantelet M.G., Gurentsov Yu.V. Finite element analysis of the distribution of the electromagnetic field of the induction cooker. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2016. – No 32 (1204). – С. 32-36.

Надійшла до редколегії 02.10.17

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Скінченоелементний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті / М.Г. Пантелят, А.К. Єлоєв // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26–28. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Конечноэлементный анализ распределения температурного поля посуды, нагреваемой на индукционной кухонной плите / М.Г. Пантелят, А.К. Елоев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26–28. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.**

**FE analysis of the temperature field distribution of dishes heated on the induction cooker / M.G. Pantelyat, A.K. Yeloyev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 26–28. – Bibliography: 16. – ISSN 2079-3944.**

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

**Пантелят Михайло Гаррійович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; e-mail: m150462@yahoo.com.

**Пантелят Михаил Гарриевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электрические аппараты, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", м. Харьков; e-mail: m150462@yahoo.com.

**Pantelyat Michael Garrievich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, PhD in electrical equipment, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; e-mail: m150462@yahoo.com.

**Єлоєв Алан Казбекович** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"; м. Харків.

**Елоев Алан Казбекович** – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков.

**Yeloyev Alan Kazbekovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В. Ф. БОЛЮХ, А. И. КОЧЕРГА

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ИНДУКЦИОННОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПОВ**

Визначено характер розподілення індукції магнітного поля у лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах (ЛЕП) індукційного та електромагнітного типів при використанні для ферромагнітного якоря та екрану реальної сталі, магнітодіелектрика та ідеальної сталі, що мають нульову електропровідність. Встановлено вплив видів ферромагнітних матеріалів на їх електромеханічні характеристики. Запропоновано інтегральний показник ефективності, який враховує ККД, швидкісні, силові та електричні показники ЛЕП, та варіанти стратегії оцінки ефективності. Показано, що за усіма варіантами стратегії найменш ефективним є ЛЕП електромагнітного типу, якорь та ферромагнітний екран (ФЕ) якого виконані з магнітодіелектрика. Встановлено, що ФЕ ЛЕП індукційного типу доцільно виготовляти з реальної сталі, а ФЕ та якорь ЛЕП електромагнітного типу доцільно виготовляти з ідеальної сталі, що має мінімальну електропровідність.

**Ключові слова:** лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, перетворювач індукційного типу, перетворювач електромагнітного типу, ферромагнетик, реальна сталь, магнітодіелектрик, ідеальна сталь.

Установлен характер распределения индукции магнитного поля в линейных импульсных электромеханических преобразователях (ЛИЭП) индукционного и электромагнитного типов при использовании для ферромагнитного якоря и экрана реальной стали, магнитодиэлектрика и идеальной стали, которые имеют нулевую электропроводность. Установлено влияние видов ферромагнитных материалов на их электромеханические характеристики. Предложены интегральный показатель эффективности, учитывающий КПД, скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП, и варианты стратегии оценки эффективности. Показано, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ферромагнитный экран (ФЭ) которого выполнены из магнитодиэлектрика. Установлено, что ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали, а ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

**Ключевые слова:** линейный импульсный электромеханический преобразователь, преобразователь индукционного типа, преобразователь электромагнитного типа, ферромагнетик, реальная сталь, магнитодиэлектрик, идеальная сталь.

**Purpose.** The aim of the article is to estimate the influence of the type of ferromagnet - magnetodielectric, ideal and real steel, on the power, speed and electrical parameters of the linear pulsed electromechanical converter (LPEC) of induction and electromagnetic types. **Methodology.** The mathematical model of LSET using the finite element method, which takes into account spatio-temporal electromagnetic and electromechanical parameters and indices, is developed and implemented in the Comsol Multiphysics software package. The integral efficiency index has been introduced, taking into account the power, speed, energy, and environmental (induction of the magnetic scattering field) indicators. **Results.** A mathematical model of the LPEC has been developed, which describes fast and interconnected electromagnetic and electromechanical processes, manifested when the armature moves relative to the inductor. The character of the magnetic field induction distribution in LPEC of induction and electromagnetic types is established when using for a ferromagnetic anchor and a screen of real steel, a magnetodielectric and an ideal steel that have zero electrical conductivity. For these LPEC versions, the influence of the types of ferromagnetic materials on their electromechanical characteristics has been established. An integral efficiency index is proposed that takes into account the efficiency, speed, power and electrical parameters of the LPEC, and variants of the efficiency evaluation strategy. It is shown that for all strategy options the least effective is the LPEC of electromagnetic type, the armature and screen of which are made of a magnetodielectric. It is established that the induction-type LPEC screen should be made of real steel, and the screen and the electromagnetic-type LPEC anchor should be made of an ideal steel that has a minimum electrical conductivity. **Originality.** It was established for the first time that the least effective is a LPEC of electromagnetic type, the armature and screen of which are made of a magnetodielectric. Ferromagnetic screen LPEC induction type is expedient to make of real steel, and the shield and the anchor of LPEC electromagnetic type is expediently made of an ideal steel that has a minimum electrical conductivity. **Practical value.** The character of the magnetic field induction distribution in LPEC of induction and electromagnetic types is established when using for a ferromagnetic anchor and a screen of real steel, a magnetodielectric and an ideal steel that have zero electrical conductivity. For these LPEC versions, the influence of the types of ferromagnetic materials on their electromechanical characteristics has been established. An integral efficiency index is proposed that takes into account the efficiency, speed, power and electrical parameters of the LPEC, and variants of the efficiency evaluation strategy.

**Keywords:** Linear pulsed electromechanical converter, converter of induction type, converter of electromagnetic type, ferromagnet, real steel, magnetodielectric, ideal steel.

**Введение.** Одними из перспективных устройств современной электромеханики являются линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП), которые обеспечивают высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке, и/или создают мощные силовые импульсы при незначительном его перемещении. ЛИЭП используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей, ударно-силовых устройств и исполнительных узлов различных устройств и приборов [1 - 6].

Особенностью рассматриваемых ЛИЭП является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Наиболее широко

применяются ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, имеющие коаксиальную конфигурацию [5]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). В указанных типах ЛИЭП основное отличие состоит в конструкции подвижного якоря, который обеспечивает разгон ИЭ.

В ЛИЭП индукционного типа массивный электропроводящий якорь представляет собой относительно тонкий медный диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электромагнитного типа

ферромагнітний якорь представляє собою відносно толстостінний сталевий диск, на який діє електромагнітна сила притягання з боку індуктора. Ураховуючи значительну індукцію магнітних полів, в ЛІЕП цілком доцільно використовувати зовнішній ферромагнітний екран (ФЭ) [7]. Як правило, вказаний екран збільшує індукцію магнітного поля в активній зоні ЛІЕП, підвищує його електро механічні показники, зменшує величину струму в індукторі, що важливо для електронної системи збудження, і зменшує індукцію магнітного поля розсіяння в оточуючому просторі, що важливо для близько розташованих електронних пристроїв і обслуговуючого персоналу [8].

Однак при цьому виникає питання про виборі виду ферромагнетика для ферромагнітного екрана в обох типах преобразувачів, а також для якоря в ЛІЕП електромагнітного типу.

В якості основних видів ферромагнетиків розглянемо реальну сталь, магнітодіелектрик і ідеальну сталь. Будемо полагати, що і реальна і ідеальна сталі мають однакову криву намагнічування. Але при цьому реальна сталь має визначену електропровідність, а в ідеальній сталі вона дорівнює нулю. Звернемо увагу, що низьку електропровідність ідеальної сталі можна забезпечити, наприклад, шляхом створення спеціальних радіальних розрізів, перешкоджають протіканню індукційованих вихревих струмів [9]. В якості магнітодіелектрика використовуємо феррит, що володіє відмінними від сталі кривою намагнічування і нульовою електропровідністю. В якості реальної і ідеальної сталі вибираємо Ст10, а в якості магнітодіелектрика – феррит 6000НМ.

Задача вибору виду ферромагнетика для ЛІЕП індукційного і електромагнітного типів є актуальною. Ферромагнетик впливає на електро механічні характеристики, магнітні поля розсіяння, електричні, силові і швидкісні показники ЛІЕП. Все це не дозволяє комплексно оцінити ефективність того чи іншого виду ферромагнітного матеріалу для ЛІЕП розглянутих типів.

**Цілью статті** є оцінка впливу виду ферромагнетика – магнітодіелектрика, ідеальної і реальної сталі, на силові, швидкісні і електричні показники ЛІЕП індукційного і електромагнітного типів.

**Математична модель.** В ЛІЕП при збудженні від ЕНЭ виникають швидкоплинні і взаємопов'язані електромагнітні і електро механічні процеси, що проявляються при переміщенні якоря відносно нерухомого індуктора. Реалізація математичної моделі ЛІЕП з використанням теорії електричних контурів не дозволяє в повній мірі описати сукупність просторово-часових процесів [10, 11]. Виходячи з цього, використовується математична модель ЛІЕП, що ґрунтується на методі кінцевих елементів.

Оскільки розглядаються ЛІЕП мають осеву симетрію, то доцільно використовувати двовимірну математичну модель з просторово-розподіленими параметрами [3].

Для визначення електромагнітних параметрів ЛІЕП в циліндричній системі координат  $\{r, z\}$  розраховується векторний магнітний потенціал  $A$  з урахуванням:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

де  $\mu(B)$  – магнітна проникність, що залежить від індукції магнітного поля  $B$  ферромагнетика;

$\sigma$  – електропровідність якоря і індуктора.

Складові вектора магнітної індукції наводяться по відомим співвідношенням:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \quad B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Граничними умовами системи виступає рівняння  $n \times A = 0$ , де  $n$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні. Для ферромагнетиків використовується нелінійна крива намагнічування  $B = f(H)$ .

Струм в індукторі  $i_1$  описується рівнянням:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = 0; \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0,$$

де  $R_e$  – активне опір зовнішньої ланки;

$R_1$  – активне опір індуктора;

$L_e$  – індуктивність зовнішньої ланки;

$U_0$  – напруга заряду ЕНЭ;

$C$  – ємність ЕНЭ;

$N_1$  – кількість витків індуктора;

$s$  – площа поперечного перерізу індуктора, пронизувана магнітним потоком;

$A_l$  – проекція векторного магнітного потенціалу на напрямлення обходу контуру;

$V$  – об'єм індуктора.

Електро динамічні в ЛІЕП індукційного типу або електромагнітні в ЛІЕП електромагнітного типу сили, що діють на якорь, визначаються з використанням тензора натяження Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

де  $S$  – площа, що обмежує поперечний переріз якоря;

$n$  – одиничний вектор нормалі до поверхні якоря.

Імпульс сили, що визначає силову дію на якорь з боку індуктора, описується виразом:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

Швидкість  $V_z$  якоря з ІЭ вздовж осі  $z$  описується рівнянням [3]:

$$(m_2 + m_e) \frac{dv_z}{dt} = f_z(z) - k_p \Delta z(t) - k_T V_z(t) -$$

$$-0,125\pi\gamma_a\beta_a D_{ex2}^2 v_z^2(t), \quad (6)$$

где  $m_2$  - масса якоря;

$m_e$  - масса ИЭ;

$k_p$  - коэффициент упругости буферного элемента;

$k_T$  - коэффициент динамического сопротивления;

$\gamma_a$  - плотность воздуха;

$\beta_a$  - коэффициент аэродинамического сопротивления среды перемещения якоря;

$D_{ex2}$  - внешний диаметр якоря;

$\Delta z$  - величина перемещения якоря.

Система уравнений (1) – (6) описывает электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: напряжение ЕНЭ  $u_c(0)=U_0$ ;  $i_1(0)=0$ ;  $\Delta z(0)=0$ ;  $V_z(0)=0$ , где.

При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещение якоря относительно индуктора. Пренебрегаем сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также считаем обратный диод, формирующий аperiодический импульс тока в индукторе, идеальным.

Решение системы уравнений (1) – (6) получаем с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка.

Для решения поставленной задачи была разработана расчетная компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, которая позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [12].

Моделирование электрических процессов осуществлялось физическими модулями «Electrical circuit», который рассчитывал переходные электрические процессы, и «Magnetic fields», который рассчитывал параметры ЛИЭП на основе магнитного поля с учетом перемещения электропроводящего якоря. Моделирование магнитных процессов также осуществлялось физическим модулем «Magnetic fields», в котором электромагнитный процесс описывается системой дифференциальных уравнений для каждого узла сеточного разбиения.

Математическая модель ЛИЭП реализуется в следующей последовательности:

– выбираются физические задачи «Magnetic fields» и «Electrical circuit», размерность задачи  $2D$ , тип модели *time-dependent* и метод расчета;

– формируется геометрия ЛИЭП и определяются расчетные области физических задач;

– задаются исходные данные в виде величин и функций, описывающих взаимосвязи между параметрами, например, кривая намагничивания ферромагнитного материала;

– задаются начальные и граничные условия рассматриваемых физических задач;

– выполняется дискретизация расчетных областей с учетом геометрической модели ЛИЭП;

– выбирается метод решения *PARDISO* и проводятся численные расчеты.

Решение мультифизической математической модели ЛИЭП производится методом *BDF* (*backward differentiation formula*) или методом *Generalized alpha* с плавающим шагом и ограничениями по времени. Это обусловлено изменением величины погрешности расчета в зависимости от выбранного шага. Решение задачи начинается с шага по времени на 6 порядков меньше, чем максимально установленный шаг. Этот шаг автоматически варьируется в зависимости от условий сходимости и показателей относительной погрешности полученных решений.

**Основные параметры ЛИЭП.** Рассмотрим ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов с одинаковыми габаритными размерами. Указанные ЛИЭП имеют коаксиальную конфигурацию и содержат ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и наружной боковых сторон [7]. Якорь выполнен в форме плоского диска, одна из сторон которого обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Основные параметры ЛИЭП:

**Индуктор:** внешний диаметр  $D_{ex1}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in1}=10$  мм, высота  $H_1 = 10$  мм, сечение медной шины  $a \times b = 1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup>, количество витков шины  $N=46$  шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами;

**ФЭ:** высота дискового основания  $H_{3a}=8$  мм, внешний диаметр обечайки  $D_{ex3b}=118$  мм, внутренний диаметр обечайки  $D_{in3b}=102$  мм;

**ИЭ:** масса  $m_e=0,5$  кг;

Рабочий ход якоря – 10 мм;

**ЕНЭ:** емкость  $C=2850$  мкФ, напряжение заряда  $U_0=400$  В.

Возбуждение индуктора ЛИЭП осуществляется от ЕНЭ аperiодическим импульсом, что позволяет использовать полярные конденсаторы. Для создания такого импульса индуктор шунтирован обратным диодом [3].

Магнитное поле рассеяния, создаваемое ЛИЭП, будем оценивать при помощи усредненного значения индукции магнитного поля  $B_{ex}$  на контуре, расположенном на расстоянии  $2H_1$  от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии  $4H_1$  от верхней стороны индуктора.

**Базовый вариант ЛИЭП.** В качестве базового варианта используем ЛИЭП индукционного типа без ФЭ, у которого якорь, выполненный в виде массивного диска из технической меди, имеет следующие параметры: внешний диаметр  $D_{ex2}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2}=6$  мм, высота  $H_2=2,5$  мм. Начальное расстояние между индуктором и якорем  $\Delta z_0=1$  мм.

На рис. 1 представлены распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе и электромеханические характеристики базового варианта ЛИЭП. Плотность тока в индукторе  $j_1$  имеет характер полярного импульса.

Плотность индуцированного тока в якоре  $j_2$  также имеет импульсный характер, которая в первоначальный момент времени противоположна плотности тока индуктора. Но через определенный

момент времени (примерно через 2 мс) индуцированный ток якоря меняет полярность.

Вследствие этого электродинамическая сила  $f_z$ , действующая на якорь, через указанное время меняет характер воздействия: отталкивание сменяется притяжением, хотя и многократно меньшей величины. Заметим, что перемещение якоря с ИЭ под действием электродинамической силы отталкивания начинается примерно через 0,25 мс после начала процесса возбуждения индуктора.

**ЛИЭП индукционного типа с ФЭ.** Рассмотрим влияние указанного выше вида ферромагнетика для ФЭ на электрохимические показатели ЛИЭП индукционного типа. На рис. 2 представлена половина общего вида ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, у которого якорь переместился относительно индуктора.

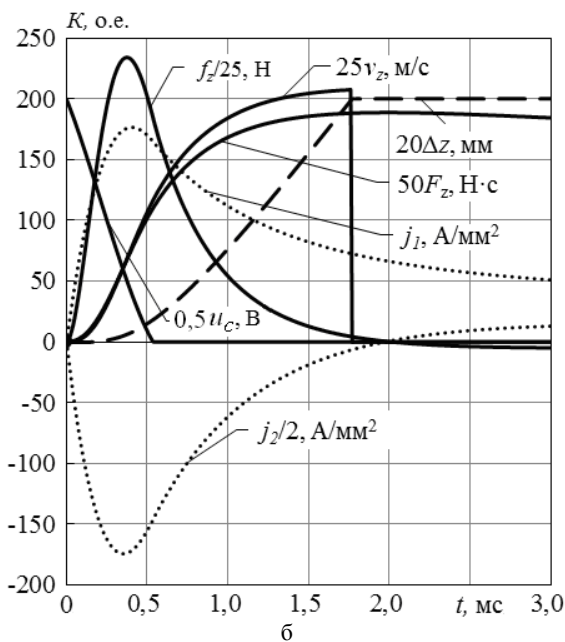
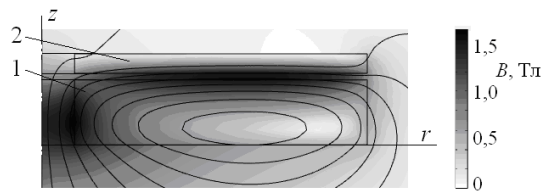


Рис. 1 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электрохимические характеристики (б) базового варианта ЛИЭП: 1 – индуктор, 2 – якорь

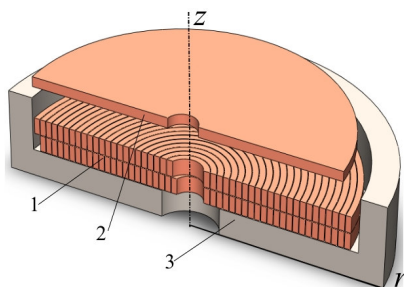


Рис. 2 – ЛИЭП индукционного типа с ФЭ

Во всех последующих рисунках выполнены единые обозначения: 1 – индуктор, 2 – электропроводящий якорь, 3 – ФЭ.

Данный преобразователь имеет такие же параметры якоря, как и у базового варианта ЛИЭП, но дополнительно содержит ФЭ, высота обечайки которого  $H_{3б}=24$  мм.

Если ФЭ выполнен из реальной стали, то индуцированные в нем вихревые токи препятствуют проникновению в его массив магнитного поля (рис. 3, а).

По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП ФЭ, выполненный из реальной стали, многократно (практически в 43 раза) снижает величину индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$ . Однако при этом величина максимальной плотности тока в индукторе уменьшается на 4,7%, а в якорь – на 13,4%. Вследствие этого, величина электродинамической силы  $f_z$ , действующей на якорь, уменьшается на 7,2 %, а средняя скорость якоря на участке перемещения снижается на 3,5 %. Указанно снижение рабочих показателей объясняется размагничивающим воздействием, которое оказывают индуцированные в ФЭ вихревые токи на магнитное поле в активной зоне ЛИЭП.

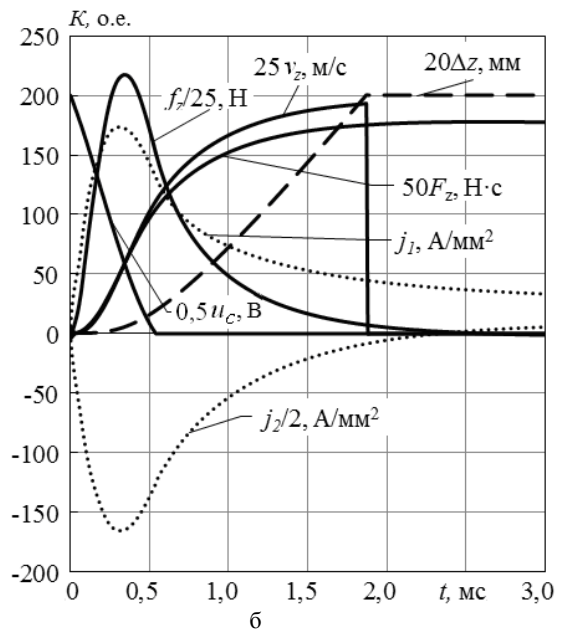
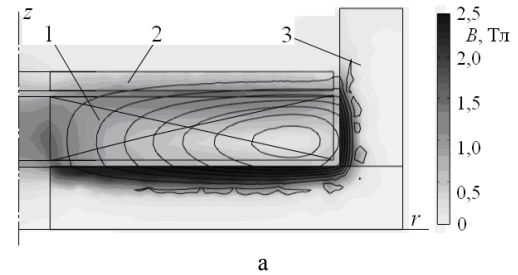


Рис. 3 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электрохимические характеристики (б) ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненным из реальной стали

При использовании магнитодиэлектрика и идеальной стали в качестве ферромагнетика для ФЭ основные электрохимические характеристики имеют практически такой же вид, как при использовании



реальной стали. Но характер распределения магнитного поля при этом меняется (рис. 4).

При использовании идеальной стали магнитное поле практически полностью концентрируется в ФЭ, а максимальная величина индукции магнитного поля достигает 2,5 Тл. При использовании магнетодиэлектрика магнитное поле выходит за наружную поверхность ФЭ, а максимальная величина индукции магнитного поля не превышает 1,5 Тл.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненным из идеальной стали, величина индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  снижается существенно – в 10,4 раза, а в ЛИЭП с ФЭ, выполненным из магнетодиэлектрика, величина индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  снижается слабее – в 1,4 раза.

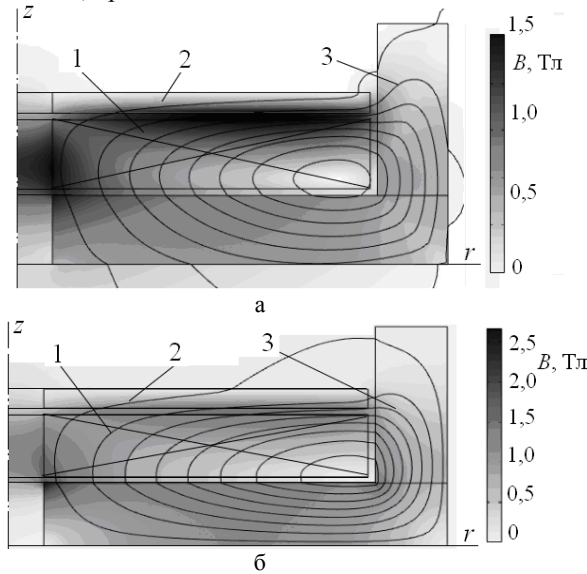


Рис. 4 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненного из магнетодиэлектрика (а) и идеальной стали (б)

В обоих вариантах величина плотности тока в индукторе снижается по сравнению с базовым вариантом: при использовании ФЭ из магнетодиэлектрика незначительно – на 9,3 %, а при использовании ФЭ из идеальной стали значительно – на 32,6 %.

По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП ФЭ увеличивает как величину импульса электродинамической силы  $F_z$ , так и скорость якоря с ИЭ  $V_z$ . Если ФЭ изготовлен из магнетодиэлектрика, то импульс силы  $F_z$  возрастает на 13,2%, а скорость  $V_z$  – на 9%. Если ФЭ изготовлен из идеальной стали, то импульс силы  $F_z$  возрастает на 23%, а скорость  $V_z$  – на 13 %.

**ЛИЭП электромагнитного типа.** Рассмотрим ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитный якорь имеет следующие параметры: внешний диаметр  $D_{ex2}=118$  мм, внутренний диаметр  $D_{in2}=0$  мм, высота  $H_2=5$  мм. Начальное расстояние между индуктором и якорем  $\Delta z_0=10$  мм. Именно эта величина формирует рабочий ход якоря. Высота обечайки ФЭ  $H_{3b}=21$  мм (рис. 5). Будем рассматривать ЛИЭП, у которого и якорь и экран выполнены из одинакового ферромагнетика.

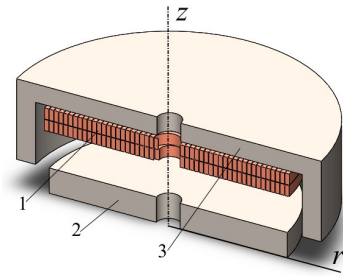


Рис. 5 – ЛИЭП электромагнитного типа

В ЛИЭП электромагнитного типа при изготовлении якоря и ФЭ из реальной стали магнитное поле проникает только в ту часть, которая обращена к индуктору (рис. 6, а). В этих областях индуцируются вихревые токи, которые экранирует проникновение магнитного поля в массив якоря и ФЭ.

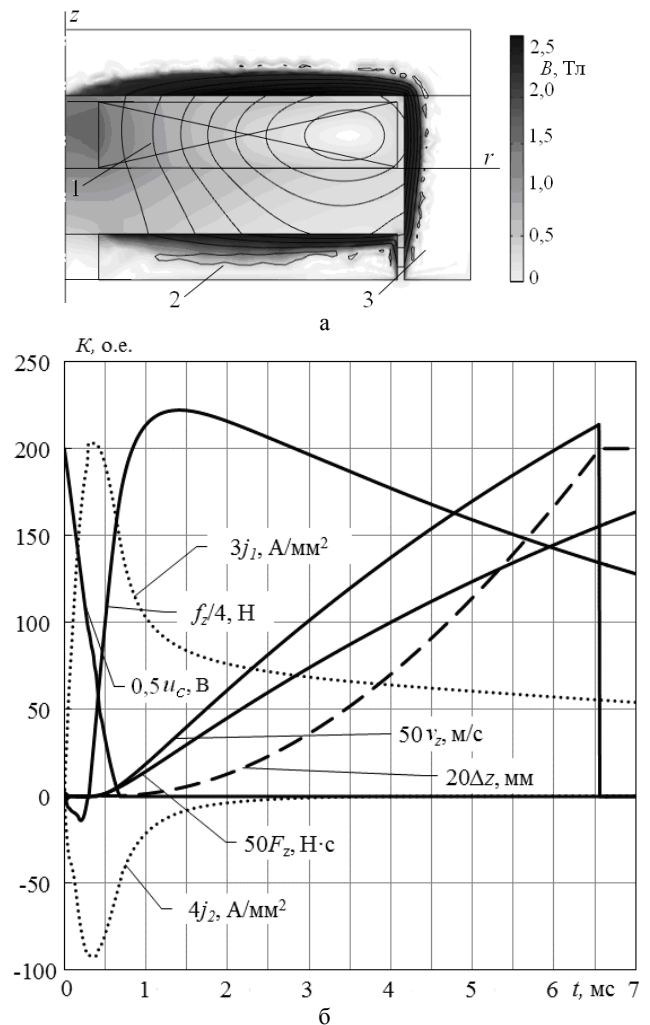


Рис. 6 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из реальной стали

Индукцированные токи в якорь, помимо препятствования проникновению магнитного поля в его массив, приводят к возникновению электродинамической силы отталкивания в начальный момент. Эта сила противоположна силе электромагнитного притягивания и является нежелательной. На рис. 6, б показана плотность тока, индуцированного в якорь  $j_2$ , которая затухает примерно до момента времени 2,5 мс, в то

время как плотность тока в индукторе  $j_1$  действует и после 6,5 мс, когда якорь совершает соударение с индуктором.

В целом электромеханические процессы в ЛИЭП электромагнитного типа существенно более продолжительные, чем в ЛИЭП индукционного типа. Причем, из-за наличия тормозной (отрицательной) электродинамической силы, действующей на ферромагнитный якорь, его перемещение начинается примерно через 1 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из реальной стали, максимальное значение плотности тока в индукторе уменьшается на 74,5 %, а максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается в 14,3 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы уменьшается намного меньше – на 24,2 %. Из-за большей массы и меньшего импульса силы скорость якоря уменьшается в 2,6 раз по сравнению с базовым вариантом ЛИЭП.

Достоинством данного преобразователя является то, что по сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  снижается значительно – в 17,8 раз.

При выполнении якоря и ФЭ из магнетодиэлектрика распределение магнитных полей и электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного типа претерпевают определенные изменения (рис. 7).

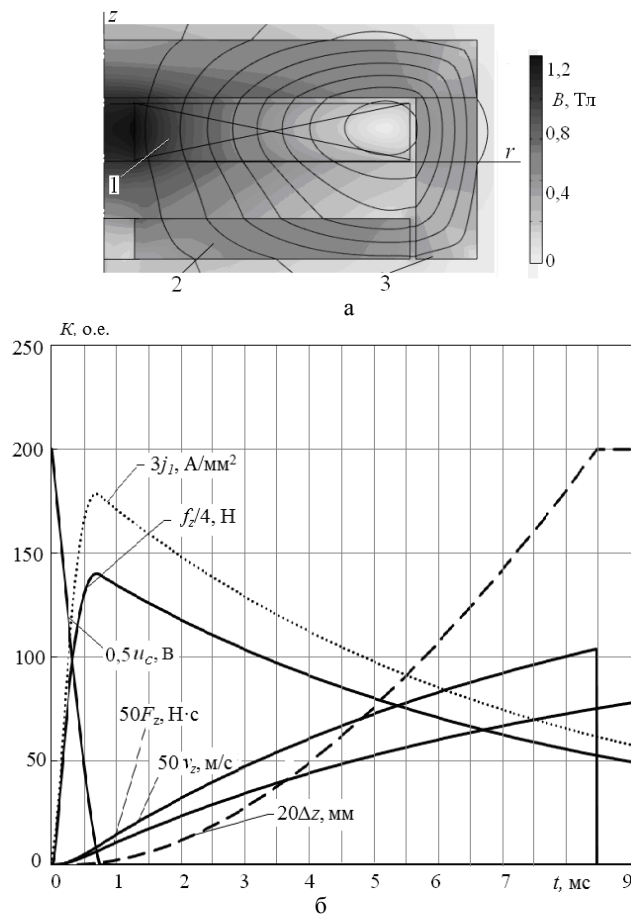


Рис. 7 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из магнетодиэлектрика

Величина индукции магнитного поля уменьшается по сравнению с рассмотренным выше вариантом. Это поле проникает во весь объем ферромагнитных элементов. Причем значительная его часть рассеивается в окружающее пространство. По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  снижается лишь в 4,8 раза.

Электромагнитная сила притяжения в данном преобразователе не меняет своей полярности и возрастает с самого начала процесса возбуждения индуктора. Вследствие этого перемещение якоря начинается раньше – примерно через 0,6 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из магнетодиэлектрика, плотность тока в индукторе уменьшается почти в 2 раза, а максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается значительно – в 20,8 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы уменьшается только в 2,1 раз. Из-за большей массы и меньшего импульса силы скорость якоря уменьшается почти в 3 раза.

При выполнении якоря и ФЭ из идеальной стали распределение магнитных полей и электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного типа изменяются следующим образом (рис. 8).

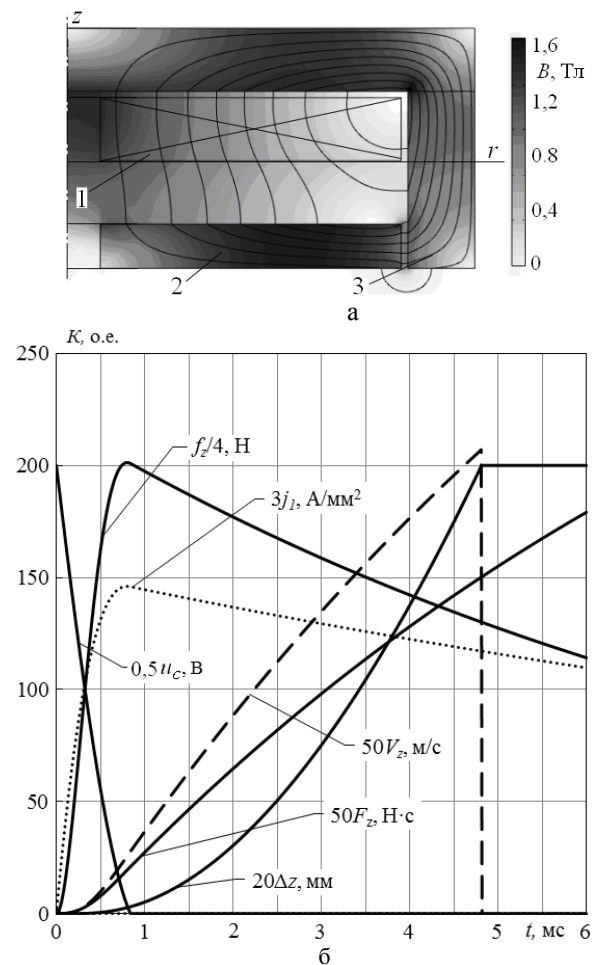


Рис. 8 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из идеальной стали

Величина индукции магнитного поля увеличивается по сравнению с вариантом выполнения ферромагнитных элементов из магнитодиэлектрика. Это поле проникает во весь объем ферромагнитных элементов, концентрируясь с ними, и существенно меньше рассеивается в окружающее пространство. По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  снижается значительно – в 13,5 раз.

Электромагнитная сила притяжения возрастает и не меняет своей полярности, вследствие этого перемещение якоря начинается ранее, чем у рассмотренных выше вариантов – примерно через 0,5 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из идеальной стали, плотность тока в индукторе уменьшается почти в 3,6 раз, максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается в 8 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы увеличивается на 35,4 %. Однако из-за большей массы скорость якоря уменьшается почти в 2,3 раза.

Таким образом, можно отметить более сильное влияние ферромагнетиков на показатели ЛИЭП электромагнитного типа по сравнению с ЛИЭП индукционного типа. Однако в целом сложно отдать предпочтение тому или иному виду ферромагнетика из-за его различного влияния на основные показатели ЛИЭП.

Оценка эффективности видов ферромагнетиков для ЛИЭП. Для оценки применения различных видов ферромагнетиков для ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, используем интегральный показатель эффективности  $K^*$  [13]. Этот показатель в относительном виде учитывает КПД  $\eta = (m_2 + m_e) V_m^2 C^{-1} U_0^{-2}$  [3], скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП:

$$K^* = \alpha_1 \cdot \eta^* + \alpha_2 \cdot V_m^* + \alpha_3 \cdot F_z^* + \alpha_4 \cdot (I_{1m}^*)^{-1}, \quad (7)$$

где  $I_{1m}$  – максимальный ток в индукторе,  
 $V_m$  – максимальное значение скорости якоря с ИЭ,

$\alpha_j$  – весовые коэффициенты соответствующих показателей ЛИЭП, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{j=1}^4 \alpha_j = 1 \quad (8)$$

Все показатели ЛИЭП нормированы относительно базового варианта и отмечены звездочками. Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП, которые представлены в табл. 1. Приоритетность показателя ЛИЭП оценивается величиной соответствующего весового коэффициента  $\alpha_j$ .

Таблица 1 – Варианты стратегий оценки эффективности ЛИЭП

Весовые коэффициенты	Варианты стратегий				
	I	II	III	IV	V
$\alpha_1$	0,25	0,55	0,15	0,15	0,15
$\alpha_2$	0,25	0,15	0,55	0,15	0,15
$\alpha_3$	0,25	0,15	0,15	0,55	0,15
$\alpha_4$	0,25	0,15	0,15	0,15	0,55

В варианте стратегии оценки эффективности ЛИЭП I используются одинаковые приоритеты для КПД, максимальных значений скорости якоря с ИЭ, импульса силы и величины тока в индукторе. В варианте II наивысший приоритет отдан КПД преобразователя, в варианте III – максимальной скорости якоря, в варианте IV – максимальному импульсу силы, а в варианте V – минимальной величине тока в индукторе.

В табл. 2 представлены значения интегрального показателя эффективности для следующих вариантов преобразователей: ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого выполнен из реальной стали (1), из магнитодиэлектрика (2) и из идеальной стали (3); ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из реальной стали (4), из магнитодиэлектрика (5) и из идеальной стали (6).

Таблица 2 – Значения интегрального показателя эффективности ЛИЭП, о.е.

Варианты ЛИЭП	Варианты стратегий				
	I	II	III	IV	V
1	1.061	0.983	1.023	1.192	1.046
2	1.001	1.028	0.972	1.008	0.994
3	0.975	0.994	0.919	0.979	1.010
4	0.783	0.550	0.623	0.792	1.167
5	0.437	0.287	0.343	0.376	0.742
6	1.158	0.807	0.836	1.128	1.860

Необходимо отметить, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из магнитодиэлектрика.

Наиболее эффективными ЛИЭП являются:

- по варианту стратегии I с одинаковым приоритетом рассматриваемых показателей является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из идеальной стали;
- по варианту стратегии II с наивысшим приоритетом КПД – ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого выполнен из магнитодиэлектрика;
- по вариантам III и IV с наивысшими приоритетами для скорости якоря и действующего на него импульса силы – ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого изготовлен из реальной стали;
- по варианту стратегии V с наивысшим приоритетом тока в индукторе – ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из идеальной стали.

Таким образом, анализируя полученные интегральные показатели эффективности можно сделать следующие выводы:

- ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали. Причем такой экран является наиболее технологичным и конструктивным;
- ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

**Выводы.** Разработана математическая модель ЛИЭП, описывающая быстропротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря

относительно индуктора, который возбуждается от ЕНЭ.

Установлен характер распределения индукции магнитного поля в ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов при использовании для ферромагнитного якоря и экрана реальной стали, магнитодиэлектрика и идеальной стали, которые имеют нулевую электропроводность.

Для указанных исполнений ЛИЭП установлено влияние видов ферромагнитных материалов на их электромеханические характеристики.

Предложены интегральный показатель эффективности, учитывающий КПД, скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП, и варианты стратегии оценки эффективности.

Показано, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из магнитодиэлектрика.

Установлено, что ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали, а ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

#### Список литературы

1. Balicki A. Improved performance of linear induction launchers / A. Balicki, Z. Zabar, L. Birenbaum // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171–175.
2. Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315–3318.
3. Bolyukh V.F. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82. – № 2. – P. 104–110.
4. Young-woo J. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD / J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won // *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*. – 10-13 June 2013. – Stockholm. – Paper 608.
5. Болюх В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
6. Bolyukh V., Omelchenko A., Vinnichenko A. A ballistic laser gravimeter for a symmetrical measurement method with the inductive-dynamic catapult and auto-seismic vibration preventing // *Proceedings 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM-2016)*. – State Research Center of the Russian Federation. – Saint Petersburg, Russian Federation. – 12-15 April 2016. Code 121590. – 2016. – P. 113–118.
7. Bolyukh V.F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // *Russian Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 86. – № 7. – P. 425–431.
8. Болюх В.Ф. Многокритериальный выбор параметров наружного экрана линейного импульсного электромеханического преобразователя / В.Ф. Болюх, А.И. Кочерга, И.С. Щукин // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. – № 25 (101). – С. 106–116.
9. Болюх В.Ф. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2015. – № 13 (1122). – С.45–60.
10. Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C.S. Koh // *14<sup>th</sup> biennial IEEE*

conference on electromagnetic field computation, digital object identifier. – 2010. – P. 1–9.

11. Lim D.K. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method / D.K. Lim, D.K. Woo, I.W. Kim // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49. – № 12. – P. 5749–5755.
12. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
13. Bolyukh V.F. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters / V.F. Bolyukh, L.I. Lysenko, E.G. Bolyukh // *Russian Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1–11.

#### References (transliterated)

1. Balicki A. Zabar Z., Birenbaum L. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
2. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, vol. 48, no.11, pp. 3315–3318.
3. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian Electrical Engineering*. 2011, vol. 82, no. 2, pp. 104–110.
4. Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*. 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608.
5. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46–48.
6. Bolyukh V., Omelchenko A., Vinnichenko A. A ballistic laser gravimeter for a symmetrical measurement method with the inductive-dynamic catapult and auto-seismic vibration preventing // *Proceedings 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM-2016)*. – State Research Center of the Russian Federation. – Saint Petersburg, Russian Federation. – 12-15 April 2016. Code 121590. – 2016. – P. 113–118.
7. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425–431.
8. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Shchukin I.S. Mnogokriterial'nyy vybor parametrov naruzhnogo ekrana lineynogo impul'snogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya [Multicriteria selection of the parameters of the external screen of a linear pulse electromechanical converter] *Electrical and computer systems*, 2017, no 25 (101), pp. 106 – 116.
9. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. Vliyaniye chisla radial'nykh razrezov ferromagnitnogo ekrana na pokazateli lineynogo induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya [Influence of the number of radial sections of a ferromagnetic screen on the indices of a linear induction-dynamic converter] *Vistnyk NTU "KPI": Problems of improving electric tricycles and machines. theory and practice*, 2015, No 13 (1122). – P. 45–60.
10. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*. 2010, pp. 1–9.
11. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749–5755.
12. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
13. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1–11.

Поступила (received) 01.10.2017

**Ефективність використання різних видів ферромагнетиків у лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах індукційного та електромагнітного типів / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 29–37. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Эффективность использования различных видов ферромагнетиков в линейных импульсных электромеханических преобразователях индукционного и электромагнитного типов / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 29–37. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Efficiency of use of various types of ferromagnets in linear pulse electromechanical converters of induction and electromagnetic types / V.F., Bolyukh, A.S. Kocherga // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 29–37. – Bibliography: 13. – ISSN 2079-3944.**

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

**Болюх Володимир Федорович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Болюх Владимир Федорович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Bolyukh Vladimir Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of chair of General Electrical Engineering, tel. +38 (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Кочерга Олександр Іванович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

**Кочерга Александр Иванович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри общей електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

**Kocherga Aleksandr Ivanovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department "General Electrical Engineering", tel. +38 (057)707-64-27, e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

УДК 519.2

Л.П. ГАЛАЙКО

**АНАЛИЗ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА**

Наведено аналіз перехідних процесів від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза потужністю 27 кВт та частотою обертів 1146 хвил<sup>1</sup> при постійній частоті обертів за допомогою розробленої моделі двигуна для перехідних режимів у програмі Simulink. Постійність частоти обертів забезпечено за допомогою фазового регулювання. Закони зміни кутів включення та відключення визначено за допомогою механічних характеристик для режиму постійної потужності, розрахованих на моделі двигуна для сталених режимів. Результати аналізу можна використати для розробки програми для мікропроцесора контролера.

**Ключові слова:** модель, програма Simulink, механічні характеристики, фазове регулювання, рекуперативне гальмування, режим постійної потужності.

Проведен анализ переходных процессов от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин<sup>-1</sup> при постоянной частоте вращения с помощью разработанной модели двигателя для переходных режимов в программе Simulink. Постоянство частоты вращения обеспечивалось с помощью фазового регулирования. Законы изменения углов включения и отключения определялись с помощью механических характеристик в режиме постоянства мощности, рассчитанных на модели двигателя для установившихся режимов. Результаты анализа могут быть использованы при разработке программы для микропроцессора контроллера.

**Ключевые слова:** модель, программа Simulink, механические характеристики, фазовое регулирование, рекуперативное торможение, режим постоянства мощности.

Modeling transients from the motor to recuperative braking operation by Simulink of the Matlab software package is got up for the switched reluctance motor. The developed imitating models and computing dates are resulted for motor of 27 kW and 1146 rpm, mine electric locomotive projected for a drive on the base of engine of direct-current. Aim of work : to work out the laws of change parameters for providing of constancy of speed in the mode of the braking and in transition from the mode of engine in the mode of the braking. As managing parameters the corners of including and disconnecting are chosen. Continuous change of corners on a certain law are chosen assume a SRM without the sensor of position of rotor. For the task of managing parameters used the mechanical descriptions got by means of simulation model for the set modes of a mode of a constant of a power. Further perfection of adjusting laws is required for reduction of error in the receipt of set. Result of analysis may be used for development of the high-quality program for the microprocessor of controller.

**Keywords:** switched reluctance motor, mode of constancy of speed, mechanical descriptions, simulation model, managing parameters, transients, recuperative braking operation.

**Введение.** Одним из наиболее проблемных режимов вентильно-индукторного двигателя (ВИД) рудничного электровоза является режим рекуперативного торможения. Режим торможения (ВИД) рассмотрен в работе [1] для весьма специфического применения двигателя для привода аппарата искусственной вентиляции легких, режим торможения для этого применения существенно отличается от режима рекуперативного торможения на транспорте. В работе [2] рассмотрен режим рекуперативного торможения ВИД для рудничного электровоза. Указан способ перехода в этот режим путем изменения углов включения и отключения  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$  (углов между полюсами статора и ротора, при которых подается питание на катушки полюсов статора и отключается питание соответственно путем включения и отключения транзисторов). Кроме того, приведена формула для определения угла  $\theta_{on}$  для режима рекуперативного торможения через угол  $\theta_{on}$  для режима двигателя (очевидно для получения одинакового момента по величине при одной и той же скорости, это в статье не указано). Приведено сравнение экспериментальной и расчетной формы тока в режиме рекуперативного торможения с хорошим совпадением. Существенным недостатком этой работы является отсутствие анализа переходных процессов из одного режима в другой, так как именно анализ этих процессов необходим для создания программы для микропроцессора контроллера.

В работе [3] автора этой статьи приведены результаты моделирования переходных процессов в режиме рекуперативного торможения и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для ВИД мощностью 27 кВт и частотой

вращения 1146 мин<sup>-1</sup>. Для проведения моделирования были разработаны модели двигателя для программы Simulink пакета программ Matlab для установившихся и переходных режимов. [4, 5]. Результаты моделирования показали, что являются возможными переход из режима двигателя в режим рекуперативного торможения и устойчивая работа машины в режиме рекуперативного торможения при использовании фазового регулирования. Приближенные значения углов включения и отключения определялись с помощью механических характеристик, полученных с помощью модели для установившихся режимов. В модели для переходных процессов задавались уточненные значения углов по одному из законов: при наличии датчика положения ротора задавались конечные приращения углов в определенные моменты времени, при отсутствии датчика положения ротора задавалось непрерывное изменение углов по определенному закону. Недостатком работы является проведение расчетного эксперимента только для одного значения скорости (номинальной скорости 120 рад/с), а также использование для определения значения углов статических механических характеристик при постоянных значениях углов включения и отключения, приведенных в работе [6]. Однако, при увеличении скорости выше номинальной двигателя, предназначенные для привода транспортных средств, переходят в режим постоянства мощности. Для обеспечения этого режима углы включения и отключения существенно изменяются при изменении скорости.

**Цель работы.** Разработать законы изменения управляющих параметров для обеспечения постоянства скорости в режиме рекуперативного торможения

и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для вентильно-индукторного двигателя, работающего в режиме постоянства мощности, с помощью имитационной модели в программе Simulink пакета программ Matlab.

**Описание эксперимента.** Для двигателя мощностью 27 кВт, частотой вращения  $1146 \text{ мин}^{-1}$ , спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, были рассчитаны статические механические характеристики в режиме двигателя и в режиме рекуперативного торможения при постоянстве мощности. С помощью этих характеристик определены углы включения и отключения

для моделирования переходных процессов и проведено моделирование. Значения средних значений моментов и углов включения и отключения занесено в таблицу, а результаты моделирования представлены на рис. 1–4. При моделировании задавалось непрерывное изменение углов по определенному закону, которое предполагает управление при отсутствии датчика положения ротора. Наличие датчика положения ротора является одним из недостатков вентильно-индукторных двигателей. В настоящее время опубликовано значительное число работ по бездатчиковому управлению.

Таблица 1 – Значения средних моментов и углов включения и отключения для режима двигателя и режима рекуперативного торможения

$\Omega$ , рад/с	Режим двигателя			Режим рекуперативного торможения		
	$P=14400 \text{ Вт}$	$P=20000 \text{ Вт}$	$P=28800 \text{ Вт}$	$P=-14400 \text{ Вт}$	$P=-20000 \text{ Вт}$	$P=-28800 \text{ Вт}$
120	120 27,9/11,6	167 28,9/11,6	240 30,2/11,6	-120 4,7/-11,6	-167 5,7/-11,6	-240 7,2/-11,4
240	60 31,1/11	83,3 33,1/11	120 35,8/11	-60 9,1/-11	-83,3 11,1/-11	-120 13,8/-11
360	40 33/11	55,5 36,1/11	80 40,1/19,4	-40 11/-11	-55,5 14,1/-11	-80 19/-10,6

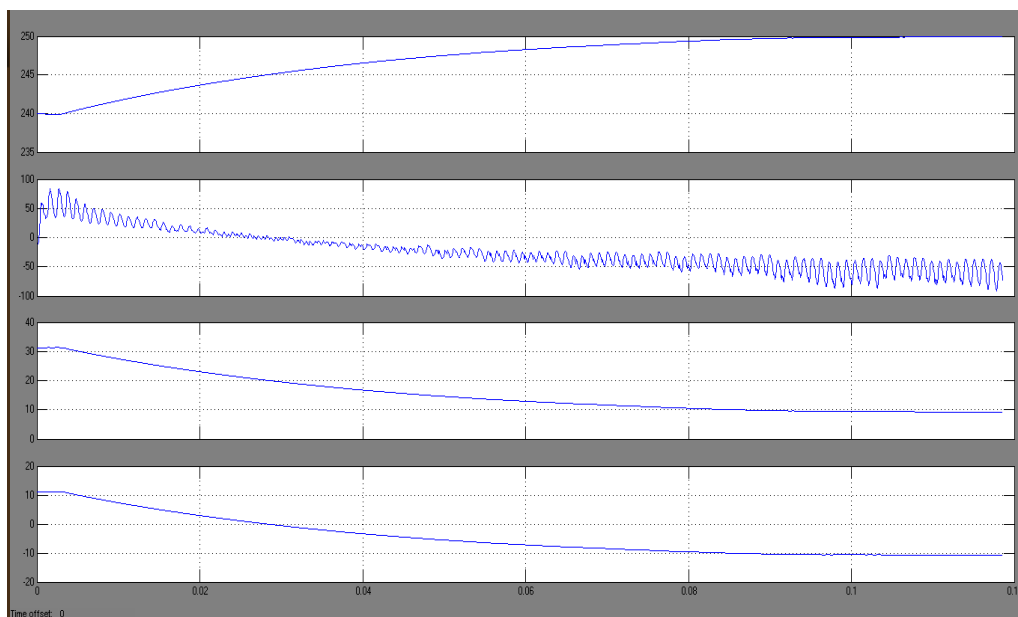


Рис. 1 – Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, угла включения и угла отключения от времени при изменении среднего момента нагрузки от значения  $60 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до значения  $-60 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

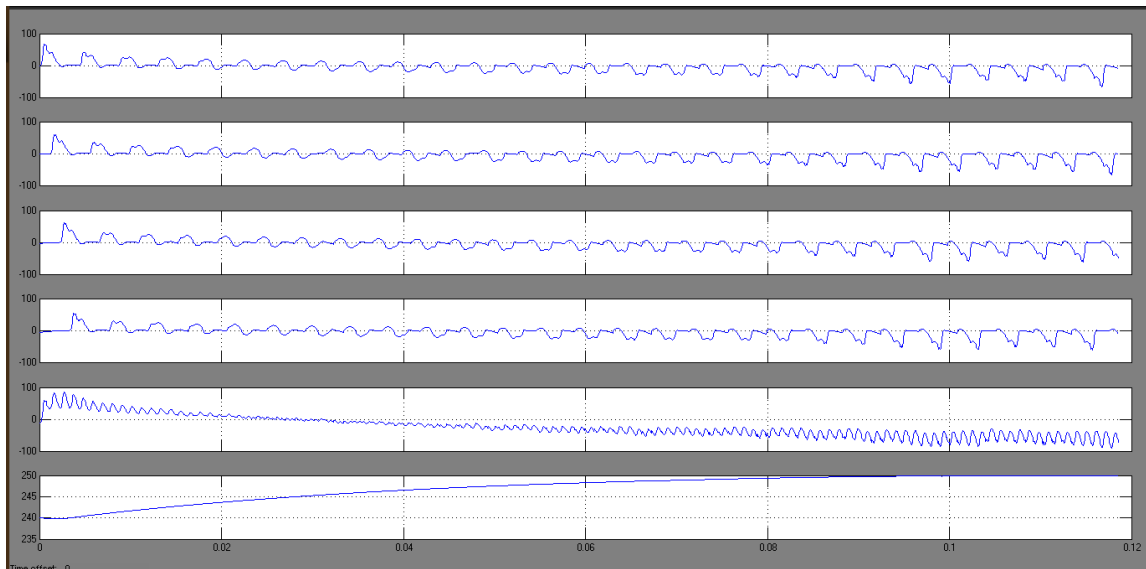


Рис. 2 – Зависимости мгновенных значений моментов четырех фаз, результирующего момента и угловой скорости при изменении среднего момента нагрузки от значения 60 Н·м до значения -60 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

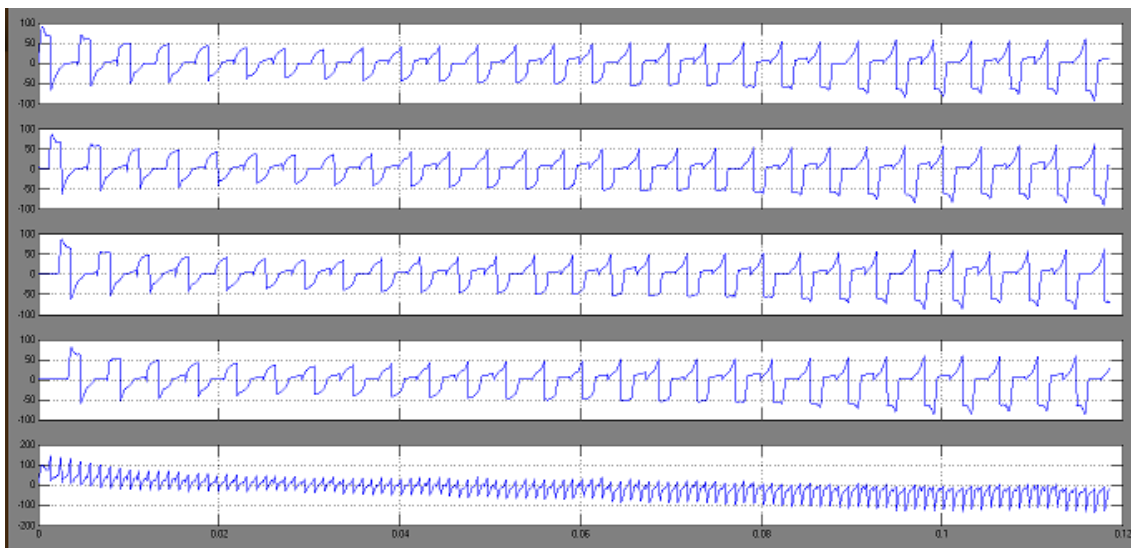


Рис. 3 – Зависимости мгновенных значений токов сети четырех фаз и результирующего тока сети при изменении среднего момента нагрузки от значения 60 Н·м до значения -60 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

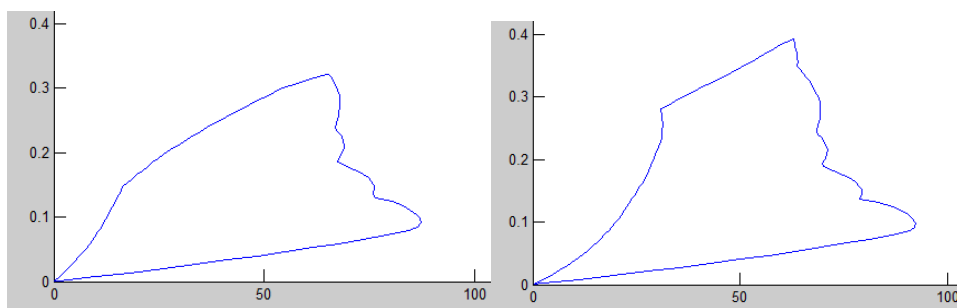


Рис. 4 – Зависимости потокоцепления от тока фазы за один цикл при разных значениях углов включения и отключения в режиме рекуперативного торможения (слева – 9,1/-11, справа – 17,5/-7)

**Анализ результатов эксперимента.** Рис.1 иллюстрирует переход вентильно-индукторного двигателя из режима двигателя при нагрузке 60 Н·м в режим рекуперативного торможения при нагрузке -60

Н·м. Время переходного процесса составило 0,12 с. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 250 рад/с, погрешность регулирования составила 4 %. Значения начальных и конечных углов



включения и отключения соответствуют приведенным в таблице.

Из рис.2 видно, как изменяется форма кривых моментов отдельных фаз и результирующего момента в переходном процессе. Коэффициент пульсаций результирующего момента (отношение максимального момента к среднему) в конечной точке составил 1,5. Рис.3 иллюстрирует изменение токов сети от отдельных фаз и результирующий.

Рис. 4 показывает необходимость определения оптимальных углов включения и отключения. Основной эксперимент проведен для значений углов 9,1/-11. При этом получен момент -60 Н·м, коэффициент полезного действия составил 0,94. При значениях углов 17,5/-7 получен такой же момент, но коэффициент полезного действия уменьшился до значения 0,923, что можно объяснить ухудшением формы годографа рабочей точки на рис.4.

**Выводы.** Качественная работа вентильно-индукторного двигателя, предназначенного для привода транспортных средств, во всех его режимах, требует непрерывного изменения управляющих параметров. Для разработки законов изменения этих параметров необходимо проведение значительного числа экспериментов на модели с целью получения оптимальных законов управления.

#### Список литературы

1. Гулий М. В. Тормозной режим вентильно-реактивного двигателя. / И. Н. Радимов, В. В. Рымша, З. П. Процына. – Электротехника и Электромеханика, 2009, №1, с. 59–62..
2. Коломейцев, Л. Ф. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем/ Л. Ф. Коломейцев, И. А. Проконец, С. А. Пахомин и др. – Известия вузов. Электромеханика, 2002, №2, с. 18 – 22.
3. Галайко, Л.П. Моделирование режима рекуперативного тормо-

жения в имитационной модели вентильно-индукторно двигателя. / Л.П. Галайко// Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2017. Одеса. №25(101)..

4. Галайко, Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 48'2005, Харьков, 2005, с. 24–27.
5. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. / Л. П. Галайко. – Электротехніка і електромеханіка, 2005, №1, с. 24–26.
6. Галайко, Л. П. Вентильно-индукторный двигатель в тормозных режимах / Л. П. Галайко– Електромашинобудування та електрообладнання, «Техніка», 2004, №62, с. 109 –112.

#### References (transliterated)

1. Guliy, M. V., Radimov, I. N., Rimsha, V. V. etc. – “Brake mode of switched reluctance motor”. [Tormoznoy rezhim ventilno-reaktivnogo dvigatelya], *Electrotehnika i Electromekhanika*, (2009), №1, p. 59–62.
2. Kolomeitsev, L. F., Prokopets, I. A., Pakhomin, S. A. etc. – “Operation modes of a railway drive of a mine electric locomotive with a three-phase reluctance induction motor”, [Rezhimy raboty tyagovogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza s trekhfaznim reaktivnim induktornim dvigatelem], (2002.), *Izvestiya vuzov. Electromekhanics*, №2., pp. 18–22.
3. Galayko, L.P. Modelirovanie rezhima rekuperativnogo tormzheniya v imitacionnoy modeli ventilno-induktornogo dvigatelya. [Modeling of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor]. *Elektrotehnicheskie i komputernye sistemi*. [Elektrik and computer system]. Odesa. 2017. №25 (101).
4. Galayko, L. P. Imitatsionnoye modelirovaniye ventil'no – induktornogo dvigatelya v perekhodnikh rezhimakh. [Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions], *Vestnik NTU "HPI"*, 48'2005, Kharkiv, pp. 24–27.
5. Galayko, L. P. Imitatsionnoye modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov raboti ventil'no-induktornogo dvigatelya [Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor], “*Elektrotehnika i Elektromekhanika*”, (2005), №1, p.24–26.
6. Galayko, L. P. Ventilno-induktorniy dvigatel v tormoznikh rezhimakh. [Switched reluctance motor in braking mode], *Electromashinobuduvannya ta elektroobladnyannya*, «Technika», (2004), №62, p 109 –112.

Поступила (received) 05.10.2017

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

**Аналіз режиму рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного електровоза / Л. П. Галайко // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПИ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Аналіз режиму рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна копальневого електровоза / Л. П. Галайко // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Analysis of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor / L. P. Galayko // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 38–41. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.**

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

**Галайко Лидія Петровна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедри, г. Харьков; тел.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).

**Галайко Лідія Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри, г. Харків; тел.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).

**Galayko Lidiya Petrivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department; tel.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).

УДК 621.313

В.П. ШАЙДА, О.Ю. ЮР'ЄВА, С.Є. ДЗЕНІС

## АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РІЗНИХ МОДИФІКАЦІЙ РУДНИКОВОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТИПУ ДТН-45/27

Проведено дослідження можливостей підвищення годинної потужності тягових двигунів постійного струму типу ДТН-45/27. Встановлено, що основним обмежувачем підвищення потужності є тепловий стан двигуна. Шляхом фізичного моделювання виконано оцінку теплового стану різних модифікацій двигуна. Визначено тупикові напрямки модифікації двигуна, визначено шляхи подальших досліджень.

**Ключові слова:** рудниковий контактний електровоз, тяговий двигун постійного струму, годинна потужність, система вентиляції, тепловий стан, перевищення температури.

Проведены исследования возможностей повышения часовой мощности тяговых двигателей постоянного тока типа ДТН-45/27. Установлено, что основным ограничителем повышения мощности является тепловое состояние двигателя. Путем физического моделирования выполнена оценка теплового состояния различных модификаций двигателя. Определены тупиковые направления модификации двигателя, намечены пути дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** рудничный контактный электровоз, тяговый двигатель постоянного тока, часовая мощность, система вентиляции, тепловое состояние, превышение температуры.

**Purpose.** Studies were made of the possibilities of increasing the hourly power of traction motors of direct current type ДТН-45/27. **Methodology.** Physical simulation of the DC motor was made to determine the influence of the geometry of the collector on the motor thermal state. Excess temperature of windings of the motor was measured by the method of resistance, collector and bearings – by the method of the thermometer **Results.** The results of the tests of the thermal state of the traction motor of the main modification, with the improved fan, with the shortened collector, have been obtained. The influence of modifications on the temperature of windings, collector and bearings of the motor has been analyzed. **Originality.** For the first time results of tests of the thermal state of traction motors of DC type ДТН 45/27 of different modifications were obtained. The greatest excess temperature in certain parts of the engine was determined. **Practical value.** It is proposed to consider variants of cooling (motor ventilation system) of the engine. For example, apply a two-circuit cooling system or install a motor-fan instead of an ordinary fan. It is proposed to apply axial ventilation ducts in the anchor, which will allow the flow of cold air through the core, under the front parts of the winding of the anchor and under the collector. This should solve the problem of temperature drop across the length of the anchor core and more effectively cool the collector.

**Keywords:** miner contact electric locomotive, traction motor DC, hourly power, ventilation system, thermal state, temperature rise.

**Вступ.** У гірничорудній промисловості більшості країн світу використовується електричний або дизельний локомотивний транспорт [1]. Однак найбільшого поширення набули електровози.

Існуючий парк рудничних і шахтних електровозів в Україні становить кілька тисяч штук [2], і практично всі вони оснащені тяговим приводом постійного струму.

На залізничних шахтах України основним транспортом для перевезення руди є рудниковий контактний електровоз типу К14 і його модифікації: К14У, К14М, К14Н, 14КР, КТ14, К14А [3] (рис. 1).



Рис. 1 – Зовнішній вигляд рудникового контактної електровоза К14Н

Зазначений тип електровоза натепер морально застарів, а існуючий парк цих електровозів застарів фізично, тобто потребує заміни. До того ж інтенсивна експлуатація електровозів призводить до частих виходів їх з ладу, в результаті чого скорочуються міжремонтні терміни експлуатації і ростуть витрати на обслуговування [4, 5]. Не потребує доказів той факт,

що найбільш оптимальним рішенням даної проблеми є перехід на привод змінного струму та зокрема тягові асинхронні двигуни [5]. Як зазначалося в [5, 6] неможливо одночасно замінити весь парк електровозів, тому що це вимагає значних коштів. До того ж потрібна заміна оснащення обслуговуючих підрозділів і обладнання ремонтних підприємств. Тому в Україні проводяться роботи по модернізації існуючого парку рудничних електровозів, як контактних, так і акумуляторних.

Роботи з модернізації електровозів проводяться як в напрямку заміни типу тягового приводу – на асинхронний [7] або вентильний [8], так і в поліпшенні існуючого приводу постійного струму [6, 9]. На жаль, існуючі приклади переходу на інший тип приводу носять одиничний характер, через наведені вище причини.

Аналогічна тенденція спостерігається і за кордоном. Але в економічно провідних країнах перехід на асинхронний тяговий привод розпочався на 20–30 років раніше від нашої країни (це стосується не тільки рудникового, але і залізничного та міського видів транспорту). Незважаючи на значно більші фінансові ресурси, перехід здійснювався поступово і триває дотепер. Тому, незважаючи на відмову від тягового приводу постійного струму, багато фірм досі випускають рудникові електровози з тяговими двигунами постійного струму. Також вони пропонують проекти з глибокої модернізації існуючих рудничних електровозів із заміною тягового приводу постійного струму на асинхронний привод. Так, наприклад, в [10] наводяться результати модернізації електровоза, що був розроблений в 1970 році, двигун постійного струму було замінено синхронним двигуном на постійних магнітах.

Зараз закордонні фірми не припиняють розвиток приводу постійного струму і здійснюють його модернізацію. Таким прикладом є британська компанія Clayton Equipment Ltd [11] і китайська компанія Rock Mining Machinery [12], на їх сайтах наведені відповідні проекти і продукція (рис. 2).



Рис. 2 – Зовнішній вигляд електровоза компанії Clayton Equipment Ltd

Таким чином, модернізація існуючого парку рудникових електровозів, і зокрема електровозів типу К14, є актуальною науково-технічною задачею для гірничорудної і електромашинобудівної промисловостей.

**Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми.** Цілком природно, що дослідженнями шляхів модернізації рудничного електровоза К14 займаються в основному вітчизняні вчені. Можна навіть виділити територіальну прив'язку більшості спеціалістів, які займаються даним напрямком досліджень. Їх розташування пов'язано з основним місцем видобутку руди – м. Кривий Ріг, з місцем основного виробництва тягового двигуна – ПАТ «Електромашина», м. Харків, та з місцями виробництва самого електровоза – ДП «НВК Електровозобудування», м. Дніпро, і ПрАТ ВКФ «Амплітуда», м. Донецьк.

У якийсь момент часу вчені, які співпрацювали з підприємством-виробником та підприємством, що експлуатує електровози, об'єдналися в одну групу. Це видно з публікованих матеріалів. Основним напрямком досліджень цієї групи стало поліпшення системи керування тяговим двигуном постійного струму (ТДПС) і підвищення надійності його роботи шляхом розробки і створення засобів моніторингу та захисту. У цю групу входять О. М. Сінчук, А. В. Омельченко, Е. С. Гузов, І. О. Сінчук, які представляють ДВНЗ «Криворізький національний університет», та В. О. Чорна, А. В. Некрасов, К. П. Ляпота з Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського.

Автори цієї статті відносять себе до групи вчених, пов'язаних з виробниками ТДПС, і представляють НТУ «ХПІ» та спеціальне конструкторське бюро ПАТ «Електромашина». Основний напрямок нашої роботи – це модернізація самого ТДПС з метою підвищення його надійності.

Роботи вчених з даних груп відрізняються системністю і логічним зв'язком, так розробка першого

напрямку однієї з груп ведеться протягом як мінімум 10 років [5].

Запропонована географічна класифікація не є абсолютною, розглянута тематика зустрічається і в поодиноких роботах інших авторів. Але виділені нами два напрямки досліджень відслідковуються досить явно [4–6].

Також варто відзначити, що раніше ПАТ «Електромашина» – основний виробник ТДПС типу ДТН-45/27 [6], яким комплектується рудниковий електровоз К14 – був фактично монополістом. Однак за останні п'ять років ситуація різко змінилася і з'явилися аналоги цього двигуна – ДК-812, СТК-45 і ДТНР-45, які загострили конкурентну боротьбу, а їх поява стала поштовхом до вдосконалення даного тягового приводу.

Питанню заміни реостатних систем керування ТДПС широтно-імпульсною системою керування присвячено чимало робіт. Ефективність такої заміни не викликає сумніву в плані підвищення надійності та енергоефективності. Основні переваги такої заміни досить докладно описані [5, 13]. За кордоном також досліджуються такі питання: моделюються режими роботи ТДПС з послідовним збудженням для використання отриманих результатів в системі керування двигуном [14]; моделюються системи контролю та управління ТДПС, сумісна робота двигуна з електровозом [15].

Особливу зацікавленість з боку споживача отримують роботи, спрямовані на підвищення надійності експлуатації електровозів. Встановлено [16, 17], що основною причиною більшої частини ушкоджень ТДПС є перевищення температури нагрівання обмоток вище допустимої. У загальній вазі всіх відмов пошкодження обмоток головних і додаткових полюсів складають 44,7 %, а обмотки якоря – 39,1 % [17].

Дослідження показали, що перегрів обмоток ТДПС виникають через невідповідності існуючих режимів експлуатації двигунів режимам, встановленим в технічних умовах. Велику частину часу двигуни працюють в невідновлених режимах. Наявність вологи і пилу в повітрі при існуючій системі охолодження ТДПС, а саме, самовентиляції, погано впливає на обмотки. Усунути ці невідповідності неможливо. В [18] виконано дослідження теплових режимів ТДПС, а саме двигуна ДТН-45/27. Для цього в обмотки двигуна було встановлено термопари і проведено експериментальні дослідження, які показали [18]:

- 1) обмотка якоря нагрівається на 15–30 °С більше, ніж обмотки головних і додаткових полюсів;
- 2) максимальна температура нагрівання обмотки якоря за результатами вимірювань становила 125 °С, а з урахуванням перепаду температури в ізоляції 135–145 °С;
- 3) є істотний перепад температури охолоджуючого повітря по довжині осердя якоря, що становить 30 °С.

Факти, викладені в першому і в третьому пункті, зрозумілі, і пояснюються відсутністю аксіальних вентиляційних каналів в осерді якоря. По суті, охолоджується тільки зовнішня поверхня якоря. Що стосується другого факту, то бентежить розкид температури в 10 °С, вказаний як діапазон перепаду температури в

ізоляції. Також бажано використовувати стандартизовані терміни, адже зазначена величина 135–145 °С є перевищенням температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря. Тоді стають зрозумілими запропоновані в роботі рекомендації про гранично допустиму температуру нагріву для обмотки якоря 140 °С, а для обмоток головних і додаткових полюсів – 165 °С. Деякі виробники аналогів двигуна встановлюють в котушку головного полюса датчик реле температури біметалічного типу, з точкою налагодження 165 °С.

Але в технічних умовах на двигун ДТН-45/27 зазначено, що гранично допустиме перевищення температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря має становити 120 °С, для обмоток головних і додаткових полюсів – 155 °С, для колектора – 105 °С.

У [18] увага акцентується на перегріві обмотки якоря, що підтверджується проведеними лабораторними експериментами, хоча за результатами, наведеними в [4], частіше виходять з ладу обмотки головних і додаткових полюсів. Цей факт залишається без пояснення.

До того ж випробуванням піддавався зразок двигуна ДТН-45/27 до модернізації, яку ПАТ «Електромашина» провело у 2014 році. Тоді було здійснено перевод системи ізоляції обмотки якоря з класу нагривостійкості F на H [6, 9]. Також стала використовуватися технологія вакуум-нагнітального просочення. Решта змін більш докладно розглянута в [6].

На підставі отриманих фактів у [18] пропонується перейти від самовентиляції до примусової вентиляції, хоча вказано на неможливість такого переходу в силу обмеження габаритів електровоза. Також проводились експерименти з примусової вентиляції двигуна через отвори, які пропонується виконувати в підшипникових щитах. Було встановлено, що при витраті повітря 5 м<sup>3</sup>/хв перевищення температури обмотки якоря над температурою навколишнього повітря складе 80 °С, а для обмоток головних і додаткових полюсів – 55 °С і 45 °С відповідно. На жаль, в [18] автори не привели методику розрахунку, а також не вказали, чи працювала самовентиляція сумісно з примусовою вентиляцією. Адже використання цих двох видів разом є нераціональним, і викликати турбулентність повітря при зустрічі різних охолоджувальних потоків. Результати, наведені в [18], свідчать про те, що застосування тільки системи захисту не вирішує проблему підвищення надійності роботи двигуна, а ще треба модернізувати сам двигун.

Природно найменш витратним для виробника є створення системи захисту, тому дослідження розпочаті в [18] знайшли своє продовження в роботах [4, 9, 17, 19]. Фактично всі ці роботи пов'язані з розробкою методів і засобів контролю теплового стану в експлуатаційних режимах роботи ТДПС. Основною проблемою, що розв'язувалась в [4, 9, 17, 19], є отримання достовірних даних про нагрів обмотки якоря, адже отримати дані з обертового якоря в умовах експлуатації вкрай важко.

Оскільки автори цієї статті ведуть дослідження в іншому напрямку, а саме модернізації ТДПТ, детально ці роботи розглядатися не будуть. Винятком є ро-

бота [9], де були надані деякі рекомендації по поліпшенню конструкції ТДПС типу ДТН-45/27, більшу частину з яких було проаналізовано в [6]. Також в [9] запропоновано для поліпшення самозбудження двигунів в гальмівних режимах пропонується здійснювати реверс за допомогою обмотки якоря, а осердя якоря виготовляти зі сталі з підвищеною коерцитивною силою. На жаль, цю рекомендацію важко виконати, тому що виробники навпаки намагаються здешевити двигун. Це призводить до того, що для головних полюсів виробники використовують звичайну конструкційну сталь.

Продовженням роботи [18] в напрямку модернізації ТДПС стали роботи [20, 21]. У першій частині роботи [20] більш детально описуються дослідження примусової вентиляції ТДПС, розпочаті в [18], а у другій частині розглядається робота системи захисту двигуна від перегріву. Подібний підхід свідчить про комплексність вирішення проблеми забезпечення надійності роботи ТДПС. Також в роботі наводяться формули для визначення витрати охолоджуючого повітря

$$Q_{air} = 60 \cdot \frac{10^3 \cdot \Delta P}{\rho \cdot C_p \cdot \theta_v},$$

де  $\Delta P$  – втрати потужності двигуна;

$\rho$  – щільність повітря;

$C_p$  – теплоємність повітря;

$\theta_v$  – перевищення температури повітря, що виходить з машини, над температурою повітря, що входить в машину.

На жаль, перевірити результати розрахунку неможливо, тому що в роботі не вказані прийняті значення і одиниці вимірювання щільності повітря, питої теплоємності повітря і, найголовніше, перевищення температури повітря. Але відомий результат розрахунків – витрата охолоджуючого повітря становить 5 м<sup>3</sup>/хв. [18].

У практиці проектування двигунів постійного струму прийнято використовувати формулу:

$$Q_{air} = \frac{\Sigma P}{C_v \cdot \theta_v},$$

де  $C_v$  – теплоємність повітря, Дж/с·м<sup>3</sup>.

При цьому значення  $Q_{air}$  отримується в м<sup>3</sup>/с.

На рис. 3, який взято з роботи [20], стрілками показано напрямок руху охолоджуючого повітря всередині двигуна, аналіз розташування яких свідчить про відсутність осьових каналів в осерді якоря.

Також з рис. 3. важко судити про наявність вентилятора на валу і вікнах для самовентиляції, тому що і в тексті про це нічого не сказано. Ми акцентуємо увагу на цьому факті, тому що при застосуванні примусової вентиляції, так званої «продувки», відпадає необхідність в самовентиляції, навпаки вона навіть буде шкідлива.

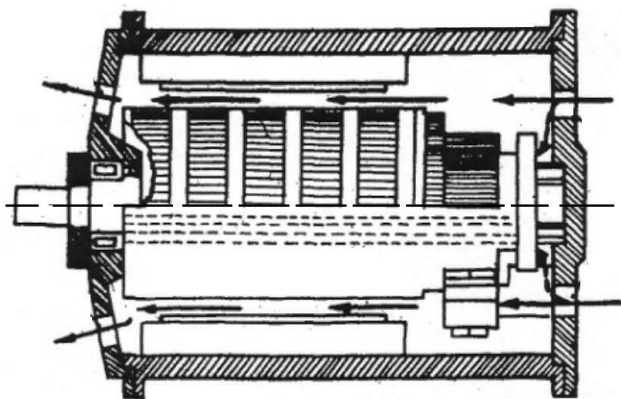


Рис 3 – Напрямок потоків повітря при примусовій вентиляції [20]

В роботі [21] ще раз наголошується на необхідності переходу до примусової вентиляції і вказується, що подібний підхід дозволить підвищити не тільки тривалу, але і годинну потужність на 20–30 %. Вказується, що з досвіду зарубіжних країн подібне рішення дозволяє підвищити потужність двигуна на 30–35 % при збереженні габаритів [21]. Однак тут же стверджується, що подібне рішення не знаходить підтримки і розуміння у вітчизняних виробників електровозів.

Ми розуміємо, що наші ТДПС за своїм рівнем відстають від провідних світових зразків, але не настільки, щоб використовувати для зразка технічних рішень ТДПС фірми ASEA, як це зроблено в роботі [21]. Фірма ASEA припинила своє існування ще в 1988 році, і після злиття з фірмою Brown Boveri стала фірмою ABB. Прикладом цьому може служити технічне рішення, запропоноване як актуальне в роботі [21], а саме, встановлення заземлюючої бронзової щітки на валу коліс для захисту від підшипникових струмів. Фірма ABB натеper використовує гібридні підшипники фірми SKF, що мають сталеві кільця і керамічні елементи кочення [22].

Ми згодні, що примусова вентиляція ефективніша, але в сучасних транспортних засобах вже використовується водяне охолодження електродвигуна, таке рішення має місце в міському транспорті. Однак, потрібно оцінювати можливості споживача і виробника в сучасних реаліях економічної ситуації. Повернемося до роботи [21], в кінці роботи запропонований варіант модернізованого ТДПС, якого названо ДТН-45М. Наведено його параметри і параметри вентиляційної установки, що забезпечує примусову вентиляцію. Хочеться відзначити, що годинна потужність залишилася незмінною 45 кВт, хоча на початку роботи стверджувалося про можливість її підвищення як мінімум на 20 %. Тривала потужність збільшена до 36 кВт, але вона і так збільшена до 35 кВт у ДТН-45/27 і всіх його аналогів. Пропонований ТДПС типу ДТН-45М має спосіб охолодження ІС37, підведення і відведення охолоджуючого повітря проводиться крізь гофровані трубки. Виникає сумнів в можливості підведення трубок з боку вільного кінця вала, адже там здійснюється зчленування з редуктором. Якщо така можливість забезпечується, то краще змінити напрямок потоку повітря, з вказаного на рис. 3, на протилежний. В такому випадку вугільний (щітковий) пил не буде продуватися крізь всю машину. Збентежив зазначений

ступінь захисту IP52, такої не існує, є IP50, IP54 і IP55 (думаємо це просто помилка). Хотілося б дізнатися докладніше, якими технічними рішеннями забезпечується цей ступінь захисту. Найнезрозумілішим для нас є вказана витрата повітря вентиляційної установки  $0,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . До цього в роботах [18, 20, 21] вказувалося, що витрата повітря повинна складати  $5 \text{ м}^3/\text{хв}$ , зробивши прості підрахунки,  $0,35 \times 60 = 21 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Видно, що витрата повітря зросла в 4 рази в порівнянні з представленими раніше даними. Ми сподіваємося, що ця плутанина виникла при використанні різних одиниць розмірності однієї і тієї величини, про що ми гадували раніше.

Як зазначалося в [6, 23] замовник запропонував ПАТ «Електромашина» підвищити годинну потужність двигуна ДТН-45/27 з 45 кВт до 60 кВт без зміни габариту. В роботі [6] нами були проаналізовані конструкція модернізованого двигуна ДТН-45/27 і його аналогів, а також намічений план спільної роботи з спеціальним конструкторським бюро (СКБ) підприємства. В результаті СКБ запропонувало розглянути варіант збільшення довжини осердя якоря на 30 мм. Це стало можливим завдяки зміні конструкції траверси. Звичайно використовувалася траверса з двома бракетами по дві щітки на кожному, вирішили використовувати чотири бракети по одній щітці. В роботі [23] було виконано попередній аналіз і оцінено збільшення густини струму в обмотках. Потім був виконаний електромагнітний розрахунок зі збереженням поперечної пазової зони якоря, який не задовольнив вимогам, тобто геометрію активної зони потрібно міняти. Новий розрахунок з зміненою геометрією пазової зони показав можливість реалізації такої потужності. Однак перевірений тепловий розрахунок, забракував цей варіант. На жаль методика теплового розрахунку, яка використовується на ПАТ «Електромашина», не дає адекватних результатів навіть для базового варіанту двигуна.

У свою чергу на ПАТ «Електромашина» було вирішено перевірити ідею про можливість збільшення довжини пакета. Для цього в серпні 2017 року було виготовлено кілька дослідних зразків ТДПС типу ДТН-45/27 з укороченим колектором. Подібне рішення було обгрунтовано можливістю економії колекторної міді і зниженням ціни двигуна.

У вересні 2017 року були проведені типові випробування одного з цих двигунів. Вони показали зростання перевищення температури обмоток і колектора у порівнянні з базовим зразком. Така ситуація пов'язана зі зменшенням площі охолодження колектора. Як відзначено в [18] ТДПС представляє складний об'єкт, тому тепловий стан в динамічних режимах роботи не можливо точно визначити розрахунком його температурного поля. Ми згодні, що це важка задача, але шляхи її вирішення є, треба тільки визначити вірний. Зокрема в роботах [24, 25] наводяться результати дослідження температурного поля двигунів з постійними магнітами для приводу шахтних електровозів. У дослідженні [24, 25] використовувалися сучасні пакети програм. Із аналізу виконаних досліджень видно, що завдання модернізації ТДПС типу ДТН-45/27 є актуальною, тому що споживач вимагає підвищити надійність і часову потужність двигуна.

Вирішення цього завдання можливе шляхом застосування системи примусової вентиляції, однак виробники електровозів не згодні на такі «глобальні» зміни в його конструкції. На нашу думку двигун потребує перепроектування, чому вже не дуже «радіють» виробники ТДПС, але вони готові розглядати такий варіант. Основною проблемою є необхідність визначення реального теплового стану двигуна. Все проведені дослідження свідчать про відсутність «інженерного» інструменту, для оцінки теплового стану двигуна. Основна інформація про тепловий стан двигуна отримується тільки при випробуваннях.

**Ціль та задачі дослідження.** Використовуючи аналіз теплового стану різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27, оцінити можливість його подальшої модернізації з метою підвищення часової потужності.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- проаналізувати тепловий стан різних варіантів модернізованого ТДПС типу ДТН-45/27;
- виконати порівняльну оцінку теплового стану трьох варіантів двигунів: базового, з модернізованим вентилятором та з укороченим колектором.
- розглянути подальші шляхи дослідження та модернізації двигуна ДТН-45/27.

**Результати випробувань на нагрівання різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27.** Тяговий двигун постійного струму типу ДТН-45/27 виробництва ПАТ «Електромашина» – це двигун з послідовним збудженням, має класичну конструкцію з головними та додатковими полюсами. Двигун має конструктивне виконання рудникове нормальне, захищене IP43 (забезпечується корпусом електровоза), з самовентиляцією IC01.

Випробування проводились для трьох зразків двигунів: перший – це звичайний серійний двигун (рис. 5); другий – має поліпшений вентилятор (змінилася довжина і ширина вентиляційних лопаток); третій – має укорочений колектор (рис. 6).

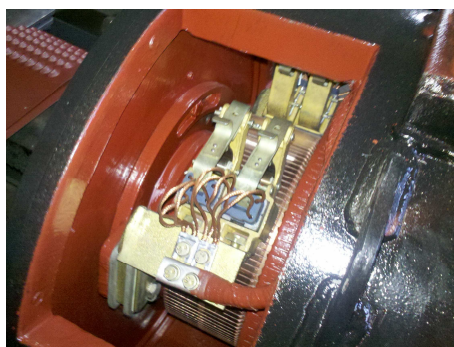


Рис. 5 – Зовнішній вигляд звичайного колектора, у вікні спостерігаємо дві щітки на бракеті

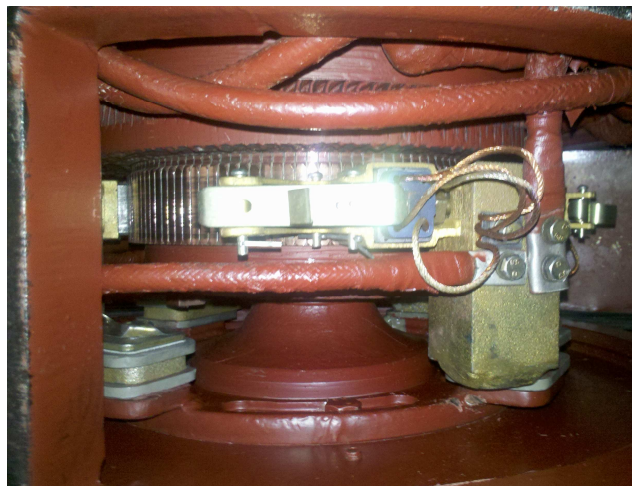


Рис. 6 – Зовнішній вигляд укороченого колектора, у вікні спостерігаємо одну щітку на бракеті

Всі розглянуті двигуни мають ізоляцію однакового класу нагрівостійкості Н.

Випробування ТДПС типу ДТН-45/27 проводились на випробувальній станції ПАТ «Електромашина» (рис. 7).

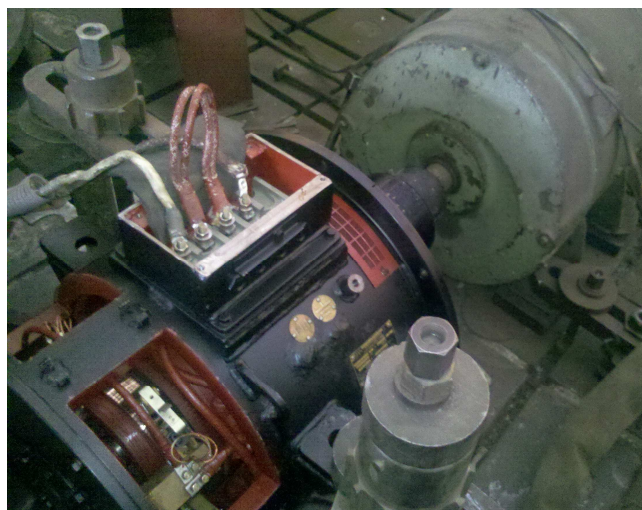


Рис. 7 – Випробувальний стенд ПАТ «Електромашина», на якому проходить випробування ТДПС типу ДТН-45/27 з укороченим колектором

У табл. 1 представлені результати випробувань для годинного режиму роботи (S2, тривалістю роботи 60 хв.) при потужності двигуна 45 кВт, в табл. 2 – для тривалого режиму роботи (S1) і потужності 27 кВт, в табл. 3 – для тривалого режиму роботи (S1) і потужності 35 кВт. Також в таблиці наведені результати випробувань електродвигуна ДТН-45/27 виробництва ТОВ «Харківський завод електричних машин», якого було надано для випробувань. На жаль, в наданому зразку був відсутній вентилятор. Вимірювання перевищення температури обмоток двигуна проводилося методом опорів, колектора і підшипників – методом термометра.

Таблиця 1 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для годинного режиму роботи (S2, 60 хв.) при потужності 45 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Підшипники
Двигун ДТН-45/27	204	1310	96	122	130	72	38
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1310	80	114	111	71	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1305	111	130	137	110	24
ДТРН-45/27		1315	119	227	195	124	27

Таблиця 2 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для тривалого режиму роботи (S1) при потужності 27 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Обмотка якоря
Двигун ДТН-45/27	122	1540	70	86	89	69	35
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1540	41	45	46	45	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1575	96	73	79	78	32
ДТРН-45/27		1640	95	182	112	118	43

Таблиця 3 – Перевищення температур обмоток и частин двигунів для тривалого режиму роботи (S1) при потужності 35 кВт

Тип двигуна	Струм якоря, А	Частота обертання, об/хв	Виміряні перевищення температур, °С				
			Обмотка якоря	Обмотка додаткових полюсів	Обмотка головних полюсів	Колектор	Обмотка якоря
Двигун ДТН-45/27	158	1460	90	97	101	71	35
ДТН-45/27 з поліпшеним вентилятором		1540	41	45	46	45	–
ДТН-45/27 з укороченим колектором		1410	117	111	116	118	38
ДТРН-45/27		1470	113	236	171	134	47

**Аналіз результатів випробувань, що характеризують тепловий стан різних модифікацій досліджуваного ТДПС.** Аналізуючи результати випробувань на нагрівання різних модифікацій ТДПС типу ДТН-45/27 виробництва ПАТ «Електромашина», очевидно, що самим навантаженим за тепловим станом є годинний режим роботи. А найнагрітою частиною двигуна є обмотка головних полюсів, далі за ступенем нагрівання йдуть обмотка додаткових полюсів, обмотка якоря і колектор. Це відповідає висновкам, зробленим в роботі [4], про те, що найчастіше виходять з ладу обмотки головних і додаткових полюсів.

Застосування вентилятора з поліпшеними параметрами дозволяє забезпечити більш ефективне охолодження частин двигуна, різниця становить 10–15 °С в найскладнішому за тепловим станом режимі роботи S2, 60 хв. Перевищення температури обмоток також зросло на 7–15 °С у порівнянні з серійним двигуном.

Однак це не стосується колектора.

Результати випробувань двигуна з укороченим колектором показують, що його перевищення температури становить 111 °С, а значить перевищує допустиме значення, яке дорівнює 105 °С. Це свідчить про недостатнє охолодження колектора через зменшення його зовнішньої поверхні.

Порівняння даних, отриманих нами, з експериментальними даними, отриманими в роботі [18], не проводилось, тому що випробуванням підлягала застаріла «версія» двигуна ДТН-45/27, яка виготовлялась з ізоляцією обмотки якоря класу нагрівостійкості F. Крім того, при дослідженнях використовувалися різні методи вимірювань: у [18] – застосовувались термомари (метод термометра), в нашому – вимірювання здійснювались методом опору.

Результати випробувань двигуна ДТРН-45/27 не можна порівнювати внаслідок відсутності у зразка

вентилятора.

### Висновки та перспективи подальшого розвитку досліджень.

1. Аналіз робіт та виконаних досліджень показав, що спостерігається недолік охолодження ТДПС типу ДТН-45/27. Однак ця ситуація характерна тільки для годинного режиму роботи, до того ж вона пояснюється недотриманням затверджених в технічних умовах режимів роботи і важкими умовами експлуатації.

2. Застосування різних способів і методів захисту двигуна від перегріву не вирішує проблему, а лише дозволяє двигуну не вийти з ладу.

3. Застосування примусової вентиляції двигуна, запропоноване в роботах [18, 20, 21], могло б вирішити проблему надмірного нагріву двигуна. Однак це призведе до необхідності розташування в електровозі вентиляційної установки, на що не погоджуються виробники електровозів. Крім того, така вентиляція буде ефективною тільки при розміщенні вентиляційних каналів в осерді якоря. Це потребує перерахунку двигуна через зміни розподілу магнітного поля в двигуні, тобто зміняться його параметри. Перевагою такої системи є кращий у порівнянні з самовентильацією захист частин, що знаходиться в середині двигуна.

4. Вважаємо за необхідне розглянути різні варіанти охолодження (системи вентиляції) двигуна. Наприклад, застосувати двоконтурну систему охолодження або встановити мотор-вентилятор замість звичайного вентилятора.

5. На даному етапі досліджень ідея підвищення годинної потужності ТДПС до 60 кВт за рахунок зменшення довжини колектора показала себе неспроможною через надмірний перегрів колектора.

6. У подальших планах нашої роботи проведення досліджень щодо розміщення осьових вентиляційних каналів в якорі, що дозволить пустити потік холодного повітря по осердю, під лобовим частинами обмотки якоря і під колектором. Це має вирішити проблему перепаду температури повітря по довжині осердя якоря і більш ефективно охолоджувати колектор.

7. Фізичне моделювання вимагає значних коштів, тому планується провести подальші дослідження з використанням пакета програм Ansys Maxwell. Даний пакет дозволяє розрахувати магнітне і теплове поле двигуна, провести оптимізаційні розрахунки. Також в наших планах перевірити ефективність методу еквівалентних схем заміщень для теплового розрахунку двигуна ДТН-45/27. Ми не залишаємо надії підвищити годинну потужність двигуна до 60 кВт.

### Список літератури

1. Mine locomotion. Режим доступу : <http://www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMiningMoore2012k.pdf>. – Дата звертання : 17 вересня 2017.
2. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельник // Уголь Украины. – № 6. – 2006. – С. 30–31.
3. Бутт Ю. Ф. Шахтный подземный транспорт: справочное издание: в 2-х т. / Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый [и др.]. Под общ. ред. Б. А. Грядущего. – Т. 1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
4. Гузов Э. С. Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних електровозів від перегріву / Э. С. Гузов, И. О. Синчук, В. О. Черная, Л. Н. Сменова // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 12 (1121). – С. 204–208.
5. Синчук И. О. К вопросу выбора типа и системы управления

- тяговым электроприводом рудничных электровозов / И. О. Синчук, К. П. Ляпота, Э. С. Гузов, О. Е. Мельник // Електротехнічні і енергозберегаючі системи. – Вип. 1/2007 (1). – 2007. – С. 27–31.
6. Шайда В. П. Анализ путей модернизации тягового привода постоянного тока ДТН-45/27, предназначенного для привода рудничного контактного электровоза / В. П. Шайда, Е. Ю. Юрьева, Д. А. Гринь // Вісник НТУ «ХП». Серія Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2016. – №32(1204). – С. 53–57.
7. Синчук И. О. Синергетический тяговый асинхронный электро-технический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скана, Э. С. Гузов, Ф. И. Караманец // Електротехнічні і енергозберегаючі системи. – 2011. – Вип. 4/2011 (16). – С. 65–68.
8. Офіційний сайт ВАТ «Електротехніка Нові Технології». Режим доступу : <https://ukrainemotors.com.ua/projects/elektrotransport/ventilnii-tyagovii-e-1>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
9. Синчук И. О. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, Д. О. Кальмус, В. О. Чорная // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 4/2014 (87). – 2014. – С. 44–50.
10. Polnik B. Effective Control of a Battery Supplied Mine Locomotive Unit / В. Polnik, Z. Budzynski, B. Miedzinski // Elektronika ir elektrotechnika. – 2014. – VOL. 20. – no. 3 – P. 39–43. – doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.3.3319>.
11. Офіційний сайт Clayton Equipment Ltd. Режим доступу : <http://claytonequipment.co.uk/2014/12/17/product-development>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
12. Офіційний сайт ZIBO GOD ROCK MINING MACHINERY CO., LTD. Режим доступу : <http://www.rockloaders.com/products.asp>. Дата звертання : 17 вересня 2017.
13. Карпухин А. П. Энергоэффективность шахтных и карьерных электровозов / А. П. Карпухин, И. В. Андросов, В. Э. Демин, В. П. Степаненко // VII Международная студенческая электронная научная конференция «СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2015». – Режим доступу: <https://www.scienceforum.ru/2015/833/10020>
14. Barna G. Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles / G. Barna // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje. – 2016. – P. 531–536. – doi: 10.1109/MMAR.2016.7575192
15. Devarajan M. Implementation of Single and double stage control of DC traction motor using matlab / M. Devarajan // International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology. – 2014. – Vol. 4(13). – P. 1404–1415.
16. Черная В. О. К вопросу анализа поврежденных тяговых двигателей шахтных электровозов / В. О. Черная // Молодь: наука та інновації. Перша всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. – Дніпропетровськ : ВНЗ «НГУ». – 2013. – С. 421–422.
17. Синчук О. М. До питання комплексності контролю параметрів функціонування електромеханічних систем шахтних електро-возів / О. М. Синчук, Е. С. Гузов, І. О. Синчук, В. О. Чорна // Елек-трифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 94–101.
18. Синчук И. О. Исследования тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук, В. О. Черная // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2). С. 98–100.
19. Черная В. О. Оценка температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов посредством использования корреляционной теории случайных функций / В. О. Черная, А. В. Омельченко // Електромеханічні і енергозбері-гаючі системи. – 2015. – Випуск 4/2015 (32). – С. 82–88.
20. Некрасов А. В. Контроль температурных режимов та охоло-дження тягових двигунів електротехнічних комплексів в процесі експлуатації / А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко- технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016, № 50(1222), р. 122–126.
21. Черная В. О. Разработка усовершенствованной конструкции тяговых двигателей постоянного тока для шахтных контактных электровозов / В. О. Черная // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2016. – вип. 29. – С. 287–292.



22. Новый стандарт // Evolution. – 21 Декабрь 2010. – Режим доступа : <http://evolution.skf.com/ru/новый-стандарт/>
23. Гринь Д. О. Дослідження можливості підвищення годинної потужності тягового двигуна постійного струму ДТН-45/27 / Д. О. Гринь, В. П. Шайда // Матер. 11-ї університетської наук.-прак. студентська конф. магістрантів НТУ "ХПІ", 18-21 квітня 2017 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – Ч. 2. – С. 16–17.
24. Матющенко А. В. Анализ теплового состояния тягового вентиляционного двигателя с постоянными магнитами для шахтного электровоза / А. В. Матющенко // Электротехника и Электромеханика. – 2016. – №6. – С. 15–18. – doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
25. Tsarafidy Raminosa. Test Results for a High Temperature Non-Permanent Magnet Traction Motor / Tsarafidy Raminosa, Ayman El-Refaie, David Torrey, Kevin Grace, Di Pan, Stefan Grubic, Karthik Bodla, Kum-Kang Huh // Industry Applications IEEE Transactions. – 2017. – Vol. 53. – no. 4. – P. 3496-3504. – DOI 10.1109/TIA.2017.2687870.
- References (transliterated)**
- Mine locomotion. Available at: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMiningMoore2012k.pdf>. (accessed: 17.09.2017).
  - Debelyi V. L., Debelyi L. L., Mel'nik S. A. *Osnovnye napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta* [The main directions of development of the mine locomotive transport]. *Ugol' Ukrainy – Ukraine Coal*. 2006, no. 6, p. 30–31
  - Butt Yu. F., Gryaduschiy V. B., Debelyiy V. L., Koval' A. N., Furman A. L., Schuka V. M., Yatsenko V. A. *Shahtnyiy podzemniy transport: spravochnoe izdanie: v 2-h t.* [Mine underground transport: a reference book: in 2 vol., Vol. 1], Donetsk: «VIK», 2009, 481 p.
  - Guzov E., Sinchuk I., Cherna V., Smenova L. *Rozrobka bezsensorono sposobu zakhystu tyahovykh elektrichnykh dvyhunyv rudnykhnykh elektrovoziv vid perehrivu* [Development sensorless way to protect the electric motor traction mine electric locomotives overheating]. *Visnyk NTU "KhPI"*. – Bulletin of NTU "KhPI". 2015, № 12 (1121), p. 204–208.
  - Sinchuk I. O., Ljapota K. P., Guzov Je. S., Mel'nik O. E. *K voprosu vybora tipa i sistemy upravleniya tjagovym jelektroprivodom rudnykhnykh elektrovozov* [On the question of the choice of the type and control system electric traction miner electric locomotives]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release 1/2007 (1), 2007, p. 27–31
  - Shayda V. P., Yurieva O. Yu., Hryn' D. O. *Analiz putey modernyzatsyy tyahovoho dvyhatela postoyannoho toka DTN-45/27, prednaznachenoho dlya pryvoda rudnychnoho kontaktneho elektrovoza* [Analysis of ways to modernize the traction motor DC DTH-45/27 for the drive of miner contact electric locomotive]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrichnykh mashyn i aparativ.* – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. 2016, №32(1204), p. 53–57.
  - Sinchuk O. N., Shokarev D. A., Skapa E. I., Guzov Je. S., Karamanec F. I. *Sinergeticheskij tjagoviy asinhromnyy jelektrotekhnicheskij privod dlja kontaktno-akkumuljatornogo dvuhosnogo elektrovoza* [Synergetic asynchronous traction drive for electrical contact battery two-axle locomotive]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*, release 4/2011 (16), 2011, p. 65–68.
  - The official website of the company Ltd "Electrical New Technology". Available at: <https://ukrainemotors.com.ua/projects/elektrotransport/ventilnij-tyagovii-e-1>. (accessed: 17.09.2017).
  - Sinchuk O. N., Guzov Je. S., Sinchuk I. O., Kal'mus D. O., Chornaja V. O. *Voprosy povysheniya nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturykh rezhimov tjagovykh elektricheskikh dvigatelej rudnykhnykh elektrovozov* [Questions of increase of reliability of the monitoring system of temperature modes of traction electric motors mine electric locomotives]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'nogo universytetu imeni Mykhayla Ostrogradsk'oho – Bulletin of Kremenchuk National University named Mykhailo Ostrogradsky.* – Bulletin of Kremenchuk National University named Mykhailo Ostrogradsky. 2014, release 4/2014 (87), p. 44–50.
  - B. Polnik, Z. Budzynski, B. Miedzinski Effective Control of a Battery Supplied Mine Locomotive Unit, *Elektronika ir elektrotehnika*, vol. 20, no. 3. doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.3.3319>
  - The official website of the company Clayton Equipment Ltd. Available at: <http://claytonequipment.co.uk/2014/12/17/product-development>. (accessed: 17.09.2017).
  - The official website of the company ZIBO GOD ROCK MINING MACHINERY CO., LTD. Available at: <http://www.rockloaders.com/products.asp>. (accessed: 17.09.2017).
  - Karpukhyn A. P., Androsoy Y. V., Demyn V. E., Stepanenko V. P. *Energoeffektivnost shahtnykh i karernykh elektrovozov* [Energy efficiency of mine and quarry electric locomotives]. *VII Mezhdunarodnaya studencheskaya elektronnyaya nauchnaya konferentsiya «STUDENCHESKIY NAUCHNIY FORUM 2015».* – VII International Student Electronic Scientific Conference "STUDENT SCIENTIFIC FORUM 2015". – Available at: <https://www.scienceforum.ru/2015/833/10020>
  - G. Barna. Simulation model of a series DC motor for traction rail vehicles, "2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyszdroje, 2016, pp. 531–536. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575192.
  - Devarajan M. Implementation of Single and double stage control of DC traction motor using matlab, *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 2014, Vol. 4(13), p. 1404–1415.
  - Chornaja V. O. *K voprosu analiza povrezhdeniy tyahovykh dvyhateley shakhtnykh elektrovozov* [To the issue of the analysis of damage to traction motors of mine electric locomotives]. *Molod' nauka ta innovatsiyi. Persha vseukrayins'ka naukovo-tekhnichna konferentsiya studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* – [Youth: science and innovation. The first All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists.]. Dnipropetrovs'k : VNZ «NHU», 2013, p. 421–422.
  - Sinchuk O. N., Guzov E. S., Sinchuk I. O., Chorna V. O. *Do pytannya kompleksnosti kontrolyu parametriv funktsionuvannya elektromekhanichnykh system shakhtnykh elektrovoziv* [To the issue of the complexity of the control operation parameters of electromechanical systems of mine electric locomotives]. *Transport electrification. – Elektrifikatsiya transportu*, 2015, № 9, p. 94–101.
  - Sinchuk I. O., Chorna V. O. *Yssledovannya teplovykh rezhimov tyahovykh elektricheskikh dvyhateley rudnykhnykh kontaktnykh elektrovozov* [Investigation of thermal modes of traction electric motors of mine contact electric locomotives]. *Problems of energy saving in electrical engineering systems. Science, education and practice. – Problemy enerhoresursozberezhennya v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka.* Kremenchuk: KrNU, 2014, release 1/2014 (2), p. 98–100.
  - Chornaja V. O., Omelchenko A. V. *Otsenka temperaturnykh rezhimov tyahovykh elektricheskikh dvyhateley rudnykhnykh elektrovozov posredstvom yspol'zovannya korrelyatsionnoy teoryi sluchaynykh funktsiy* [Estimation of temperature regimes of traction electric motors of mine electric locomotives using the correlation theory of random functions]. *Electromechanical and energy saving systems. – Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*, 2015, release 4/2015 (32), p. 82–88.
  - Nekrasov A., Chorna V., Kasyanov E. *Kontrol' temperaturnykh rezhimiv ta okholodzhennya tyahovykh dvyhunyv elektrotekhnichnykh kompleksiv v protsesi ekspluatatsiyi* [Controlling temperature and cooled traction motors electrical systems during operation], *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: Mechanical-technological systems and complexes, Kharkov: NTU "KhPI", 2016, No 50 (1222), p.122–126.
  - Chornaja V. O. *Razrabotka usovershenstvovannoy konstruktzii tyagovykh dvigateley postoyannogo toka dlya shahtnykh kontaktnykh elektrovozov* [Development of an improved design of DC traction motors for mine electric locomotives]. *Engineering in agricultural production, branch engineering, automation*, 2016, release 29, p. 287–292.
  - New standard. Evolution. – 2010, December, 21. – Available at: <http://evolution.skf.com/ru/новый-стандарт>.
  - A.V. Matyuschenko *Analiz teplovoho sostoyannya tyahovoho ventyl'noho dvyhatela s postoyannym mahnytamy dlya shakhtnoho elektrovoza* [Analysis of thermal state of traction brushless permanentmagnet motor for mine electric locomotive]. – *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, №6, p. 15–18. – doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.03.
  - T. Raminosa et al. Test Results for a High Temperature Non-Permanent-Magnet Traction Motor, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 3496–3504. doi: 10.1109/TIA.2017.2687870.

Надійшло (received) 02.10.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Аналіз теплового стану різних модифікацій рудникового тягового двигуна постійного струму типу ДТН-45/27 / В.П. Шайда, О.Ю. Юр'єва, С.Є. Дзеніс** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–46. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.

**Анализ теплового состояния различных модификаций рудничного тягового двигателя постоянного тока типа ДТН-45/27 / В.П. Шайда, Е.Ю. Юрьева, С.Е. Дзенис** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–46. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.

**Analysis of the thermal state of various modifications of the mining traction motor DC type ДТН-45/27 / V.P. Shayda, O.Yu. Yurieva, S.E. Dzenis** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improvements electrical machinery and apparatus. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 38–46. – Bibliogr: 25. – ISSN 2079-3944.

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

**Шайда Віктор Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Шайда Виктор Петрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Shaida Viktor Petrovich** – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

**Юр'єва Олена Юр'ївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Юрьева Елена Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Yurieva Olena Yuriyivna** – Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44; e-mail: ele6780@gmail.com.

**Дзеніс Сергій Євгенович** – начальник Спеціального конструкторського бюро ПАТ «Електромашина», м. Харків, тел. (057)373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru

**Дзенис Сергей Евгеньевич** – начальник Специального конструкторского бюро ПАО «Электромашина», г. Харьков, тел. (057)373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru

**Dzenis Sergii Evgenovych**, Chief of the Special Design Bureau of Public Company "Electromashina", Kharkiv, (057) 373–75–30, +380506328429, e-mail: s\_dzenis@rambler.ru

УДК 628.93.729.391.1

М.Г. БУРМА, В.М. ПОЛІЩУК, В.Ф. РОЙ

**РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ  
ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

Аналізується можливість використання методу імпульсно-фазового та широтно-імпульсного регулювання режимами роботи освітлювальних установок з метою оптимізації їх світлотехнічних та електротехнічних параметрів та підвищення надійності та енергоекономічності. Розглянуті в роботі тиристорні регулюючі пристрої з природною комутацією змінного струму в режимах ІФР та ШІР дають змогу на основі знайдених залежностей для термінів та струмів перемикачів визначити необхідні параметри систем регулювання на основі обмежувачів та вимикачів струму освітлювальних установок в режимі регулювання потужності та в залежності від типу і характеру їх навантаження.

**Ключові слова:** джерело світла, енергоефективність, освітлювальна установка, електричні кола, регулюючий пристрій, тиристорний ключ, режим роботи лампи, активне та реактивне навантаження.

Анализируется возможность использования методов импульсно-фазового и широтно-импульсного регулирования режимами работы осветительных установок с целью оптимизации их светотехнических и электротехнических параметров и повышения надёжности и энергоэкономичности. Рассмотренные в работе тиристорные регулирующие устройства с естественной коммутацией переменного тока в режимах ИФР та ШІР дають можливість на основі отриманих залежностей для часів переключення і робочих токів визначити необхідні параметри елементів систем регулювання на основі обмежувачів і вимикачів струму освітлювальних установок в режимах регулювання потужності в залежності від типу і характеру їх навантаження.

**Ключевые слова:** источник света, энергоэффективность, осветительная установка, электрические цепи, регулирующее устройство, тиристорный ключ, режим работы лампы, активная и реактивная нагрузка.

It was analysing the possibility of pulse-phase and operating regime of lighting options to optimize lighting and electrotechnical parameters and to increase the reliable and power efficiency. The thyristor options, what was considered in article, are options with natural commutation of feeding current in pulse-phase and width-pulse regimes. The analysis of commutation processes for switching times and working currents allow to determine the required parameters of the systems elements on the base of restraints and current switching on the dependence of type and load character.

**Keywords:** light sources, energy effective, light options electric circles, operating options, thyristor switch, lamp working regime, active and reactive load.

**1. Аналіз літературних джерел.** Розробка сучасних енергоекономічних систем освітлення неможлива без використання в освітлювальних установках (ОУ) сучасних систем регулювання інтенсивності світлового потоку в залежності від нормативних вимог освітлення для конкретного виду робочих приміщень. Загальноєвропейські стандарти якості освітлення DALI та DMX регламентують норми освітлення для різних умов праці, що створює можливість програмувати роботу систем освітлення в автоматичному режимі з врахуванням рівня зовнішнього освітлення. Останніми дослідженнями доведено, що найбільш ефективними методами керування режимами роботи ОУ, є системи повільного регулювання освітлення по заданій програмі, яке забезпечує рівномірний розподіл освітленості робочих поверхонь у всьому діапазоні регулювання [1]. Дослід експлуатації таких установок за кордоном свідчить, що економія електроенергії на освітлення досягає при цьому більш як 50% , що дає змогу відшкодувати витрати на впровадження таких керованих ОУ на протязі 1,5 – 2 років [2]. Зокрема, в ФРН до 80% всіх ОУ впроваджені в комплекс інженерного обладнання приміщень цифровими інтелектуальними системами світлорегулювання, які дають змогу здійснювати на протязі доби динамічну зміну світлового середовища в залежності від інтенсивності природного освітлення [3]. В нерегулюючих ОУ для компенсації зменшення світлового потоку ламп в процесі горіння, який досягає 0,6-0,8 від початкового рівня, на початку експлуатації встановлюють напругу живлення на 30% вищу, за номінальну, що призводить до збільшення втрат електроенергії і зменшення строку служби розрядних ламп.

Системи автоматичного регулювання освітлення дають змогу крім економії електроенергії, одночасно суттєво (майже удвічі) збільшити строк служби розрядних ламп [4, 5].

**2. Мета дослідження.** Керування роботою освітлювальних установок може здійснюватися дискретним або повільним регулюванням електричного режиму її джерел світла (ДС). Це висуває відповідні умови до схематехніки побудови самого регулюючого пристрою, тому виникає необхідність провести аналіз роботи таких системи з метою визначення оптимальних параметрів їх елементів і режимів роботи в залежності від типу і характеру їх навантаження. Як відомо, сучасні джерела світла ОУ поділяються на дві принципово різні групи: це теплові ДС, які являють собою активне навантаження на ланцюги ОУ і розрядні ДС, які містять в електричному ланцюгу реактивний елемент (дросель або конденсатор) що потребує окремого підходу до вибору систем керування ОУ та їх параметрів в залежності від типу навантаження освітлювальної установки.

Найбільш ефективною є система регулювання шляхом зміни форми напруги живлення (рис. 1). Потужність ДС може регулюватись, якщо вони живляться через баластні індуктивного типу і не мають в колах живлення баластних конденсаторів. При цьому компенсація коефіцієнта потужності може здійснюватись на стороні живлячої мережі, де розташований регулятор потужності. Важливим є те, що на відміну від інших типів регуляторів, де в процесі регулювання суттєво змінюється кольорова температура і індекс кольоропередачі випромінювання, – в даному випадку

така зміна практично не відбувається. Позитивним результатом роботи регуляторів з електромагнітними елементами і нестандартною формою струму є підвищена світлова віддача в режимі повільного світло-регулювання [6].

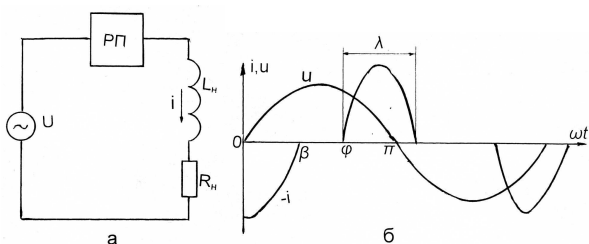


Рис. 1 – Схема контуру комутації з активно-індуктивному навантаженні і регулюючим пристроєм (а), діаграма його роботи (б).

При виборі найбільш ефективного способу регулювання світлового потоку ДС важливим фактором є також ступень лінійності його робочої характеристики, тому вибір оптимальної схеми керування ОУ повинен здійснюватись на базі комплексного врахування усіх перелічених факторів.

**3. Основна частина.** Розглянемо один з ефективних методів регулювання струму в навантаженні, який може бути застосований не тільки в регуляторах потужності ДС, але також в ключових стабілізаторах напруги та інших споживачах стабілізованого струму, а саме – регулювання в навантаженні з противо-ерс. Відмінністю таких схем є наявність в ланцюгу навантаження індуктивного, емнісного або резистивного баласту, який обмежує величину струму навантаження (рис. 2, а, б). Перша схема може використовуватися в якості стабілізаторів струму і напруги, друга – в якості регулятора режиму роботи ДС [7].

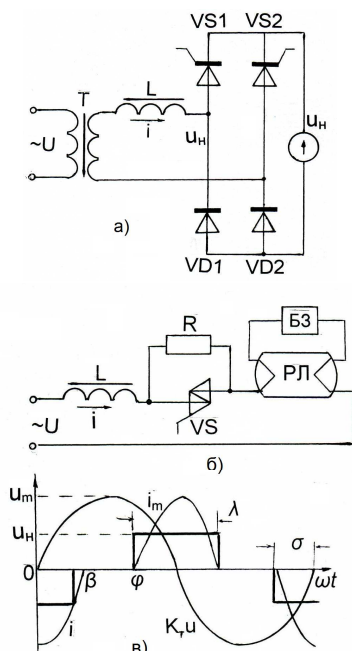


Рис. 2 – Регулюючі тиристорні пристрої з індуктивним баластом (а) та діаграма їх роботи (б).

Регулювання величини струму навантаження здійснюється або методом імпульсно-фазового (ІМФ), або широтно-імпульсного регулювання (ШІР), які відрізняються лише тривалістю часу  $t_b$  імпульсного ввімкнення силового тиристора VS (при ІФР  $t_b < T/2$ , а при ШІР  $t_b > T/2$ ) [8]. В інтервалі ввімкненого стану VS ( $\frac{\varphi}{\omega} \leq t \leq \frac{\varphi + \lambda}{\omega}$ ), де  $\lambda, \varphi$  – кути ввімкнення і провідності VS (рис. 2, в). Здійснюючи апроксимацію напруги живлення ДС  $u_n$  еквівалентним генератором прямокутної напруги  $U_n$ , для схеми рис. 2, б отримуємо рівняння, яке справедливе без урахування струму резистора R та не ідеальності дроселя L і трансформатора T [9]

$$\kappa_m u = \kappa_m U_m \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + U_n, \quad (1)$$

де  $\kappa_m = W_1/W_2$ , ( $W_1, W_2$  – первинні і вторинні витки трансформатора T);  $\kappa_m = 1$  для обох схем рис. 1, а, б.

Рішення рівняння (1) з початковою умовою  $i(0) = 0$  має вигляд

$$i = \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\omega L} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) - v \omega t], \quad (2)$$

де  $v = \frac{U_n}{\kappa_m U_m}$ . При цьому напруга на дроселі L

$$u_{dp} = L \frac{di}{dt} = \kappa_m U_m [\sin(\omega t + \varphi) - v]. \quad (3)$$

Кут провідності  $\lambda$  тиристора визначаємо з рівняння (2) при умові  $i = 0$

$$\lambda = \pi - \varphi + \beta, \quad (4)$$

де  $\beta = v + \sqrt{v^2 + 2[1 + \cos \varphi - v(\pi - \varphi)]}$ .

Граничне значення кута  $\beta = \beta_{max}$ , яке відповідає режиму без пауз струму в навантаженні ( $\varphi = \beta_{max}$ ,  $\lambda = \pi$ ),  $\beta_{max} = \arccos(\pi v / 2)$ , звідки  $v < 2 / \pi$ .

Діапазон зміни кута ввімкнення  $\varphi$  регулятора при роботі з паузами струму в навантаженні (режим ІФР)

$$\beta_{max} \leq \varphi \leq \pi - \sigma,$$

де  $\sigma = \arcsin v$  – кут, при якому виконується умова  $u = U_n$ .

Значення кута  $\varphi_0 = \pi - \varphi - \sigma$ , при якому амплітуда струму  $i$  досягає максимальної величини, знаходимо досліджуючи залежність (2) на екстремум

$$I_m = \frac{\kappa_m U_m}{\omega L} [\cos \varphi + \cos \sigma - v(\pi - \varphi - \sigma)]. \quad (5)$$

Без врахування струму резистора, величини середніх значень струму  $I_{cp}$ , потужності P та діючої величини струму навантаження  $I_D$  визначаємо з наступних рівнянь:

$$I_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^\lambda i d\varphi = \quad ; \quad (6)$$

$$= \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\pi \omega \cdot L} [\lambda \cos \varphi - \sin(\lambda + \varphi) + \sin \varphi - \lambda^2 v / 2]$$

$$I_D = \frac{\kappa_m \cdot U_m}{\sqrt{\pi} \omega L} [\lambda / 2 - 2\lambda v^2 + \lambda^3 v^2 / 3 +$$

$$+ (\lambda \cos \varphi + 2 \sin \varphi)(\cos \varphi - \lambda v) + (\sin 2\beta + 3 \sin 2\varphi) / 4]^{1/2}$$

$$P = I_{cp} U_n; \quad \varphi = \omega t.$$

Значення граничних величин параметрів  $I_m = I_{mmax}$ ,  $I_{cp} = I_{cpmax}$ ,  $I_{\theta} = I_{\theta max}$ , які виникають при роботі регулятора в режимі без пауз струму в навантаженні ( $\lambda = \pi$ ,  $\beta = \beta_{max} = \varphi$ ) наведені в табл. 1, а на рис. 3, а, б розрахунків залежності для  $I_m = f(\varphi)$  та  $P = f(\varphi)$ .

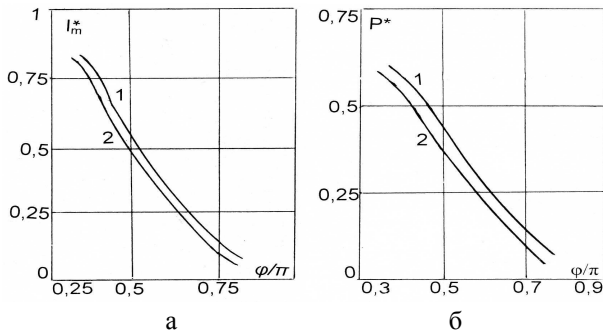


Рис. 3, а – Залежність амплітуди струму навантаження  $I^* = I_m / (k_T U_m / \omega L)$  (відн. один.) від кута комутації  $\varphi$  тиристора при значеннях параметра  $v = 0,3$  (1) і  $v = 0,35$  (2); б – залежність потужності навантаження  $P^* = P / (v k_T^2 U_m^2 / \omega L)$  (відн. один.) від кута комутації  $\varphi$  тиристора при значеннях параметра  $v = 0,3$  (1) і  $v = 0,35$  (2).

Форма струму в навантаженні наближена до синусоїдальної і при апроксимації її еквівалентною синусоїдою з кутовою частотою  $\omega = \pi \omega / \lambda$  і амплітудою  $I_m$  з виразу (5) отримуємо спрощені вирази, які зручні для розрахунків:

$$I_{cp} = \frac{2\lambda}{\pi^2} I_m; I_{\theta} = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} I_m; P = \frac{2\lambda I_m U_H}{\pi^2}. \quad (7)$$

Коефіцієнти амплітуди струму  $\kappa_a = I_m / I_{cp}$  і форми  $\kappa_{\phi} = I_{\theta} / I_{cp}$  дорівнюють:

$$\kappa_a = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda}}, \kappa_{\phi} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\lambda}}. \quad (8)$$

З врахуванням апроксимації граничні величини параметрів при  $\lambda = \pi$  мають вигляд:

$$I_{cpmax} = \frac{2}{\pi} I_m; I_{\theta max} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; P_{max} = \frac{2 I_m U_m}{\pi} \quad (9)$$

Напруга на виході регулюючого пристрою в режимі ІФР у випадку навантаження з противо-ерс  $U_H$

$$U_{лин} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - U_H \quad (10)$$

При цьому середнє  $U_{лин cp}$  і діюче значення  $U_{лин \theta}$  величини вихідної напруги:

$$U_{лин cp} = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H) d\varphi = \frac{1}{\pi} \{ U_m [\cos \varphi - \cos(\varphi+\lambda)] - U_H \lambda \}, \quad (11)$$

$$U_{лин \theta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H)^2 d\varphi} = (1/\sqrt{\pi}) \{ (U_m^2/2 + U_H^2)\lambda + U_m^2/4 \} \sin 2\varphi - \sin 2(\varphi + \lambda) + 2U_m U_H [\cos(\varphi + \lambda) - \cos \varphi] \}^{1/2}, \quad \varphi = \omega t.$$

Таблиця 1 – Екстремальні параметри регулятора струму

Параметр	Математичний вираз параметру
$I_{mmax}$	$\frac{\kappa_m U_m}{\omega L} \left[ \sqrt{1-v^2} - \frac{\pi v}{2} + v \left( \arccos \frac{\pi v}{2} + \arcsin v \right) \right]$
$I_{cpmax}$	$\frac{2\kappa_m U_m}{\pi \omega L} \sqrt{1 - \left( \frac{\pi v}{2} \right)^2}$
$I_{\theta max}$	$\frac{\kappa_m U_m}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{2} + v^2 \left( \frac{\pi^2}{12} - 2 \right)}$
$U_{лин cp}$	$\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H) d\varphi$
$U_{лин \theta}$	$\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\lambda} (U_m \sin \varphi - U_H)^2 d\varphi}$

При відносно невеликих струмах навантаження в режимі ІФР замість індуктивного може використовуватись резистивний баласт [10] (рис. 4). При цьому, струм навантаження на протязі ввімкненого стану силового тиристора VS (рис. 3)  $\varphi/\omega \leq t \leq \varphi_{max}$

$$i = \frac{\kappa_m U_m}{R} [\sin(\omega t + \varphi) - v]. \quad (13)$$

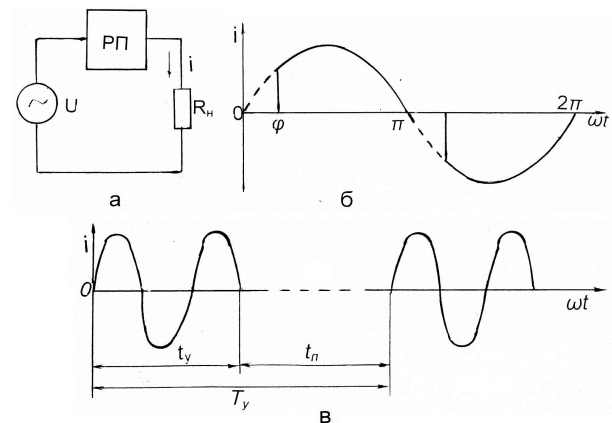


Рис. 4 – Схема контуру комутації з регулюючим пристроєм і активному навантаженні (а) та діаграми струму при ІФР (б) і ШІР (в).

Цей режим може бути реалізований при змінах кута ввімкнення пристрою в інтервалі кутів

$$\varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$$

$$(\varphi_{min} = \arcsin v;$$

$$\varphi_{max} = \arcsin 2\cos v).$$

Кут провідності  $\lambda$  ІФР, визначений з умови  $i = 0$ , дорівнює  $\lambda = \varphi_{max} - \varphi$

При цьому, величина середнього і діючого значення струму навантаження, відповідно дорівнюють:

$$I_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i d\varphi = \frac{\kappa_m U_m}{\pi R} [-\lambda v + \cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi)]; \quad (14)$$

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} i^2 d\varphi} = \quad (15)$$

$$= \frac{\kappa_m U_m}{\sqrt{\pi R}} \left\{ \lambda v^2 - 2v[\cos \varphi - \cos(\lambda + \varphi)] + \lambda/2 - \frac{1}{4} \sin 2\lambda \right\}^{\frac{1}{2}}$$

тут  $\varphi = \omega t$ .

Максимальних значень струми  $I_{cp \max}$  та  $I_{\partial \max}$  набувають при кутах  $\varphi = \varphi_{\min}$ .

**Висновки.** Розглянуті в статті режими роботи тиристорних регулюючих пристроїв для ОУ з природною комутацією змінного струму в режимах ІФР та ШПР дають змогу на основі знайдених залежностей для термінів та струмів перемикачів визначити необхідні параметри елементів обмежувачів та вимикачів струму в залежності від характеру навантаження. Аналіз отриманих залежностей дає змогу визначити оптимальні параметри електричних кіл розробляємих систем регулювання з реакторними або резисторними обмежувачами амплітуди струму в залежності від типу ДС ОУ. Дослідження комутаційних процесів при імпульсно-фазовому і широтно-імпульсному регулюванні струму при активних і активно-індукційних навантаженнях дають змогу визначити і розрахувати оптимальні параметри відповідних електричних схем таких систем, що забезпечують найбільшу ефективність їх використання.

#### Список література

1. Поскребка А.А. Бесконтактные коммутационные и регулирующие полупроводниковые устройства // М. – Энергия. – 1989. – 362 с.

2. Краснополяский А.Е., Соколов В.Б. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп // М.: Энергоатомиздат. – 1999. – 207 с.
3. Бенцигер Т.Д. Светорегулирование в осветительных системах // Светотехника. – 2002. – № 1. – С. 27-30.
4. Соловьев А.К. Автоматическое регулирование искусственного освещения и его эффективность // Светотехника. – 1999. – № 5. – С. 2-5.
5. Marx P., Karstadt B., Albert D. A dimmable Electronic HF-Ballast for Fluorescent Lamps. Lux-europa. April/1999. p. 87-90.
6. Фомин Ф.Г. Системы автоматизированного управления освещением общественных зданий // Новости светотехники. Дом света. – М. – 1998. – 231 с.
7. INTELUX Manual Edition // 9906 D, Page 17.
8. Сосков А.Г. Колонтаевський Ю.П. Промислова електроніка: Підручник / за ред. Соскова А.Г. – К.: Каравелла, 2013. – 496 с.
9. Колонтаевський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник / за ред. Соскова А.Г. – К.: Каравелла, 2007. – 384 с.
10. Флоренцев С.Н. Состояние и тенденции развития силовых IGBT-модулей. Электротехника. 2008, №4, С. 27-35.

#### References (transliterated)

1. Poskrebko A.A. Non-contact switching and regulating semiconductor devices. M. – Energia. – 1989. – 362 p.
2. Krasnopolsky AE, Sokolov V.B. Control gear for discharge lamps. M. : Energoatomizdat. – 1999. – 207 p.
3. Benzyeger TD Light regulation in lighting systems // Cvetotekhnika. – 2002. – No 1. – P.27-30.
4. Soloviev A.K. Automatic control of artificial lighting and its effectiveness. Light engineering. – 1999. – No 5. – p.2-5.
5. Marx P., Karstadt B., Albert D. A dimmable Electronic HF-Ballast for Fluorescent Lamps. Lux-europa. April/1999. p.87-90.
6. Fomin F.G. Systems of automated control of lighting of public buildings. News of lighting engineering. House of light. – M. – 1998. – 231 p.
7. INTELUX Manual Edition. 9906 D, Page 17.
8. Soskov A.G. Kolontaevsky Yu.P. Промислова електроніка: Підручник. for the red. Soskova A.G. – К.: Caravel, 2013. – 496 p.
9. Kolontaevsky Yu.P., Soskov A.G. Electronics and microcircuitry: A textbook. ed. Soskova A.G. – К.: Caravel, 2007. – 384 p.
10. Florentsev S.N. Status and development trends of power IGBT-modules. Electrical engineering. 2008, No. 4, pp. 27-35.

Поступила (received) 21.07.2017

#### Бібліографічні описи/Библиографические описания/Bibliografic descriptions

**Регулювання режимами роботи електричних кіл освітлювальних установок / М.Г. Бурма, В.М. Поліщук, В.Ф.Рой** // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 47–51. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

**Регулювання режимами работы электрических цепей осветительных установок / Н.Г. Бурма, В.Н. Поліщук, В.Ф. Рой** // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 47–51. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

**Regulation regime functioning electric circuit illuminating plant (systems) / N. Burma, V. Polichuk, V. Roy** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 47–51. – Bibliography: 10. – ISSN 2079-3944.

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

**Бурма Микола Гаврилович** - кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. Е. Веркіна НАНУ: Харків: тел. (057) 707-33-16; e-mail: burma @ ilt kharkov. ua. ORCID ID 0000-0003-3925-0499

**Бурма Николай Гаврилович** - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт низких температур им. Б. Е. Веркина НАНУ: Харьков: тел. (057) 707-33-16; e-mail: burma @ ilt kharkov. ua. ORCID ID 0000-0003-3925-0499

**Burma Nikolay Gavrilovich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences Sttnior Researcher. B.Verkin Institute for Lov Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kharkov, tel.:(057)707-33-16; e-mail : burma@kharcov.ua.

**Полищук Валентина Миколайовна** - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету ЕОМ, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, e-mail- [spets-sovet@gmail.ru](mailto:spets-sovet@gmail.ru) ORCID ID 0000-0005-7056-1643

**Полищук Валентина Николаевна** - кандидат технических наук, доцент, декан факультета ЭОГ, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н.Бекетова, e-mail- [spets-sovet@gmail.ru](mailto:spets-sovet@gmail.ru) ORCID ID 0000-0002-7059-1454

**Polichuk Valentyna Nikolaevna** - Candidate of Technical Sciences, Dean of faculty EOG, O.V.Beketov National University of Urban Economy in Kharkov; Kharkov, e-mail: [spets-sovet@gmail.ru](mailto:spets-sovet@gmail.ru). ORCID ID 0000-0002-7059-1454

**Рой Віктор Федорович** – доктор фізикоматематичних наук, професор кафедри СЕЕМ, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, тел. 7010232, e-mail-vicktor. [Roj@gmail.com](mailto:Roj@gmail.com). ORCID ID 0000-0002-9001-9308

**Рой Виктор Федорович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры СЭЭГ, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н.Бекетова, тел. 7010232, e-mail-vicktor. [Roj@gmail.com](mailto:Roj@gmail.com). ORCID ID 0000-0002-9001-9308

**Roy Victor Fedorovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences Full Professor at the Department of Electricity cites, O.V.Beketov National University of Urban Economy in Kharkov; Kharkov, tel:7010232, e-mail:-vicktor. [Roj@gmail.com](mailto:Roj@gmail.com). ORCID ID 0000-0002-9001-9308

УДК 621.316.13

**П.Г. ПЛЄШКОВ, Ю.А. ЛЕВАНЦОВА, В.В. ЗІНЗУРА****ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ НАПРУГ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

Запропоновано підхід до автоматичного керування режимами напруг розподільних електричних мереж, що містять силові трансформатори з безконтактними пристроями регулювання напруги під навантаженням, який базується на вирішенні задачі багатокритеріальної оптимізації. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування та її комп'ютерну імітаційну модель. Результати проведених досліджень ефекту від застосування розробленої системи автоматичного керування показали, що застосування цієї системи дозволяє досягти одночасного зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг в мережі.

**Ключові слова:** система автоматичного керування, багатокритеріальна оптимізація, розподільна електрична мережа.

Предлагается подход к автоматическому управлению режимами напряжений распределительных электрических сетей, которые содержат силовые трансформаторы с бесконтактными устройствами регулирования напряжения под нагрузкой, который базируется на решении задачи многокритериальной оптимизации. Разработана структурная схема системы автоматического управления и ее компьютерную имитационную модель. Результаты проведенных исследований эффекта от применения разработанной системы автоматического управления показали, что применение этой системы позволяет достичь одновременного снижения уровней установившегося отклонения и несимметрии напряжений в сети.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, многокритериальная оптимизация, распределительная электрическая сеть.

An approach is proposed to control the voltage regimes of distribution electrical networks containing power transformers with noncontact on-load tap changers, which is based on the solution of the multicriteria optimization problem. The structural scheme of the system of automatic control of voltage regimes of distribution electrical networks is developed, which is based on the solution of the problem of multicriteria optimization. A computer simulation model of the automatic control system was developed, through which the stability of the proposed system was studied. The study of the effect of the application of the developed system of automatic control of voltage regimes by computer simulation has shown that the application of the developed system of automatic control of voltage regimes of distribution electrical networks, allows, unlike existing ones, to achieve simultaneous reduction of the levels of steady deviation and voltage asymmetry due to phase change transformation transform coefficients according to the developed control law.

**Keywords:** automatic control system, multicriteria optimization, distribution electrical network.

**Вступ.** Характерною рисою сьогодення є загострення проблеми підвищення економічності та надійності роботи обладнання, що експлуатується промисловими підприємствами України. З цієї проблемою тісно пов'язане питання зниження рівнів показників якості електричної енергії (ПЯЕ), що характеризують відхилення та несиметрію напруг в розподільних електричних мережах (РЕМ). Тому задача розробки нових методів та засобів зниження рівня цих ПЯЕ які, з одного боку, були б досить ефективними, а з іншого – не вимагали б значних капіталовкладень є досить актуальною. Одним із шляхів вирішення даної задачі є удосконалення систем автоматичного керування режимами напруг РЕМ, що містять силові трансформатори, які оснащені регулюючими пристроями, насамперед пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН).

Слід зазначити, що стрімкий розвиток силовій електроніки в останні роки дозволив створити потужні силові напівпровідникові ключі, які розраховані на протікання відносно великих значень струмів. Однією із областей застосування таких напівпровідникових пристроїв є модернізація пристроїв перемикачів без збудження силових трансформаторів напругою 10/0,4 кВ та створення на їх основі безконтактних пристроїв РПН. Такі безконтактні пристрої РПН силових трансформаторів, окрім очевидних переваг (більш висока швидкодія, простота в обслуговуванні та ін.) мають ще одну: з їх допомогою можливо змінювати коефіцієнт трансформації силового трансформатора в кожній фазі окремо. Це дає змогу впливати не лише на рівні усталеного відхилення напруги, але і на рівні несиметрії напруг на стороні низької напруги (НН) силового трансформатора. В зв'язку з цим актуальним постає питання розробки системи автоматичного керування режи-

мами напруги РЕМ, яка б враховувала можливості безконтактного пристрою РПН до пофазної зміни коефіцієнта трансформації з метою одночасного зниження рівнів усталеного відхилення та несиметрії напруг.

**Аналіз публікацій.** Задача удосконалення САК режимами напруг РЕМ, що містять трансформатори з безконтактними пристроями РПН з метою одночасного зменшення рівнів відхилення та несиметрії напруг розглядалась в [1-5]. У роботі [3] запропоновано математичну модель керування режимами напруги РЕМ, що містять силові трансформатори з безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора, в основу якої покладено математичний апарат багатокритеріальної оптимізації. У роботі [2] теоретично обґрунтовано метод розв'язку подібного класу задач керування. Проте, для визначення ефективності обраного методу розв'язку необхідно на основі запропонованої в [3] математичної моделі керування розробити САК режимами напруг, а також провести дослідження стійкості даної САК та визначити ефект від її застосування.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка та дослідження роботи САК режимами напруг РЕМ, що містять силові трансформатори із безконтактними пристроями РПН зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», що базується на розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації.

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити структурну схему САК режимами напруг РЕМ, що містять силові трансформатори із безконтактними пристроями РПН зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем», що базується на розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації;
- створити комп'ютерні імітаційні моделі розро-





На рис. 1:  $\underline{U}_{ВН} = [\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}]$  – вектор комплексів фазних напруг на стороні ВН;  $\underline{U}_{НН} = [\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c, \underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}]$  – вектор комплексів фазних та лінійних напруг на стороні НН;  $\underline{U}_{ННв} = [U_a, U_b, U_c, U_{ab}, U_{bc}]$  – вектор вимірних діючих значень фазних та лінійних напруг на стороні НН;  $\xi$  – вектор задаючих параметрів;  $\mathbf{K}^{opt} = (k_{AB}, k_{BC}, k_{CA})$  – оптимальний вектор керування;  $\mathbf{N}^{opt} = (n_{AB}, n_{BC}, n_{CA})$  – вектор значень відгалужень обмотки силового трансформатора, що відповідають  $\mathbf{K}^{opt}$ ;  $\mathbf{K}^{opt'}$  – оптимальний вектор керування, розрахований на попередньому кроці роботи САК; 1 – силовий трансформатор; 2 – система імпульсно-фазового керування напівпровідниковими ключами пристрою РПН; 3 – первинний вимірювальний перетворювач трьохфазної напруги; 4 – блок розрахунку вектору  $\underline{U}'_{ВН} = [\underline{U}'_{AB}, \underline{U}'_{BC}, \underline{U}'_{CA}]$ ; 5, 6, 7, 8 – блоки розрахунку  $\Delta U_{1ут}, U_{2ут}, U_{0ут}, \Delta U_{фiут}$  відповідно; 9 – блок визначення оптимального вектору керування  $\mathbf{K}^{opt}$ ; 10 – блок дискретизації значень коефіцієнтів трансформації; 11 – блок часової затримки сигналу.

САК, структурна схема якої зображена на рис. 1, працює наступним чином. Виміряне значення вектора  $\underline{U}_{ННв}$  разом із значенням  $\mathbf{K}^{opt'}$ , надходить до блоку 4, в якому відбувається розрахунок вектора  $\underline{U}'_{ВН}$ . Далі значення  $\underline{U}'_{ВН}$ , разом із значеннями  $U_{ном}, U_{ф.ном}, K_{мін}, K_{маx}$  надходять до блоків 5 і 6, 7, 8, в яких відбувається розрахунок  $\Delta U_{1ут}, U_{2ут}, U_{0ут}, \Delta U_{фiут}$  відповідно. Після чого дані з блоків 4, 5, 6, 7, 8 разом із значеннями вектору  $\xi$  надходять до блоку 9, в якому визначається кінцевий розв'язок  $\mathbf{K}^{opt}$  задачі (1). Значення вектора  $\mathbf{K}^{opt}$  з блоку 9 надходить до блоку затримки сигналу 11 з якого на наступному кроці розрахунку надходить до блоку 4. Також, значення  $\mathbf{K}^{opt}$  разом із значенням  $\Delta K$  надходять до блоку дискретизації 10, після якого надходить до виконавчого пристрою 2, який виконує перемикання відпайок обмоток трансформатора, встановлюючи регулюючі відгалуження  $\mathbf{N}^{opt}$ .

Для визначення ефекту від застосування розробленої САК, а також з метою дослідження її на стійкість було проведено розробку відповідної їй комп'ютерної імітаційної моделі. Загальний вигляд схеми комп'ютерної моделі САК в середовищі Matlab/Simulink наведено на рис. 2.

На рис 2: « $U_{ABC}$ » – модель живлячої мережі (блок вихідних даних); « $U_{AB\_BC\_CA}$ » – блок вихідних даних; «Трансформатор» – модель силового трансформатора ТМН-2500/10 зі схемою з'єднання обмоток «трикутник/зірка з нулем»; «Вимірювач ВН» – модель вимірювача ПЯЕ на стороні ВН; «Вимірювач НН» – модель вимірювача ПЯЕ на стороні НН; «ДН» – модель дільника напруги; «Регулятор РПН» – модель пристрою прийняття керуючого рішення.

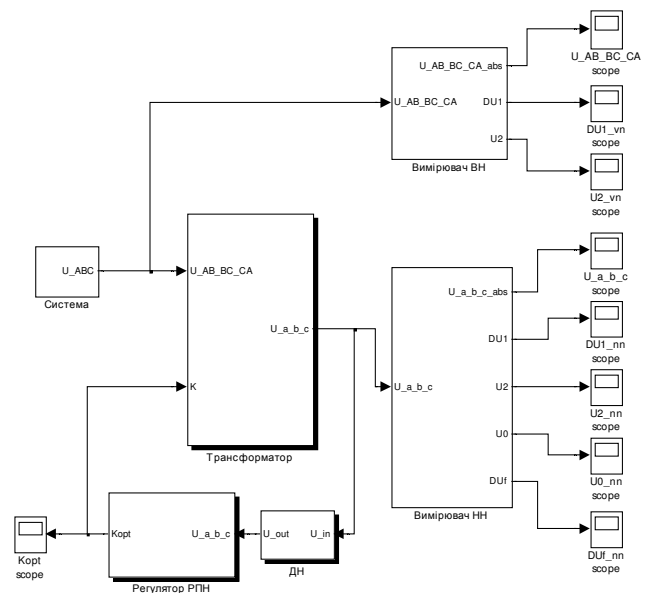


Рис. 2 – Схема узагальненої комп'ютерної імітаційної моделі САК режимами напруг РЕМ в середовищі Matlab Simulink

Так як розроблена САК є суттєво нелінійною, це практично унеможливує застосування для дослідження її стійкості традиційних алгебраїчних або частотних критеріїв.

Тому дослідження стійкості розробленої САК найдоцільніше провести шляхом аналізу перехідних процесів, які у випадку її стійкої роботи матимуть затухаючий характер.

Як відомо, для отримання перехідної характеристики  $h(t)$  необхідно на вхід системи подати одиничний ступінчатий сигнал при нульових початкових умовах. Найдоцільніше отримати перехідні характеристики розробленої САК шляхом комп'ютерного моделювання, скориставшись її комп'ютерною імітаційною моделлю.

Графіки перехідних процесів в САК отримані шляхом комп'ютерного моделювання при їх аперіодичному характері наведені на рис. 3.

Як видно з графіків, що наведені на рис. 3, перехідний процес в САК, що виникає під дією ступінчатих збурень, має затухаючий характер, що свідчить про стійкість розробленої САК. Слід зазначити, що результати моделювання для випадку коливального характеру перехідного процесу також свідчать про достатній запас стійкості розробленої САК.

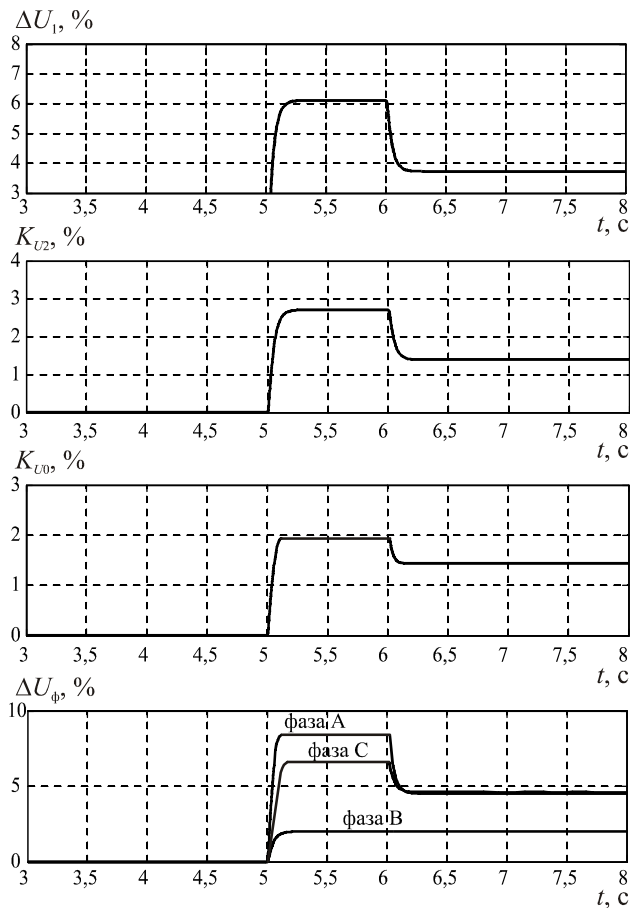


Рис. 3 – Графіки перехідних процесів САК

Як зазначалось вище, для визначення ефекту від застосування розробленої САК найдоцільніше скористатись розробленою її комп'ютерною моделлю. В якості вхідних параметрів для моделювання використовувались результати експериментальних замірів параметрів електричного режиму (лінійних та фазних напруг), проведених в розподільчих електричних мережах ПАТ «Кіровоградобленерго» за допомогою сучасного сертифікованого аналізатора мережі FLUKE 1744 Memobox.

В якості базової моделі для порівняння була обрана модель САК, блок прийняття керуючого рішення якої працює згідно відомого закону зустрічного регулювання напруги.

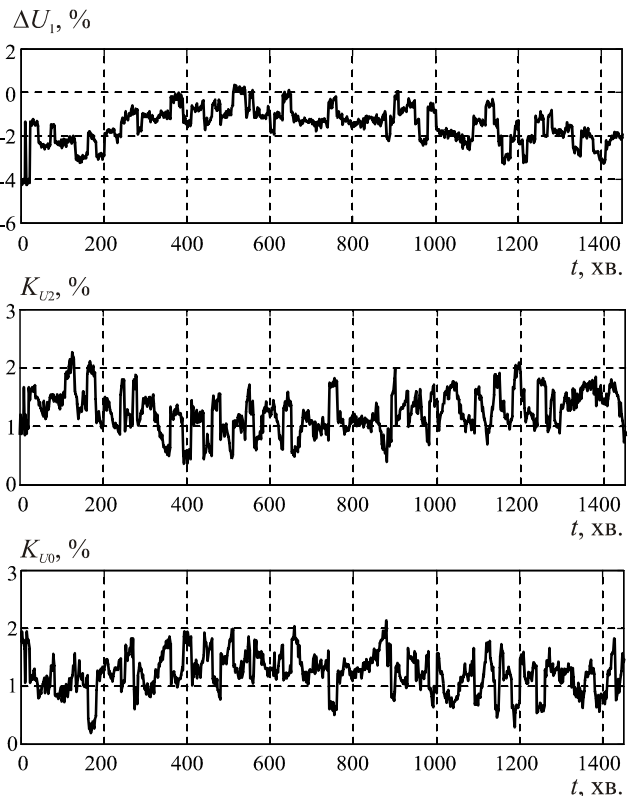
Комп'ютерне моделювання роботи САК режимами напруг РЕМ полягало в наступному. Для кожного вимірювання параметрів режиму розраховувались вектори керування та параметри режиму на стороні НН силового трансформатора, що встановлюються після регулювання, для двох випадків:

- при використанні в САК базової моделі блоку прийняття керуючого рішення;
- при використанні в САК розробленої в роботі моделі блоку прийняття керуючого рішення

Розроблені комп'ютерні моделі дозволяють розраховувати та запам'ятовувати значення ПЯЕ, що дало змогу провести їх подальшу статистичну обробку та представити їх у вигляді графіків. Для проведення моделювання було взято масив даних, період вимірювання яких склав одну добу.

Графічні залежності зміни усталеного відхилення трифазної напруги  $\Delta U_1$ , коефіцієнтів несиметрії по

зворотній  $K_{U2}$  та нульовій  $K_{U0}$  послідовностях, отримані в результаті комп'ютерного моделювання для варіанту запропонованої в роботі САК режимами напруг розподільних електричних мереж наведені на рис. 4.

Рис. 4 – Графіки зміни  $\Delta U_1$ ,  $K_{U2}$  та  $K_{U0}$  на стороні НН силового трансформатора при роботі розробленої САК

Результати статистичної обробки ПЯЕ результатів комп'ютерного моделювання для базової та розробленої САК, а також результати статистична обробка вхідних даних наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки ПЯЕ по варіантах моделювання, що розглядалися

№ з/п	ПЯЕ	Кількість потраплянь в норм. допуст. межі	Кількість не потраплянь в норм. допуст. межі	Інтегральна ймовірність $P(x < x_{нд.}), в.о.$
<i>Сторона ВН силового трансформатора</i>				
1.	$\Delta U_1$	181	1259	0,13
2.	$K_{U2}$	949	491	0,66
<i>Сторона НН силового трансформатора (базова модель САК)</i>				
3.	$\Delta U_1$	1440	0	1
4.	$K_{U2}$	847	593	0,66
5.	$K_{U0}$	1417	23	0,98
6.	$\Delta U_a$	1440	0	1
7.	$\Delta U_b$	1440	0	1
8.	$\Delta U_c$	1440	0	1
<i>Сторона НН силового трансформатора (розроблена модель САК)</i>				
9.	$\Delta U_1$	1440	0	1
10.	$K_{U2}$	1413	27	0,98
11.	$K_{U0}$	1436	4	0,99
12.	$\Delta U_a$	1440	0	1
13.	$\Delta U_b$	1440	0	1
14.	$\Delta U_c$	1440	0	1

Як видно з результатів моделювання та подальшої статистичної обробки ПЯЕ, вихідний режим (напряг на стороні ВН силового трансформатора), характеризується значними відхиленнями від гранично допустимих значень ПЯЕ, встановлених ГОСТ 13109-97 як по  $\Delta U_1$  ( $P(\Delta U_1 < 5\%) = 0,13$ ), так і по  $K_{U2}$  ( $P(K_{U2} < 2\%) = 0,66$ ).

При застосуванні базової моделі спостерігається зниження лише рівня  $\Delta U_1$  на стороні НН ( $P(\Delta U_1 < 5\%) = 1$ ), проте, рівні  $K_{U2}$  на стороні НН залишаються далеко за межами гранично допустимих значень ( $P(K_{U2} < 2\%) = 0,66$ ). Результати моделювання запропонованої в роботі моделі САК показують, що при її застосуванні спостерігається одночасне зниження рівнів  $\Delta U_1$  ( $P(\Delta U_1 < 5\%) = 1$ ) і  $K_{U2}$  ( $P(K_{U2} < 2\%) = 0,98$ ) на стороні НН силового трансформатора. Значення відхилень фазних напруг  $\Delta U_a$ ,  $\Delta U_b$ ,  $\Delta U_c$  як при застосуванні базової моделі так і при застосуванні запропонованої в роботі не перевищують нормально допустимі. Також, при застосуванні запропонованої САК спостерігається покращення значення  $K_{U0}$  ( $P(K_{U0} < 2\%) = 0,99$ ) в порівнянні з базовою моделлю ( $P(K_{U2} < 2\%) = 0,98$ ). З цього можна зробити висновок про ефективність запропонованої САК в порівнянні з базовою.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Задачу керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж напругою 0,4 кВ найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

2. Розроблена на основі розв'язку задачі керування структурна схема САК режимами напруг РЕМ дозволила створити її комп'ютерну імітаційну модель, яка дають змогу проводити аналіз роботи розробленої САК.

3. Аналіз перехідних процесів запропонованої в роботі САК режимами напруг РЕМ, проведений шляхом застосування її комп'ютерної імітаційної моделі показав, що перехідні процеси виявилися затухаючими як за аперіодичного, так і за коливального їх характеру. З цього можна зробити висновок про достатній запас стійкості запропонованої в роботі САК.

4. Аналіз ефекту від застосування розроблених САК режимами напруг РЕМ показав, що запропонована в роботі САК здійснює керування, за яких спостерігається зниження рівня не лише усталеного відхилення напруг, але і рівнів несиметрії напруг. Це, безумовно, свідчить про її більш високу ефективність в порівнянні з відомими САК режимами напруг РЕМ.

#### Список літератури

1. Пleshков П. Г. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм / П. Г. Пleshков, В. В. Зінзура, М. В. Кубкін // Збірник наукових

праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / Вип. 24, ч. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 164-173.

2. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25.Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 350-360.
3. Зінзура В. В. Задача багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричній мережі з глухозаземленою нейтраллю. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Вип. 25.Ч.2 – Кіровоград: КНТУ, 2012. С. 227-234.
4. Зінзура В. В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного управління пристроєм РПН силового трансформатора // Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний інститут. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ ХПІ, 2012. – № 3. – С. 99-109.
5. Бурбело М. Й. Застосування багатокритеріальної оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах / М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – № 6. – С. 76 – 79.

#### References (transliterated)

1. Plieshkov P. H. Teoreticheski zasady optimalnogo keruvannya prystroiem RPN sylovoho transformatora za vektornym kryteriiem. [Theoretical principles of optimal control of the OLTC of the power transformer by the vector criterion] *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia*. Vol. 24. Part.2. Kirovohrad: KNTU, 2011. 164-173.
2. Zinzura V. V. Metody rozv'iazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehulivuvannya napruhy v elektrychnykh merezhakh [Methods of solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electric networks]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia*. Vol. 25. Part.1 Kirovohrad: KNTU, 2012. 350-360. Print.
3. Zinzura V. V. Zadacha bahatokryterialnoi optymizatsii rehulivuvannya napruhy v elektrychnii merezhi z hlukhozazemlenoiu neutralliu [The task of multicriterial optimization of voltage regulation in an electric network with a deeply grounded neutral]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia*. Vol. 25. Part.2 Kirovohrad: KNTU, 2012. 227-234. Print.
4. Zinzura V. V. Rozrobka ta doslidzhennia roboty systemy avtomatynchoho upravlinnia prystroiem RPN sylovoho transformatora [Development and research of the system of automatic control of the OLTCe of the power transformer]. *NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection*. – Kharkov : NTU "KhPI", 2012. – No 3. – P. 99-109.
5. Burbelo M. Y. Zastosuvannya bahatotsilovoi optymizatsii dlia symetruvannya ta zmenshennia vidkhylen napruh v elektrychnykh merezhakh [Multi-Purpose Optimization to Simulate and Reduce Voltage Deviations in Electric Networks]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2005. – No 6. – P. 99-109.

Надійшла (received) 05.09.2017

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

**Оптимальне керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж із використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторів / П. Г. Пleshков, Ю. А. Леванцова, В. В. Зінзура // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 56-61. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Оптимальное управление режимами напряжений низковольтных распределительных электрических сетей с использованием регулирующих устройств силовых трансформаторов / П. Г. Плешков, Ю. А. Леванцова, В. В. Зинзура // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 56-61. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Optimal control of voltage modes of low-voltage distribution electric networks with use of regulatory devices of th power transformers / P. H. Plieshkov, Y. A. Levantsova, V. V. Zinzura // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 34 (1256). – P. 56-61. Bibliography: 5. – ISSN 2079-3944.**

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

**Плешков Петро Григорович** – кандидат технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Плешков Петр Григорьевич** – кандидат технических наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет, заведующий кафедрой электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Plieshkov Petro Gryhorovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Central Ukrainian National Technical University, Head of the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Леванцова Юлія Анатоліївна** – студентка, Центральноукраїнський національний технічний університет, кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61.

**Леванцова Юлия Анатольевна** – студентка, Центральноукраинский национальный технический университет, кафедра электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61.

**Levantsova Yuliia Anatoliivna** – student, Central Ukrainian National Technical University, department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61.

**Зинзура Василь Васильович** – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: vasilyzinzura@gmail.com.

**Зинзура Василий Васильевич** – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, доцент кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: vasilyzinzura@gmail.com.

**Zinzura Vasily Vasilyevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: vasilyzinzura@gmail.com.

УДК 621.311.1: 621.316.37

П.Г. ПЛЄШКОВ, О.І. СІРІКОВ, А.І. КОТИШ

## РАДІОФІКСАТОР КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 110 – 150 кВ

Запропоновано на базі розробленого пристрою електромеханічного фіксатора короткого замикання для повітряних мереж напругою 110-150 кВ запровадження радіоканала для передачі інформації про стан мережі до чергового персоналу

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередач, коротке замикання, фіксатор, електрична мережа.

Предложено на базе разработанного устройства электромеханического фиксатора короткого замыкания для воздушных сетей напряжением 110-150 кВ применение радиоканала для передачи информации о состоянии сети дежурному персоналу

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, короткое замыкание, фиксатор, электрическая сеть.

The article is dedicated to improving reliability of electric networks with voltage 110-150 kV by application developed special devices latch short circuit. It is proposed on the basis of the developed device of an electromechanical short-circuit breaker for air networks with a voltage of 110-150 kV, the use of a radio channel for transmitting information about the status of the network to duty personnel

**Keywords:** air power line, short circuit, lock, electrical network.

**Вступ.** Найбільш складною, а як правило й найбільш тривалою технологічною операцією по встановленню пошкодженої частини мережі є визначення місця пошкодження (ВМП). Це повсякденна оперативна задача диспетчерських служб електричних мереж та систем. В мережах середньої напруги електричної системи річна кількість пошкоджень складає сотні, а в абонентських мережах, що живляться від них – тисячі випадків [1]. Витрати на ВМП складають значну частину експлуатаційних коштів в електричних мережах, в той час як доля витрат на пристрої для ВМП в загальних капітальних витратах відносно мала.

В теперішній час розроблено різні типи фіксуєючих пристроїв, ряд з котрих успішно експлуатуються. Так наприклад широке запровадження знайшли пристрої типу ФІП (ФІП-1, ФІП-2, ФІП-Ф), ЛИФП та інші. Враховуючи, що фіксуєючі прилади забезпечують автоматичний вимір і фіксацію електричних величин під час короткого замикання, вони повинні задовольняти певним вимогам, зокрема наступним: вимір необхідно закінчити до початку відключення пошкоджених ділянок лінії від релейного захисту, тобто протягом порядку 0,1 с, прилад повинен зберігати значення зафіксованої електричної величини протягом часу, достатнього для прибуття на підстанцію (без постійного чергування) оперативної виїзної бригади, тобто не менше 4 годин, повинен передбачатися автоматичний селективний запуск приладів, щоб контрольована величина була зафіксована лише при аварійних відключеннях ліній, прилад повинен забезпечувати певну точність виміру (зазвичай відносно похибка виміру не повинна перевищувати 5 %) і так далі.

Тобто для виявлення та пошуку місця короткого замикання (КЗ) потрібен цілий комплекс пристроїв, в котрі повинні входити: релейний захист для фіксації пошкоджень і відключення пошкодженої зони; пристрої дистанційного вимірювання для локалізації зони пошуку в межах виділеної ділянки та інші. Та навіть вони, в лініях з великою кількістю довгих відгалужень (рис. 1), не в змозі вказати на конкретне відгалуження з місцем КЗ.

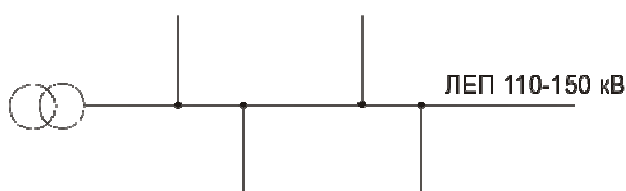


Рис. 1 – Схема лінії електропередач з відгалуженнями

Щоб визначити дійсне місце КЗ, слід додатково встановлювати на відгалуженнях фіксатори короткого замикання (ФКЗ), що призведе до підвищення ефективності пошуку місця КЗ.

**Основна частина.** Зазначені ФКЗ існують, пройшли виробничі випробування і досить успішно експлуатуються в електричних мережах ПрАТ «Кіровоградобленерго». Вони прості і зручні в експлуатації, їх конструктивні особливості та технічні характеристики висвітлені в роботах [2, 3]. Однак данні пристрої мають суттєвий недолік. Інформація про стан мережі не передається на диспетчерський пункт або черговому персоналу підстанції. Це в свою чергу призводить до того, що оперативно-виїзна бригада (ОВБ) спочатку об'їжджає встановлені ФКЗ і шукає відгалуження на якому сталося КЗ. Наявність передачі інформації до диспетчерського пункту або чергового персоналу підстанції про відгалуження на якому сталося КЗ дозволить відправити бригаду ОВБ одразу до пошкодженого відгалуження, що в свою чергу зменшить час, а також транспортні витрати на пошук пошкодження.

Авторами статті запропоновано запровадження радіоканалу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до чергового персоналу підстанції. Радіоканал можливо реалізувати двома шляхами: з використанням GSM мереж або з використанням прийомо-передавачів неліцензійних частот, наприклад, діапазону 433/868 МГц. Розглянемо переваги та недоліки кожного способу організації радіоканалу.

**1. Використання GSM модемів.** Даний спосіб організації радіоканалу, при наявності покриття в місці установки ФКЗ, достатньо простий. Він не потребує особливої уваги при проектуванні до прийомо-передавальної апаратури. Так, наприклад, можливо використати готовий радіомодуль – GSM модем. В той же час даний спосіб реалізації радіоканалу має ряд суттєвих недоліків. По перше, забезпечити живлення GSM модему технічно достатньо складно. Якщо модем буде постійно включений живлення можна здійснити або з використанням емнісних дільників напруги, або трансформаторів напруги, або з використанням сонячних панелів з накопиченням енергії в акумуляторній батареї, що значно підвищить вартість пристрою та поставить доцільність його

використання під сумнів. Включення модему короткочасно, лише для передачі інформації, потребуватиме великої кількості енергії, адже лише на реєстрацію в мережі GSM потрібно  $\approx 15$  с при роботі передавача з потужністю 1-3 Вт. Це в свою чергу, вимагатиме використання акумуляторів для живлення GSM модему при передачі. Наявність акумуляторів в будь-якому способі живлення модему передбачає їх заміну через 5-7 років, що також ускладнює експлуатацію пристрою ФКЗ. По друге, використання GSM модему передбачає наявність SIM карти номеру мобільного оператора, яку необхідно оплачувати за певним тарифним планом.

2. Використання прийомо-передавачів неліцензійних частот. Даний спосіб організації радіоканалу більш складний, адже потребуватиме при проектуванні приділяти увагу розробці радіолінії, тобто вибору неліцензованої частоти, вибору антен, вибору потужності передавачів, врахування дальності та характеру місцевості між приймачем та передавачем і т.д. Але суттєвою перевагою даного способу передачі інформації є невелика кількість енергії, яку необхідно для короткочасної роботи передавача, що дозволяє забезпечити живлення передавача магнітним полем проводу від робочого струму або струму КЗ з накопиченням її в іоністорі або електролітичному конденсаторі. Такий спосіб накопичення енергії забезпечить тривалий термін експлуатації до 20 років та не потребуватиме обслуговування. Також використання неліцензійних частот не передбачає постійних грошових витрат.

При виборі радіоканалу в ПрАТ «Кіровоградобленерго» надали перевагу використанню прийомо-передавачів неліцензійних частот, посиляючись на недостатню надійність передачі даних в мережі GSM, хоча, на нашу думку, використання прийомо-передавачів неліцензійних частот має меншу надійність і потребуватиме вирішенню питання завадозахищеності даних на етапі проектування.

Основна задача запропонованого радіофіксатора КЗ полягає в контролі струму проводу повітряної лінії електропередачі і при перевищенні його наперед заданої величини (відстроювання від робочих та пускових струмів) передача інформації по радіоканалу про факт КЗ. Радіофіксатор встановлюється в місці відгалуження повітряної лінії електропередачі (ПЛЕ), а приймач на найближчій підстанції з оперативним персоналом. Мінімальні відстані від місця установки ФКЗ до підстанцій з оперативним персоналом за даними ПрАТ «Кіровоградобленерго» наведено в табл. 1. З аналізу табл. 1 можливо зробити висновок, що відстань для передачі відносно невелика до 20 км.

Таблиця 1 – Відстані від ФКЗ до п/ст 150 кВ з оперативним персоналом.

Назва підстанції	$L, \text{ км}$
Центральная	6,6
Березовка	16,7
Геолог	13,3
Жилпоселок	1,7
Кварцит-330	2,4
Знамянка-тяговая (Шаровка)	14,2
Знамянка-тяговая (Орбита)	7,5
ЗЧМ	12,0
Максимальна відстань	16,7
Мінімальна відстань	1,7

Більшість діапазонів не ліцензованих частот знаходиться в області ультракороткохвильового (УКХ) діапазону 26,957–27,283 МГц (10 мВт), 433,075–434,79 МГц (10 мВт), 864–865 МГц (25 мВт), 868,7–869,2 МГц (25 мВт). Особливістю УКХ діапазону є прямолінійне поширення радіохвиль у межах прямої видимості (рис. 2).

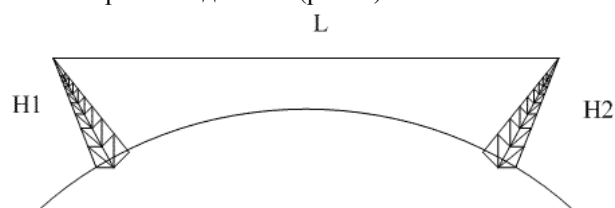


Рис. 2 – Пряма видимість на радіолінії

Орієнтовно, з урахуванням рефракції радіохвиль в УКХ діапазоні, дальність прямої видимості в кілометрах  $L$  визначається як [4]:

$$L(\text{км}) = 4,12 \left( \sqrt{H1(\text{м})} + \sqrt{H2(\text{м})} \right), \quad (1)$$

де  $H1, H2$  – відповідно висота приймальної та передавальної вишок.

Враховуючи, що ФКЗ розташовується на проводі ПЛЕ, а мінімальна висота підвісу проводу над землею згідно ПУЕ на напругу 150 кВ складає 6 м, то це значення приймемо, як розрахункове.

З (1) шляхом перетворень отримаємо

$$H1(\text{м}) = \left( \frac{L(\text{км})}{4,12} - \sqrt{H2(\text{м})} \right)^2. \quad (2)$$

Отже, мінімальна висота вишки приймальної станції

$$H1(\text{м}) = \left( \frac{16,7}{4,12} - \sqrt{6} \right)^2 = 2,57 \text{ м.}$$

При виборі модулів для створення радіоканалу необхідно користувалися наступними умовами:

- 1) використання не ліцензованих частот;
- 2) частотна модуляція, як така що більше завадозахищена;
- 3) враховуючи, що передача даних відбуватиметься лише в одному напрямку приймач та передавач може бути окремими модулями.

Як приклад, в табл. 2 наведені загальні технічні характеристики комплексу модулів передавача та приймача, а також антен до них.

Таблиця 2 – Паспортні технічні характеристики елементів радіоканалу

Потужність передавача НМ-Т433, dBm	7
Чутливість приймача НМ-Р433, dBm	-100
Коефіцієнт підсилення антени передавача ANT 433 ВУ-433-03, dBi	2
Коефіцієнт підсилення антени приймача ANT 433 ВУ-433-05, dBi	2,14

Розрахуємо максимальну теоретичну відстань роботи радіоканалу. Для цього скористаємося відомою формулою визначення потужності сигналу на вході радіоприймального пристрою [4]:

$$P_{\text{прм}}(\text{Вт}) = \frac{P_{\text{прд}}(\text{Вт}) G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{прм}}$  – потужність сигналу на вході радіоприймача;  
 $P_{\text{прд}}$  – потужність сигналу на виході радіопередавача;  
 $\lambda$  – довжина хвилі радіосигналу;  
 $r$  – відстань між приймачем і передавачем;  
 $G_{\text{прд}}$  – коефіцієнт підсилення антени радіопередавача (в разях);  
 $G_{\text{прм}}$  – коефіцієнт підсилення антени радіоприймача (в разях)

Слід зазначити, що в системах зв'язку потужність сигналу вимірюється в дБм. Це відношення абсолютного значення потужності сигналу, вираженого в ватах, до потужності сигналу 1 мВт.

$$P_{\text{вих}}(\text{дБм}) = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}(\text{Вт})}{0,001}, \quad (4)$$

Або для зворотного перетворення

$$P_{\text{вих}}(\text{Вт}) = 0,001 \cdot 10^{\frac{P_{\text{вих}}(\text{дБм})}{10}}. \quad (5)$$

Для переведення коефіцієнта підсилення антен у рази скористаємося наступною формулою

$$m = \cdot 10^{\frac{n}{20}}, \quad (6)$$

де  $m$  – відношення в разях;

$n$  – відношення в дБі.

Скориставшись формулами (5) та (6) переведемо технічні характеристики наведені в табл. 2 до не логарифмічних одиниць. Результати розрахунку наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Переведені технічні характеристики елементів радіоканалу.

Потужність передавача НМ-Т433, Вт	0,005
Чутливість приймача НМ-Р433, Вт	$1 \cdot 10^{-13}$
Коефіцієнт підсилення антени передавача АНТ 433 ВУ-433-03, разів	1,58
Коефіцієнт підсилення антени приймача АНТ 433 ВУ-433-05, разів	1,63

Виразивши з (3) відстань між передавачем та приймачем  $r$  отримаємо

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}}(\text{Вт}) G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{P_{\text{прм}}(\text{Вт})}}, \quad (7)$$

Довжина хвилі для частоти 433 МГц складає  $\lambda = 0,692$  м.

Остаточно підставивши всі дані в (7) отримаємо

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{0,005 \cdot 1,58 \cdot 1,63 \cdot 0,692^2}{1 \cdot 10^{-13}}} = 19760 \text{ м.}$$

Отже, отриманої теоретичної дальності передачі достатньо аби забезпечити передавання даних на максимальну необхідну відстань в 16,7 км (табл. 1).

Даний розрахунок є наближеним, він не враховує послаблення сигналу при проходженні крізь перешкоди на місцевості. Для визначення можливості передачі необхідно проводити дослідження на місцевості. В той же час є можливість збільшення потужності передавача до дозволеної величини в 25 мВт та використання направлених антен для передачі та прийому.

**Принцип роботи передавача ФКЗ.** Струм короткого замкнення наводить в котушці Роговського

Е.Р.С., яке потім з допомогою діодного моста випрямляється, стабілізується на певному рівні та заряджає іоністор або електролітичний конденсатор. При появі напруги живлення мікроконтролер ініціалізується, та через певний час передає радіомодулю код пристрою ФКЗ.

Враховуючи, що в мережі 150 кВ можуть виникати однофазні короткі замкнення то пристрій ФКЗ потрібно встановлювати в кожній фазі. Для того щоб при передачі вони не заважали один одному, запропоновано рознести передачу у часі. Витримка у часі запропонована наступна

Фаза А	0 с;
Фаза В	0,2 с;
Фаза С	0,4 с.

В якості джерела живлення передавача запропоновано використати конденсатор великої ємності, що пояснюється великим терміном служби (до 20 років) та швидкістю заряджання (мілісекунди) на відміну від звичайних акумуляторів. При роботі конденсатор повинен забезпечити струмом модуль передавача та мікроконтролер. Отже струм, що споживається від конденсатора

$$I_{\text{жив}} = I_{\text{р.м.}} + I_{\text{мк}},$$

де  $I_{\text{р.м.}}$  – струм, що споживається радіомодулем;

$I_{\text{мк}}$  – струм, що споживається мікроконтролером.

Електричний заряд, що має віддати конденсатор живлення

$$q_{\text{жив}} = I_{\text{мк}} \cdot t_0 + I_{\text{жив}} \cdot t_{\text{п}},$$

де  $t_0$  – час очікування мікроконтролера до початку передачі сигналу;

$t_{\text{п}}$  – час живлення при передачі.

Ємність конденсатора живлення можна знайти за наступною формулою:

$$C = \frac{q_{\text{жив}}}{U_{\text{поч}} - U_{\text{кін}}} \text{ Ф,}$$

де  $U_{\text{поч}}$ ,  $U_{\text{кін}}$  – відповідно початкове та кінцеве значення напруги на конденсаторі живлення.

Орієнтовний розрахунок ємності конденсатора живлення при  $I_{\text{р.м.}} = 60$  мА,  $I_{\text{мк}} = 15$  мА,  $t_0 = 0,4$  с, (час прийнято для пристрою ФКЗ, що знаходиться у фазі С),  $t_{\text{п}} = 0,2$  с,  $U_{\text{поч}} = 5$  В,  $U_{\text{кін}} = 4$  В, складає 0,021 Ф. Отже, можна обирати стандартний конденсатор з ємністю 22000 мкФ, на робочу напругу 6,3 В.

В якості джерела живлення передавача ФКЗ та одночасно і датчика струму КЗ нами запропоновано використати котушку Роговського. Перевагою її є те, що її відносно легко виготовити та при монтажі безпосередньо на провід повітряної лінії електропередачі непотрібно створювати розриву проводу.

**Принцип роботи приймача ФКЗ.** Приймач ФКЗ знаходиться постійно у включеному стані і очікує прийому радіосигналу від передавача ФКЗ. При виникненні короткого замкнення передавач ФКЗ надсилає код пристрою, або декількох пристроїв ФКЗ в залежності від типу короткого замкнення. Модуль приймача передає отримані дані до виводу мікроконтролера в якому відбувається обробка отриманого сигналу. Після цього мікроконтролер на



дисплеї відобразить відповідну інформацію про місце та тип КЗ.

**Висновки.** Запровадження запропоновано радіо-каналу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до чергового персоналу підстанції дозволить зменшити час, а також транспортні витрати на пошук пошкодження. Проведені орієнтовні розрахунки, що підтверджують можливість створення радіоканалу для передачі інформації від ФКЗ на відстань до 20 км, з використанням прийомо-передавачів не ліцензійних частот (433 МГц). Для врахування послаблення радіосигналу при проходженні крізь перешкоди необхідно проводити досліди в умовах конкретної місцевості.

#### Список літератури

1. Шалыт Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
2. Плешков П. Г. Розробка фіксатора коротких замикань для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ / П. Г. Плешков, А. І. Котиш, О. І. Сіріков // Вісник НТУ «ХПІ» – 2015. – № 42. – С. 8–11.
3. Котиш А. І. Розробка та експериментальне дослідження фіксатора коротких замикань для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ / А. І. Котиш, П. Г. Плешков, А. Ю. Орлович, О. І. Сіріков, А. В. Некрасов // Збірник наукових праць Кірово-

градського Національного технічного університету / Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація – Випуск 29 – 2016. – С. 228–235.

4. Выходная мощность сигнала передатчика: [Elektronnij resurs]. – Режим доступу: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/power/> (дата звернення: 11.02.2015). – Назва з екрану.

#### References (transliterated)

1. Shalyt G. M. Opredelenie mest povrezhdeniya v jelektricheskikh setjah. – M.: Jenergoizdat, 1982. – 312 s.
2. Pljeshkov P. Gh. Rozrobka fiksatora korotkykh zamykanj dlja povitryanjykh linij elektroperedach naprughoju 110-150 kV. P.Gh. Pljeshkov, A. I. Kotysh, O. I. Sirikov. Visnyk NTU «KhPI» – 2015. – No 42. – S. 8–11.
3. Kotysh A. I. Rozrobka ta eksperymentaljne doslidzhennja fiksatora korotkykh zamykanj dlja povitryanjykh elektrychnykh merezh naprughoju 110-150 kV. A. I. Kotysh, P. Gh. Pljeshkov, A. Ju. Orlovyh, O. I. Sirikov, A. V. Nekrasov. Zbirnyk naukovykh pracj Kirovohradsjkogho Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu. Tekhnika v s/gh vyrobnyctvi, ghaluzeve mashynobuduvannja, avtomatyzacija – Vypusk 29 – 2016. – S. 228–235.
4. Vyhodnaja moshhnost' signala peredatchika: [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/power/> (data zvernennja: 11.02.2015). – Nazva z ekranu.

Поступила (received) 11.09.2017

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

**Радіофіксатор коротких замикань для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ / П. Г. Плешков, О. І. Сіріков, А. І. Котиш // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 62-65. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2079-3944.**

**Радиофиксатор коротких замыканий для воздушных электрических сетей напряжением 110-150 кВ / П. Г. Плешков, А. И. Сириков, А. И. Котыш // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 34 (1256). – С. 62-65. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2079-3944.**

**Short circuit radio fuses for 110-150 kV overhead electrical power networks / P. H. Pleshkov, O. I. Sirikov, A. I. Kotysh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of the supply of electric machines and equipment. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 62-65. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-3944.**

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

**Плешков Петро Григорович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри “Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту” Центральноукраїнського національного технічного університету, м. Кропивницький; тел.: (0522) 390-409.

**Плешков Петр Григорьевич** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехнических систем и энергетического менеджмента», Центральноукраинского национального технического университета г. Кропивницкий; тел.: (0522) 390-409.

**Pleshkov Petro Hryhorovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Full Professor, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky; Head at the Department of «Electrical Engineering Systems and Energy Management» tel.: (0522) 390-409.

**Сіріков Олександр Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедри “Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту” Центральноукраїнського національного технічного університету, м. Кропивницький; тел.: (0522) 390-461; e-mail: asirikov@i.ua.

**Сириков Александр Иванович** – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электротехнических систем и энергетического менеджмента», Центральноукраинского национального технического университета г. Кропивницкий; тел.: (0522) 390-461; e-mail: asirikov@i.ua.

**Sirikov Oleksandr Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky; Associate Professor at the Department of «Electrical Engineering Systems and Energy Management» tel.: (0522) 390-461; e-mail: asirikov@i.ua.

**Котиш Андрій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, заступник завідувача кафедри “Електротехнічних систем та енергетичного менеджменту” Центральноукраїнського національного технічного університету, м. Кропивницький; тел.: (0522) 390-461; e-mail: akotysh@gmail.com.

**Котыш Андрей Иванович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Электротехнических систем и энергетического менеджмента», Центральноукраинского национального технического университета г. Кропивницкий; тел.: (0522) 390-461; e-mail: akotysh@gmail.com.

**Kotysh Andrii Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky; Vice Head at the Department of «Electrical Engineering Systems and Energy Management» tel.: (0522) 390-461; e-mail: akotysh@gmail.com.

УДК 621.316.13

**В.П. СОЛДАТЕНКО, С.П. ПЛЄШКОВ****АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

Запропоновано новий підхід до автоматичного керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії, який враховує вплив генерованої потужності на рівні усталеного відхилення напруги. Показано, що для врахування такого впливу задачу автоматичного керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Обґрунтування метод вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, в повній мірі враховує вплив відновлюваних джерел енергії на показники якості електричної енергії.

**Ключові слова:** комплексна електроенергетична система, відновлювані джерела енергії, багатокритеріальна оптимізація

Предложен новый подход к автоматическому управлению режимами работы комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии, который учитывает влияние генерированной мощности на уровни установившегося отклонения напряжения. Показано, что для учета такого влияния задачу автоматического управления режимами работы комбинированной электроэнергетической системы целесообразнее всего интерпретировать как задачу многокритериальной оптимизации. Обоснован метод решения задачи многокритериальной оптимизации, который в полной мере учитывает влияние возобновляемых источников энергии на показатели качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** комплексная электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, многокритериальная оптимизация

The work is devoted to the development of a new approach to managing of the combined electric power systems operating modes. It is shown that, in the mode of active power generation, renewable energy sources in the power system deteriorate the quality of electrical energy; in particular, there are overestimated values of the steady-state voltage deviation. It is proposed for influence accounting of the effect of renewable energy sources on the electric power quality indicators to interpret the control problem as a multicriteria optimization problem. The method for solving such a problem is substantiated, which fully takes into account the influence of renewable sources on the indicators of the quality of electric energy.

**Keywords:** complex electric power system, renewable energy sources, multicriteria optimization

**Вступ.** В енергобалансі України останніми роками відбувається постійне зростання частки енергії, яка виробляється відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Це відповідає світовим тенденціям і національній енергетичній стратегії України до 2035 року.

При впровадженні ВДЕ виділяють три підходи до способу їх підключення до енергетичної системи.

Системний підхід передбачає застосування потужних об'єктів відновлюваної енергетики, як то потужні сонячні електричні станції (СЕС), вітрові електричні станції (ВЕС) тощо, які підключаються до енергосистеми через власні розподільні електричні мережі (РЕМ). Для таких станцій споруджуються власні трансформаторні підстанції (ТП), лінії електропередачі (ЛЕП) високої напруги (35 кВ, 110 кВ тощо) з допомогою яких вони підключаються до енергосистеми країни.

Автономний підхід передбачає розробку енергетичних комплексів для живлення окремих об'єктів, зазвичай, малої потужності від ВДЕ. При цьому дається в знаки сезонна і добова нерівномірність потоків первинної енергії. Доводиться завищувати встановлену потужність енергоустановок, застосовувати акумуляування енергії. Це істотно підвищує кінцеву вартість енергії для споживача. Такий підхід застосовують лише в разі необхідності, а не повсюдно.

Зменшити вплив згаданих недоліків дозволяє комбінований підхід. Він передбачає використання ВДЕ у поєднанні із традиційним способом енергопостачання від РЕМ. При цьому стає можливим використання існуючих електричних мереж енергетичних компаній для видачі в них електричної енергії. Зникає необхідність використовувати акумулятори енергії, адже в єдину енергетичну систему можна віддати надлишок енергії і спожити її при необхідності. Такий підхід є найбільш перспективним.

Змінами внесеними Верховною радою України

до закону «Про електроенергетику» введено поняття «зеленого» тарифу. Ним було встановлено перелік відновлюваних джерел, вироблена енергія яких може продаватися за «зеленим тарифом» в енергетичну систему та визначено порядок тарифоутворення. Починаючи з 2013 року найбільша ставка «зеленого тарифу» передбачена для енергії СЕС на основі фотоелектричних перетворювачів.

Такі зміни в законодавстві енергетичної сфери сприяли різкому зростанню зацікавленості до СЕС.

З розвитком відновлюваної енергетики загалом і сонячної енергетики зокрема виникає і ряд технічних проблем [1]. Розподільні електричні мережі від великих електричних станцій проектувалися, як правило, для однонаправленого потоку потужності. Для цих режимів визначалися втрати потужності в РЕМ, рівні напруг на шинах підстанцій, обиралися методи та технічні засоби для регулювання напруги в мережі, режими роботи релейного захисту і автоматики. Таким чином забезпечувалися показники якості електричної енергії (ПЯЕ), зокрема відхилення напруги, економічність і надійність розподілу електричної енергії.

На даний час відсутні єдині рекомендації що до місця та способу приєднання ВДЕ до електричних мереж, які б забезпечували максимальну економічну і технічну ефективність експлуатації установок. Це може стати причиною необґрунтованих технічних рішень на стадії проектування.

При проектуванні потужних установок з використанням ВДЕ передбачається видача електричної енергії в розподільну мережу високої напруги (вище 110 кВ), до якої приєднані і традиційні електростанції. При цьому вплив обладнання ВДЕ на режими роботи високовольтної РЕМ та ПЯЕ не значні, внаслідок великої пропускну здатності ЛЕП.

Установки з ВДЕ малої (до 30 кВт) і середньої (до кількох сотень кВт) потужності встановлюють

фізичні або юридичні особи. Приєднуються такі установки до низьковольтних РЕМ на напругу 0,4 кВ або 10 кВ. Залежно від співвідношення потужності встановлених установок з ВДЕ та потужності споживання від РЕМ можливо виділити два випадки.

В першому випадку потужність установок з ВДЕ не значна порівняно із потужністю РЕМ. Тоді підключення такої електростанції сприятиме розвантаженню мережі по потужності і зменшенню падіння напруги в розподільній мережі. Вся вироблена енергія ВДЕ буде споживатися близько від місця її виробництва.

В другому випадку потужність установок з ВДЕ співрозмірна із потужністю РЕМ. При цьому виникають режими роботи, за яких відбір потужності споживачами електричної енергії від РЕМ менший за потужність генерації установками з ВДЕ. За таких обставин виникає зворотний потік потужності від ВДЕ до РЕМ. При цьому спостерігаються понаднормові значення усталеного відхилення напруги на шинах приєднання ВДЕ до РЕМ. Напруга зростає тим більше, чим більше перевищення генерації установок із ВДЕ над споживанням у розподільній мережі, до якої вони приєднані.

**Аналіз публікацій.** В роботі [8] приведені результати дослідження впливу генерації активної потужності, яка виробляється СЕС, на рівні відхилення напруги на шинах 0,4 кВ споживачів. Було доведено, що в локальних електричних мережах можливі режими, за яких напруги на шинах 0,4 кВ споживачів можуть виходити за межі нормально допустимих значень. Зокрема відмічено, що в таких системах мають місце різкі зміни напруги на шинах підстанцій споживачів, а усталене значення відхилення напруги може перевищувати номінальне більше ніж на 10 %. Виникають технічні проблеми експлуатації обладнання РЕМ та споживачів, які пов'язані із якістю електричної енергії СЕС.

В роботі [2] зауважується, що у РЕМ, де активно встановлюються та експлуатуються установки з ВДЕ, має місце погіршення ПЯЕ електричної енергії – понаднормове відхилення напруги на шинах підстанцій 10/0,4 кВ, спотворення синусоїдальної форми кривої напруги.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є вдосконалення системи автоматичного керування (САК) режимами роботи ВДЕ, які б враховували їх вплив на рівні напруги в РЕМ.

Задача створення таких САК безперечно є актуальною.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розробка нового підходу до автоматичного керування режимами розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, який дозволяє врахувати питання якості електричної енергії в таких мережах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- формалізувати задачу керування режимами РЕМ з ВДЕ, який враховував би вплив якості електричної енергії;

- обґрунтувати вибір методу вирішення задачі керування, який би в найбільш повній мірі враховував вплив генерації потужності ВДЕ на ПЯЕ (усталене відхилення напруги).

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Структурна схема комбінованої електроенергетичної системи (КЕС) зображена на рис. 1.

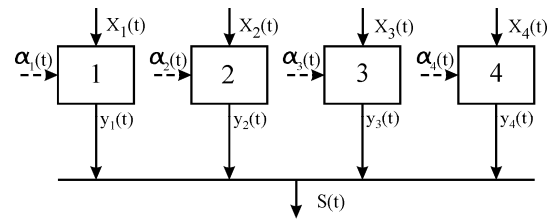


Рис. 1 – Комбінована електроенергетична система з відновлюваними джерелами енергії

На рис. 1: 1 – енергетична система, 2 – сонячна електрична станція, 3 – вітрова електрична станція, 4 – біоенергетична установка,  $x_i(t)$  – вхідний сигнал  $i$ -того елемента,  $y_i(t)$  – вихідний сигнал  $i$ -того елемента,  $\alpha_i(t)$  – параметр системи керування активністю входу  $i$ -того елемента,  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))$  – простір вхідних сигналів;  $y(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t))$  – простір вихідних сигналів;  $\alpha(t) = (\alpha_1(t), \alpha_2(t), \alpha_3(t), \alpha_4(t))$  – простір керуючих впливів;  $S(t)$  – потреба в електричній енергії.

Енергетичні установки підключені до єдиної РЕМ на одному рівні напруги. Споживачі електричної енергії отримують живлення від РЕМ та ВДЕ. При цьому в залежності від поточного співвідношення між потужністю споживання і потужністю генерації установками із ВДЕ можливі наступні режими роботи:

1. Режим споживання електричної енергії від енергосистеми. Якщо потужність споживання навантаженням перевищує потужність генерації ВДЕ  $P_{сп} > P_{вде}$ , то від енергосистеми до РЕМ відбувається перетік активної потужності. Це переважний режим роботи, на який проектувалися РЕМ. При цьому вплив ВДЕ на усталене відхилення напруги мінімальний.

2. Режим генерації електричної енергії в енергосистему. Якщо потужність генерації ВДЕ перевищує потужність споживання навантаженням  $P_{вде} > P_{сп}$ , то спостерігається зворотний потік потужності від ВДЕ до енергосистеми, генерація потужності ВДЕ у енергосистему  $P_{ген} = P_{вде} - P_{сп}$ . У такому випадку для забезпечення передачі цієї потужності необхідно підвищити рівень напруги на шинах підключення ВДЕ до РЕМ. Це призводить до росту усталеного відхилення напруги на шинах підключення ВДЕ і, як наслідок, шинах споживачів. Чим більша потужність генерації ВДЕ у енергосистему і чим менші пропускна здатність РЕМ та споживання електричної енергії на локальному рівні, тим відхилення напруги буде вищим.

В роботах [3] запропоновано оптимальний закон керування роботою КЕС, де в якості критерію оптимізації пропонується використовувати мінімум вартості електричної енергії, яка споживається. У загальному випадку цільова функція математичної моделі має вигляд:

$$V(T) = \int_{t_0}^T \sum_{i=1}^n c_i y_i(t) dt \rightarrow \min \quad (1)$$

де  $V(T)$  – цільова функція;

$c_i$  – вартість електричної енергії від  $i$ -того джерела енергії,

$y_i(t)$  – вихідна потужність генерації  $i$ -тим джерелом;

$[t_0, T]$  – проміжок часу, для якого вирішується оптимізаційна задача.

Однак цей закон не враховує вплив ВДЕ на рівні напруг в РЕМ у режимі генерації потужності від ВДЕ до енергосистеми. Для врахування такого впливу задачу керування режимами генерації активної потужності ВДЕ найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації. Постановка такої задачі має наступний вигляд:

$$\begin{cases} Q_1 = -P(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2 = 3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (2)$$

де  $Q(P_{\text{ген}}) = (Q_1(P_{\text{ген}}), Q_2(P_{\text{ген}}))$  – вектор критеріїв керування;

$P_{\text{ген}}$  – потужність, яка генерується ВДЕ у енергосистему;

$P(P_{\text{ген}})$  – прибуток від генерації потужності ВДЕ у енергосистему з урахуванням «зеленого тарифу»;

$3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$  – збитки, які виникають внаслідок перевищення усталеного значення відхилення напруги від номінального значення;

$[P_{\min} \dots P_{\max}]$  – область допустимих значень потужності  $P_{\text{ген}}$ .

Існує багато методів вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації, які умовно можна поділити на наступні групи [4]: методи, засновані на накладенні обмежень на критерії; методи, засновані на лінійному згортанні критеріїв; методи, засновані на пошуку компромісного розв'язку; методи інтерактивного розв'язку;

Найбільш поширені наступні методи вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації.

1. *Метод головного критерію* полягає в тому, що в якості цільової функції обирається один із критеріїв, а інші вводяться як обмеження. Обравши в якості головного критерію, наприклад  $P(P_{\text{ген}})$  прибуток від генерації потужності ВДЕ у енергосистему з урахуванням «зеленого тарифу», задачу (2) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} Q_1 = -P(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ Q_2 = 3_{\Delta U}(P_{\text{ген}}) \leq 3_{\Delta U \max}; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (3)$$

де  $3_{\Delta U \max}$  – верхнє обмеження критерію  $3_{\Delta U}(P_{\text{ген}})$ ;

Недоліком такого методу є ускладненість вибору головного критерію із множини критеріїв. Адже критерії знаходяться у протиріччі.

2. *Метод лінійного згортання* можна застосувати, якщо відома відносна важливість кожного з критеріїв. Він полягає в лінійному об'єднанні всіх критеріїв шляхом введення вагових коефіцієнтів.

$$\begin{cases} F_1(P_{\text{ген}}) = \sum_i^m e_i Q_i(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (4)$$

де  $F_1(P_{\text{ген}})$  – цільова функція,

$e_i$  – ваговий коефіцієнт для  $i$ -того джерела, що враховує, якість електричної енергії від різних ВДЕ.

Подібний підхід до керування режимами роботи КЕС з ВДЕ застосовується у роботі [5]. В даній роботі керуючі впливи пропонується визначати мінімізацією наступної цільової функції:

$$V(T) = \sum_{i=1}^m e_i c_i y_i(t) dt \rightarrow \min \quad (5)$$

Недоліком даного методу є складність визначення числових значень вагових коефіцієнтів для досягнення бажаного співвідношення критеріїв в точці оптимуму. Також нерідко спостерігається велика чутливість розв'язку відносно цих вагових коефіцієнтів.

3. *Мінімаксні (максимінні) методи* засновані на пошуку компромісного розв'язку. Для задачі (2) формулювання мінімаксного методу матиме вигляд:

$$\begin{cases} F_2(P_{\text{ген}}) = \max_{i=1, \dots, m} Q_i(P_{\text{ген}}) \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\min} \dots P_{\max}], \end{cases} \quad (6)$$

де  $F_2(P_{\text{ген}})$  – цільова функція.

Недоліком даного методу розв'язку є неможливість отримання в точці оптимуму бажаного співвідношення між критеріями  $Q_i(P_{\text{ген}})$ .

4. *Адаптивний метод* заснований на використанні експертних оцінок. Експерту надається певна точка  $P_{\text{ген}j}$  на парето-оптимальній множині розв'язків, і вказуються числові значення всіх критеріїв  $Q_i(P_{\text{ген}})$  в цій точці. Експерт вирішує, по якому з критеріїв виконувати мінімізацію в конкретних умовах. В отриманій точці  $P_{\text{ген}j+1}$  визначаються числові значення всіх критеріїв  $Q_i(P_{\text{ген}})$  і знову надаються експерту і так далі до тих пір, доки експерт не зупиниться на розв'язку  $P_{\text{ген}^*}$ , який він визнає оптимальним.

Даний метод застосовується переважно для вирішення тих задач, які складно формалізувати. Системи автоматичного керування, що реалізують даний метод належать до класу експертних систем, недоліком яких є висока складність розробки.

Зважаючи на те, що задачу керування режимами роботи КЕС з ВДЕ можна формалізувати, наприклад, у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації (задача (2)) застосування даного методу для побудови САК режимами КЕС з ВДЕ є недоцільним.

5. *Метод наближення до утопічної (ідеальної) точки* [6] в просторі критеріїв дає можливість подолати невизначеність в обґрунтуванні важливості критеріїв  $Q_i(P_{\text{ген}})$ .

Під утопічною точкою слід розуміти точку  $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$ , координатами якої є оптимальні (мінімальні) значення для кожного з критеріїв  $Q_i(P_{\text{ген}})$ .

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом наближення до утопічної точки здійснюється за два кроки:

Крок 1. Шляхом визначення оптимального значення для кожного з критеріїв визначаються координати утопічної точки  $Q_{\text{ут}} = (Q_{1\min}, Q_{2\min})$  в просторі критеріїв оптимізації  $\{Q\} \subset R^m$ .

Крок 2. Шляхом розв'язку задачі скалярної оптимізації відстані  $\rho$  від утопічної точки до парето-оптимальної множини розв'язків в просторі критеріїв знаходяться координати розв'язку задачі багато-

критеріальної оптимізації  $P_{\text{ген}}^*$  в просторі керування  $[P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}] \subset R^k$ .

Вираз для визначення відстані  $\rho$  має вигляд:

$$\rho_{L^p} = \left( \sum_{i=1}^m |Q_i(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}i}|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (7)$$

Для випадку  $p = 2$  (евклідова відстань) знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (2) (крок 2) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_3(P_{\text{ген}}) = \sqrt{\frac{(Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}1})^2}{\zeta_1} +} \\ \quad + \frac{(Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}2})^2}{\zeta_2}} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{array} \right. \quad (8)$$

де  $\zeta_1$  та  $\zeta_2$  – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

У випадку мінімізації евклідової відстані отримати бажане співвідношення критеріїв у точці оптимуму досить складно.

Геометрична інтерпретація розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (2) методом наближення до утопічної точки для випадків мінімізації евклідової та чебишевської відстані зображена на графіку (рис. 2.), отриманому в результаті розрахунку числового тестового прикладу.

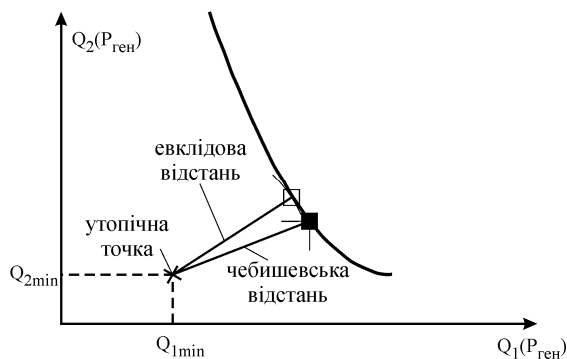


Рис. 2 – Геометрична інтерпретація розв'язку задачі

Для випадку  $p \rightarrow \infty$  (чебишевська відстань) знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації (2) (крок 2) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_4(P_{\text{ген}}) = \max \left\{ \frac{Q_1(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}1}}{\zeta_1}, \right. \\ \quad \left. \frac{Q_2(P_{\text{ген}}) - Q_{\text{ут}2}}{\zeta_2} \right\} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ген}} \in [P_{\text{min}} \dots P_{\text{max}}], \end{array} \right. \quad (9)$$

Таким чином, у випадку мінімізації чебишевської відстані бажане співвідношення критеріїв у точці оптимуму однозначно визначається значеннями коефіцієнтів  $\zeta_1$  та  $\zeta_2$ . Тому застосування саме такого підходу до вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації є найбільш доцільним.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження встановлено:

1. Для врахування впливу генерації потужності ВДЕ на рівні усталених відхилень напруги задачу керування режимами КЕС з ВДЕ найдоцільніше інтерпретувати як задачу багатокритеріальної оптимізації.

2. Проведений аналіз методів вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, встановлено, що найбільш доцільним методом розв'язку даної задачі є метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

3. Бажане співвідношення критеріїв в точці оптимуму однозначно визначається співвідношенням вагових коефіцієнтів  $\zeta_1$  та  $\zeta_2$  у випадку знаходження кінцевого розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом мінімізації чебишевської відстані від утопічної точки до множини парето-оптимальних розв'язків.

#### Список літератури

1. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.
2. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 134–145.
3. Плишков С.П. Розробка математичної моделі оптимальних режимів вироблення та споживання енергії в комплексній електроенергетичній системі з відновлювальними джерелами енергії для сільськогосподарського виробництва / С.П. Плишков, В.Л. Солдатенко, А.Д. Федунець // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Випуск 87. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2009. – С. 24–26.
4. Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации / Ю.К. Машунин – М.: Наука, 1986. – 141 с.
5. Розен В.П. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою / В.П. Розен, Є.М. Іншеков, І.В. Калінчик // Енергетика. – 2013. – № 1. – С. 20-26.
6. Зінзура В.В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах / В. В. Зінзура // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. / – Вип. 25, Ч. 1 – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 350-360.

#### References (transliterated)

1. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv soniachnykh elektrichnykh stantsii na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV [Flush of sunny electric power stations on the spur of settling 0,4 kV] *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*. [Energy: economics, technology, ecology: science journal] – 2015. – no. 3 (41). – pp. 7–13.
2. Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Ye., Hunko I. O. Vplyv inverteriv SES na pokaznyky yakosti elektrichnoi enerhii v LES [Influence of solar power inverters on electrical energy quality in local electrical systems]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky* [Bulletin of the Khmelnytsky National University. Technical sciences.]. – 2015. – no. 2. – pp. 134–145.
3. Pliashkov S. P., Soldatenko V. P., Fedunets A. D. Rozrobka matematychnoi modeli optymalnykh rezhymiv vyroblennia ta spozhyvannia enerhii v kompleksnii elektroenerhetychnii systemi z vidnovliuvalnymy dzherelamy enerhii dlia silskohospodarskoho vyrobnytstva [Development of mathematical model of optimal modes of production and consumption of energy in a complex electric power system with renewable energy sources for agricultural production] *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka*.

- [Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko.] vol. 87. – Kharkiv, 2009. – pp. 24–26.
4. Mashunyn Yu. K. Metody u modely vektornoї optymyzatsyy [Methods and models of vector optimization]. – Moscow, Nauka Publ, 1986. 141 p.
  5. Rozen V. P., Rozen V. P., Inshekov Ye. M., Kalinchyk I. V. Optymyzatsiia protsesiv vyroblennia elektroenerhii kombinovanoї elektroenerhetychnoї systemoї [Optimization of the processes of electricity generation by the combined power system] *Enerhetyka* [Energetics]. – 2013. – no. 1. – pp. 20-26.
  6. Zinzura V. V. Metody rozviazku zadachi bahatokryterialnoi optymyzatsii rehuliuвання napruhy v elektrychnykh mrezhakh [Methods of solving the problem of multicriteria optimization of voltage regulation in electric networks]. *Zbimyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*. Vol. 25. Part.1 – Kirovohrad: KNTU, 2012. pp. 350-360.

Надійшла (received) 29.09.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 66-70. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

**Автоматическое управление режимами работы комбинированной электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / В. П. Солдатенко, С. П. Плешков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 66-70. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

**Automatic control of the operation modes of the combined electric power system with renewable energy sources / V. P. Soldatenko, S. P. Plieshkov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 34 (1256). – P. 66-70. Bibliography: 6. – ISSN 2079-3944.

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

**Солдатенко Валентин Петрович** – Центральноукраїнський національний технічний університет, викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kirovograd41@gmail.com.

**Солдатенко Валентин Петрович** – Центральноукраїнський національний технічний університет, преподаватель кафедри електротехнічних систем и енергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kirovograd41@gmail.com.

**Soldatenko Valentyn Petrovych** – Central Ukrainian National Technical University, Lecture at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: kirovograd41@gmail.com.

**Плешков Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Плешков Сергей Петрович** – кандидат технических наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри автоматизації производственных процессов, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Plieshkov Serhii Petrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor at the Department of "Automation of production processes", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

УДК 621.316.7

П.Г. ПЛІШКОВ, І.О. ПЕРЕВЕРЗЄВ, К.Г. ПЕТРОВА, І.В. САВЕЛЕНКО

**СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ТЯГОВОЇ УСТАНОВКИ  
З СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ**

Запропоновано підхід до автоматичного керування швидкістю руху тягової установки з синхронними двигунами на постійних магнітах, що містять що мають пускові обмотки, який базується на використанні спостерігачів зниженого порядку. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування швидкістю тягової установки та її комп'ютерну імітаційну модель. Результати проведених досліджень ефекту від застосування розробленої системи автоматичного керування показали, що застосування цієї системи дозволяє досягти зменшення пульсацій струму в обмотках статора, втрат електричної енергії та зниження рівня пульсацій моменту на валу синхронними двигунами на постійних магнітах.

**Ключові слова:** система автоматичного керування, спостерігач Люенбергера, синхронні двигуни з постійними магнітами.

Предлагается подход к автоматическому управлению скоростью движения тяговой установки с синхронными двигателями на постоянных магнитах, в устройство которых входят пусковые обмотки, основанный на использовании наблюдателей пониженного порядка. Разработана структурная схема системы автоматического управления скоростью тяговой установки и ее компьютерная имитационная модель. Результаты проведенных исследований эффекта от применения разработанной системы автоматического управления показали, что применение этой системы позволяет достичь уменьшения пульсаций тока в обмотках статора, потерь электрической энергии и снижения уровня пульсаций момента на валу синхронного двигателя на постоянных магнитах.

**Ключевые слова:** система автоматического управления, наблюдатель Люенбергера, синхронные двигатели с постоянными магнитами.

An approach is proposed to automatic control of the speed of traction unit with synchronous motors on permanent magnets containing starter windings, which is based on the use of reduced-order observers. An equation of Luenberger's observer for estimating non-direct measurable variables is obtained and structural schemes of Luenberger's observer for estimating currents in starter windings of an engine are developed. The structural scheme of the automatic control system of the traction unit speed and its computer simulation model is developed. The study of the effect from application of the developed automatic control system have shown that the use of this system allows to achieve a reduction of iq current pulses, electric power losses and a decrease in the pulsations of the moment on a shaft of synchronous motors of the with permanent magnets.

**Keywords:** automatic control system, Luenberger's observer, synchronous motors on permanent magnets.

**Вступ.** Підвищення енергоефективності роботи електрообладнання є одним з пріоритетних завдань промисловості України. Як відомо, рудовидобувна галузь є однією з найбільш енергоємних в порівнянні з іншими галузями. Так в технологічному процесі видобування сировини на її транспортування припадає до 30 % загальних витрат, Одним із шляхів скорочення цих витрат є застосування в тягових установках руднотермічних шахт більш сучасних електроприводів під час руху. В електроприводах тягових установок все більшого поширення набувають синхронні двигуни на постійних магнітах (СДПМ), що обумовлено їх більш високими енергетичними характеристиками в порівнянні з двигунами постійного струму. За конструктивним виконанням СДПМ випускаються у варіантах з пусковими та без пускових обмоток. Зважаючи на це, системи автоматичного керування (САК) тяговими установками з СДПМ обов'язково повинні враховувати ці їх особливості. Проте існуючі САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ застосовують ті ж самі лінійні регулятори, що і для установок з двигунами постійного струму. Розробка систем автоматичного керування для СДПМ дозволить забезпечити широкі діапазони регулювання швидкості обертання, покращити їх енергетичних, статичні і динамічні показники.

Тому задача удосконалення САК швидкістю руху тягових установок з СДПМ з метою підвищення їх енергоефективності є актуальною.

**Аналіз публікацій.** В роботі [1] для керування швидкістю руху електроприводів з СДПМ пропонується застосовувати такі ж лінійні САК, як і для приводів постійного струму. Проте, як зазначалося вище,

такий підхід до побудови САК не враховує ряд конструктивних особливостей електроприводів з СДПМ, що знижує ефективність їх роботи.

В роботах [2, 3] запропоновано оптимальну релейну систему автоматичного керування швидкістю руху тягових установок з СДПМ. Так, в роботах [4, 5] проведено синтез законів оптимального релейного керування швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ з пусковими обмотками, на базі яких розроблено структурну схему САК. В таких САК для визначення змінних стану, що не піддаються безпосередньому вимірюванню (струми в пускових обмотках) пропонується застосовувати спостерігачі. Проте, в даній роботі не обґрунтовано тип спостерігача, та не проведено розрахунок його параметрів.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є дослідження роботи САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ, до складу якої входять спостерігачі змінних стану, які не піддаються безпосередньому вимірюванню (струми в пускових обмотках СДПМ).

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Як зазначалося в роботах [2,3], для синтезу САК швидкістю руху тягових установок з СДПМ необхідно розробити математичну модель об'єкту керування. Математична модель СДПМ при загальноприйнятих допущеннях може бути представлена в рухомій системі координат, пов'язаній з ротором СДПМ (d-q координати) у наступному виді:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D - \\ - \omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \\ + \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D + \omega_R x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}) - \\ - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_d, u_q$  – проекції напруги в обмотках статора на вісі d–q, в.о.;

$i_d, i_q$  – складові струму в обмотці статора по осям d–q, в.о.;

$r_s$  – активний опір статорної обмотки СДПМ, в.о.;

$x_d, x_q$  – складові індуктивного опору статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

$p = d/dt$  – оператор диференціювання;

$x_{dD}, x_{qD}$  – складові індуктивного взаємного опору приведенного до статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

$x_D, x_Q$  – складові індуктивного опору приведенного до статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

$x_{dM}$  – індуктивний опір еквівалентної обмотки збудження, в.о.;

$i_D, i_Q$  – складові струму еквівалентної пускової обмотки по осям d–q, в.о.;

$\omega_R$  – кутова (електрична) швидкість статора, рад<sup>-1</sup>;

$r_D, r_Q$  – складові активного опору еквівалентної пускової обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

$I_{M0}$  – струм еквівалентної обмотки збудження, А;

$J$  – момент інерції рухомих частин, в.о.;

$M_3$  – момент зовнішніх сил, в.о.

В роботах [4,5] проведено синтез САК швидкості руху тягової установки з СДПМ. Сигнали оптимального регулювання релейних регуляторів струмів та швидкості обертання наведені нижче.

$$u_{id} = u_{ym} \text{sign}(i_d) \quad (2)$$

$$u_{iD} = u_{yidm} \text{sign}(i_D) \quad (3)$$

$$u_{iQ} = u_{yidm} \text{sign}(i_Q^* - i_Q) \quad (4)$$

$$u_{iq} = u_{yom} \text{sign}(i_q^* - i_q) \quad (5)$$

$$u_\omega = u_{ym} \text{sign} \left( \omega_R^* - \omega - p \frac{x_Q x_q - x_{qQ}^2}{r_s r_Q} \omega \right) \quad (6)$$

де  $i_d^*$  – поздовжня складова струму статора СДПМ;

$i_D^*$  – поздовжня складова струму в пусковій обмотці СДПМ;

$i_q^*$  – поперечна складова струму статора СДПМ;

$i_Q^*$  – поздовжня складова струму в пусковій обмотці СДПМ;

$\omega_R^*$  – кутова швидкість статора при відсутності збурень, рад<sup>-1</sup>.

Сигнали оптимального керування (2) і (5) реалізуються з допомогою жорстких зворотних зв'язків в функції основних змінних, а сигнал (6) – в функції

основної змінної та її першої похідної. Усі змінні сигнали керування (2), (5) та (6) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому структурна реалізація цих сигналів не викликає принципових труднощів.

Змінні  $i_D$  та  $i_Q$ , які входять до складу сигналів керування (3) та (4) відповідно не можуть бути виміряні безпосередньо через значну технічну складність встановлення датчиків струму на пускових обмотках СДПМ. Тому, для їх оцінки доцільно скористатись спостерігачами стану.

Як відомо з теорії автоматичного керування, застосування того чи іншого типу спостерігачів обумовлене характером зміни у часі змінної стану, наявністю випадкових збурень, що істотно впливають на значення змінної стану тощо.

Для визначення значень змінних стану, що не піддаються безпосередньому вимірюванню найбільшого поширення набули спостерігачі повного порядку, спостерігачі зниженого порядку (спостерігач Люенбергера) та спостерігачі засновані на алгоритмі оптимальної фільтрації Калмана.

Проведені дослідження показали, що співвідношення сигнал/шум для змінних стану  $i_D$  та  $i_Q$  є порівняно великим, тому нехтування випадковими збуреннями (завадами) не призводить до значного зниження точності роботи САК.

Зважаючи на те, що частина змінних стану математичної моделі СДПМ піддається безпосередньому вимірюванню, для оцінки значень  $i_D$  та  $i_Q$  найдоцільніше використати спостерігач Люенбергера.

Для синтезу спостерігачів Люенбергера змінних стану  $i_D$  та  $i_Q$  було розроблено математичну модель СДПМ з пусковими обмотками у вигляді системи різницевих диференційних рівнянь незбуреного руху приведених до форми Коші:

$$\begin{cases} (r_s + p x_d) \eta_1 + p x_{dD} \eta_2 = U_1; \\ p x_{dD} \eta_1 + (r_D + p x_D) \eta_2 = 0; \\ (r_s + p x_q) \eta_3 + p x_{qQ} \eta_4 + x_{dM} I_{M0} \eta_5 = U_3; \\ p x_{qQ} \eta_3 + (r_Q + p x_Q) \eta_4 = 0; \\ x_{dM} I_{M0} \eta_3 - p J \eta_5 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

де  $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$ ;  $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$ ;  $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$ ;  $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$ ;  $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$  – змінні стану СДПМ.

На рис. 1 зображена узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера.

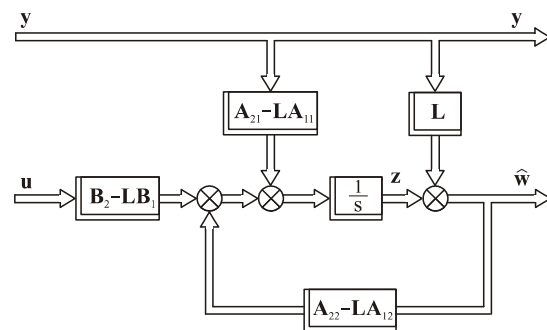


Рис. 1 – Узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера



Узагальнене рівняння спостерігача Люенбергера, що відповідає структурній схемі на рис. 1, має наступний вигляд:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{z}(t) + (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{L}\mathbf{y}(t) + (\mathbf{A}_{21} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{11})\mathbf{y}(t) + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{L}\mathbf{B}_1)\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

Математична модель динаміки руху тягової установки для контуру d має наступний вигляд:

$$\begin{cases} (r_s + px_d)\eta_1 + px_{dD}\eta_2 = U_1; \\ px_{dD}\eta_1 + (r_D + px_D)\eta_2 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В системі рівнянь (9) змінна стану  $\eta_1 = i_d - i_d^*$  є вимірюваною, а значення змінної стану  $\eta_2 = i_D - i_D^*$  оцінюється з допомогою спостерігача.

Привівши систему рівнянь (9) до стандартного вигляду рівнянь змінних стану у матричному вигляді та провівши відповідні алгебраїчні перетворення було отримано рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_2$ .

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = -\frac{r_D x_d + lr_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_D x_d + lr_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{ly}(t) + \frac{r_s x_{dD} + lr_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{y}(t) - \frac{x_{dD} + lx_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{u}(t) \quad (10)$$

Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_2$ , що відповідає рівнянню (10) зображена на рис. 2.

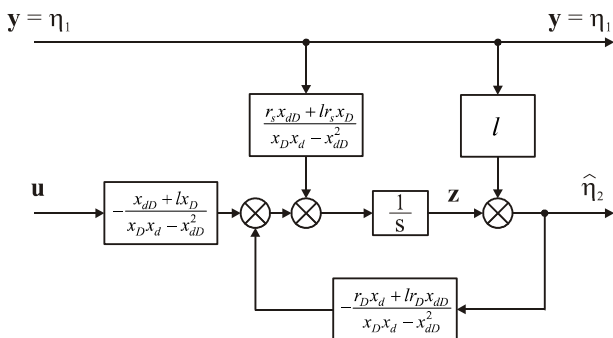


Рис. 2 – Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_2$

Математична модель динаміки руху тягової установки для контуру q має наступний вигляд:

$$\begin{cases} (r_s + px_q)\eta_3 + px_{qQ}\eta_4 + x_{dM}I_{M0}\eta_5 = U_3; \\ px_{qQ}\eta_3 + (r_Q + px_Q)\eta_4 = 0; \\ x_{dM}I_{M0}\eta_3 - pJ\eta_5 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

В системі рівнянь (11) змінні стану  $\eta_3 = i_q - i_q^*$  і  $\eta_5 = \omega_R - \omega_R^*$  є вимірюваними, а значення змінної стану  $\eta_4 = i_Q - i_Q^*$  оцінюється з допомогою спостерігача.

Привівши систему рівнянь (11) до стандартного вигляду рівнянь змінних стану у матричному вигляді та провівши відповідні алгебраїчні перетворення було отримано рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_4$ :

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = -\frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \times [l_1 \quad l_2] \mathbf{y}(t) + \left[ \frac{r_s x_{qQ} + l_1 r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} - \frac{l_2 x_{dM} I_{M0}}{J} \right. \\ \left. \times \frac{x_{dM} I_{M0} (x_{qQ} + l_1 x_Q)}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \right] \mathbf{y}(t) - \frac{x_{qQ} + l_1 x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{u}(t) \quad (12)$$

Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_4$ , що відповідає рівнянню (12) зображена на рис. 3.

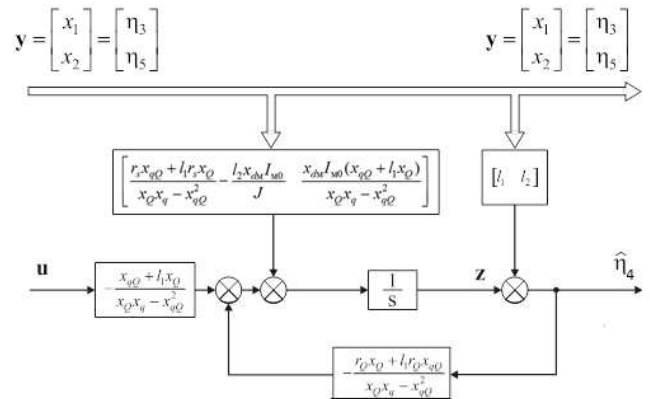


Рис. 3 – Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану  $\eta_4$

Дослідження роботи розробленої САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ найдоцільніше проводити шляхом комп'ютерного моделювання. З цією метою було розроблено комп'ютерну імітаційну модель САК в основу якої покладено отримані закони оптимального керування та отримані рівняння спостерігачів стану.

Схема узагальної комп'ютерної моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками зображена на рис. 4.

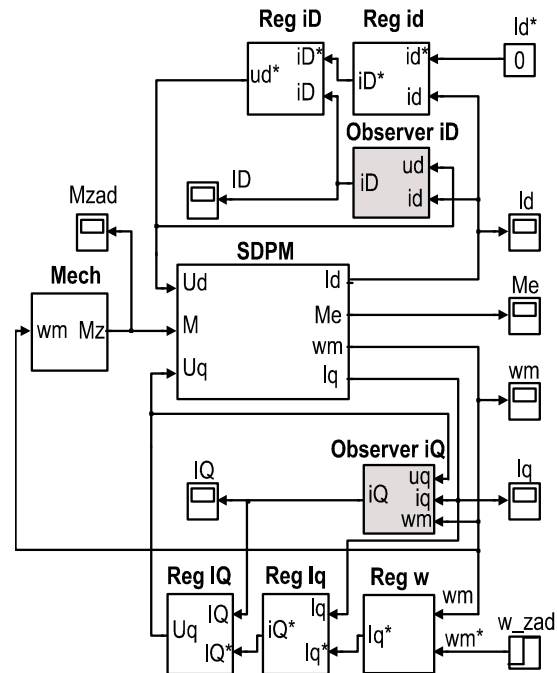


Рис. 4 – Схема узагальної комп'ютерної моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками

На рис. 4.

- «SDPM» – модель СДПМ з пусковими обмотками;
- «Red id» – модель регулятора струму  $i_d$ , що відповідає сигналу керування (2);
- «Red iq» – модель регулятора струму  $i_q$ , що відповідає сигналу керування (5);
- «Red iD» – модель регулятора струму  $i_D$ , що відповідає сигналу керування (3);
- «Red iQ» – модель регулятора струму  $i_Q$ , що відповідає сигналу керування (4);
- «Red w» – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає сигналу керування (6);
- «w\_zad» – блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «M\_zad» – блок задання механічного моменту навантаження.
- «Mech» – модель динаміки руху електровоза.
- «Observer iQ» – блок спостерігача струму  $i_Q$
- «Observer iD» – блок спостерігача струму  $i_D$

Для оцінки ефективності використання розробленої САК швидкістю руху тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками було проведено її комп'ютерне моделювання. В якості базової моделі для порівняння була обрана САК швидкістю руху тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК наведені у вигляді графіків на рис. 5, 6.

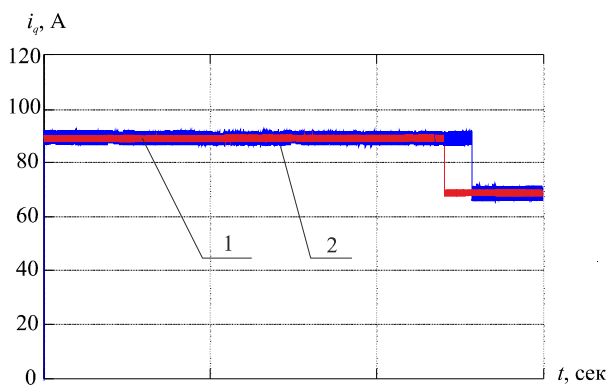


Рис. 5 – Графік зміни струму в проекції на вісь q; 1 – розроблена модель САК з релейними регуляторами, 2 – базова модель САК (з лінійними регуляторами)

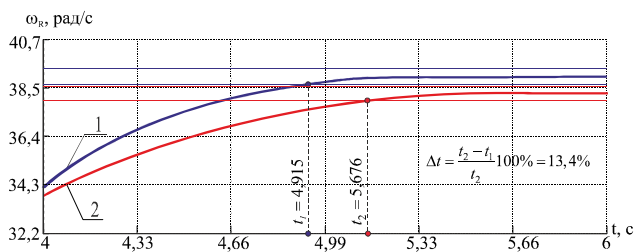


Рис. 6 – Графік швидкості обертання ротора; 1 – розроблена модель САК з релейними регуляторами, 2 – базова модель САК (з лінійними регуляторами)

Як видно з рис. 5, 6, тривалість перехідного процесу зміни струму і швидкості у випадку розробленої моделі виявилась меншою на 13,4 %, ніж для випадку моделі базової САК.

До того ж у випадку розробленої САК спостері-

гається зменшення пульсацій струму  $i_q$ , що призводить до зменшення втрат електричної енергії та зниження рівня пульсацій моменту на валу СДПМ.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Для оцінки змінних стану та що не піддаються безпосередньому вимірюванню найдоцільніше скористатися спостерігачем Люенбергера, що обумовлене відносною простотою його технічної реалізації.

2. Аналіз роботи розробленої САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ показав, що при її використанні спостерігається зменшення часу перехідного процесу, втрат електричної енергії та пульсацій моменту на валу СДПМ, що свідчить про більш високу ефективність в порівнянні з існуючими.

**Список літератури**

1. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В. Садовой, Б.В. Сухи-нин, Ю.В. Сохина // Под редакцией Садовой А. В. – К: Исимо, 1996. – С. 298.
2. Савеленко І.В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного керування тяговим електроприводом / І.В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 76 – 79.
3. Плишков П.Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем автоматичного керування високоефективними електроприводами / П. Г. Плишков, І. В. Савеленко, А. В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С. 26–34.
4. Савеленко І.В. Синтез системи автоматичного керування електроприводом на базі синхронного двигуна з постійними магнітами / І.В. Савеленко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 28. – С. 309 – 317.
5. І.В. Савеленко Математичне моделювання перехідних процесів в тяговій установці з синхронним двигуном на постійних магнітах за наявності пускових обмоток / І.В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – вип. 29. – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С. 304 – 309.

**References (transliterated)**

1. Sadovoi A. V. Systemy optimalnoho upravleniya pretsyzyonnimy elektropyvodamy [Systems for optimal control of precision electric drives]. A. V. Sadovoi, B. V. Sukhynyn, Yu. V. Sokhyna. Pod redaktsyei Sadovoho A. V. – K: Ysymo, 1996. 298. Print
2. Savelenko I.V. Rozrobka ta doslidzhennia roboty systemy avtomatychnoho keruvannia tiahovym elektropyvodom. I.V. Savelenko. Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – Vol 42 (1151). – p. 76 – 79. Print
3. Plieskov P. H. Matematychni modeli synkronnykh dvyhuniv na postiiynykh mahnitakh dlia syntezu system avtomatychnoho keruvannia vysokoefektyvnymy elektropyvodamy [Development and research of the system of automatic control of traction electric drive] / P. H. Plieskov, I. V. Savelenko, A. V. Nekrasov. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenichuk: KrNU, 2015. – Vol. 3/2015 (92) – p. 26–34. Print
4. Savelenko I.V. Syntez systemy avtomatychnoho keruvannia elektropyvodom na bazi synkronnoho dvyhuna z postiiynykh mahnitamy [Mathematical model of synchronous motors based on permanent magnets for the synthesis of automatic control of high-effective electronic]. I.V. Savelenko. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. prats KNTU. – Kirovohrad: KNTU, 2015. – Vol. 28. – p. 309 – 317. Print
5. I.V. Savelenko Matematychnе modeliuвання perekhidnykh protsesiv v tiahovii ustanovtsi z synkronnym dvyhunom na postiiynykh mahnitakh za naiavnosti puskovykh obmotok [Mathematical modeling of transients in a traction unit with a synchronous motor

on permanent magnets in the presence of starting windings]. I.V. Savelenko. Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. – Vol.

29. – Kirovohrad: KNTU, 2016. – p. 304 – 309. Print

Надійшла (received) 05.09.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Система оптимального керування рухом тягової установки з синхронними двигунами на постійних магнітах / П. Г. Плешков, П. Г. Переверзев, К. Г. Петрова, І. В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 71–75. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079–3944.**

**Системы оптимального управления движением тяговой установки с синхронными двигателями на постоянных магнитах / П. Г. Плешков, П. Г. Переверзев, К. Г. Петрова, И. В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 71–75. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079–3944.**

**The system of optimal control of the motion of a traction unit with synchronous motors on permanent magnets / P. H. Plieshkov, I. O. Pereverzev, K.G. Petrova, I. V. Savelenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 34 (1256). – P. 71–75. Bibliography: 5. – ISSN 2079–3944.**

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

**Плешков Петро Григорович** – кандидат технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Плешков Петр Григорьевич** – кандидат технических наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет, заведующий кафедрой электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Plieshkov Petro Hryhorovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Central Ukrainian National Technical University, Head of the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

**Переверзев Ігор Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor\_pereverzev@ukr.net.

**Переверзев Игорь Алексеевич** – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, доцент кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor\_pereverzev@ukr.net.

**Pereverzev Igor Oleksyevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor\_pereverzev@ukr.net.

**Петрова Катерина Григорівна** – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, старший викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

**Петрова Катерина Григорьевна** – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, старший преподаватель кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

**Petrova Kateryna Grygorievna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, senior lecturer at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

**Савеленко Іван Володимирович** – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, старший викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.

**Савеленко Иван Владимирович** – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, старший преподаватель кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.

**Savelenko Ivan Volodymyrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, senior lecturer at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.

УДК 629.423.315

**В.О. ЧЕРНАЯ, Д.А. ШОКАРЕВ****ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ С УЛУЧШЕННОЙ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ**

В работе проведен анализ существующих способов охлаждения тяговых электрических машин рудничных электровозов и условий их эксплуатации в подземных выработках горнорудных предприятий. Рассмотрены известные конструктивные варианты тяговых электрических двигателей отечественного и зарубежного производства, выявлены их преимущества и недостатки. Проведена оценка эффективности системы вентиляции тягового электрического двигателя ДТН-45 шахтного контактного электровоза. Представлены результаты лабораторных исследований по определению температуры нагрева элементов тягового двигателя при естественной и принудительной вентиляции. Установлены оптимальные значения напора и расхода охлаждающего воздуха.

**Ключевые слова:** электровоз, тяговый электрический двигатель, нагрев, вентиляция, температура, надежность

В роботі проведено аналіз існуючих способів охолодження тягових електричних машин рудничних електровозів і умов їх експлуатації в підземних виробках гірничорудних підприємств. Розглянуто відомі конструктивні варіанти тягових електричних двигунів вітчизняного та зарубіжного виробництва, виявлено їх переваги та недоліки. Проведено оцінку ефективності системи вентиляції тягового електричного двигуна ДТН-45 шахтного контактного електровоза. Представлені результати лабораторних досліджень з визначення температури нагріву елементів тягового двигуна при природній і примусовій вентиляції. Встановлено оптимальні значення напору і витрати охолоджуючого повітря.

**Ключові слова:** електровоз, тяговий електричний двигун, нагрів, вентиляція, температура, надійність

In the article the analysis of the existing ways of cooling of traction electrical machines of miner electric locomotives and conditions of their operation in mine working of the mining enterprises was carried out. The known constructive options of traction electric motors of domestic and foreign production are considered, their advantages and disadvantages were revealed. The assessment of system effectiveness of ventilation of the traction DTN-45 electric motor of a mine contact electric locomotive was carried out. The results of laboratory researches on the determination of temperature of heating of elements of the traction engine at natural and compulsory ventilation were presented. The optimum values of pressure and consumption of the cooling air were established.

**Key words:** electric locomotive, traction electric motor, heating, ventilation, temperature, reliability

**Введение.** Известно, что используемые на современных типах рудничных контактных электровозов К14 тяговые электрические двигатели (ТЭД) типа ДТН-45, с их различными модификациями, по своему конструктивному исполнению и отсутствию действенной системы контроля параметров тяговых машин не соответствуют условиям эксплуатации в железорудных шахтах и требованиям служб эксплуатации внутришахтного транспорта (ВШТ) этих предприятий [1, 2].

Так, ПАО «Электромашина» (г. Харьков) – до недавнего времени отечественный монополист по выпуску двигателей ДТН-45 различных их модификаций – делал и продолжает делать немало усилий по совершенствованию конструкции, начиная с предшественников нынешних ДТН-45 и ЭТ-45. Однако ожидаемого ощутимого совершенства пока не достигнуто, как не достигнуто это в той или иной мере в новых образцах тяговых двигателей производства Смелянского машиностроительного завода.

**Актуальность исследований.** Перед изыскателями-конструкторами ТЭД для тяговых электротехнических комплексов шахтных контактных электровозов при построении тактики выбора электрических параметров двигателей по-прежнему, как и ранее, стоит архиважная задача – достижение высокого уровня надежности и создание условий для максимально возможного приближения длительной мощности ТЭД к часовой. В значительной степени это связано с вопросами охлаждения двигателей, поскольку уровень компенсации недостаточности естественной эксплуатационной вентиляции ТЭД искусственным путем в контексте габаритов и условий работы шахтных электровозов сопряжено с невозможностью решения данной проблемы известными способами [3, 4]. Суть же задачи вентиляции ТЭД (как естественной, так и искусствен-

ной) – это отвод тепла при работе двигателя. Отвод этого тепла особенно актуален для охлаждения таких элементов ТЭД как якорь и обмотки элементов, наименее обдуваемых потоком воздуха [5].

**Цель исследований.** Усовершенствование конструкции тягового электродвигателя рудничного контактного электровоза с учетом необходимости улучшения отвода тепла в процессе его функционирования на электроподвижном составе в условиях железорудных шахт.

**Материал исследований.** Проблема охлаждения ТЭД является непростой для любого вида электрифицированного транспорта. В силу имеющихся возможностей каждого отдельно взятого вида транспорта эта проблема решается по-разному.

В частности, на магистральных и промышленных типах электровозов необходимую вентиляцию обеспечивают мотор-вентиляторы [6, 7]. Однако такой вариант, как и многие аналогичные, для условий отечественных шахтных электровозов неприемлем в силу жестких массогабаритных ограничений [8].

В то же время, как свидетельствуют многочисленные исследования, проведенные в условиях действующих шахт Криворожского железорудного бассейна [5], общей тенденцией большинства рейсов шахтных электровозов является колебательный процесс изменения температуры нагрева ТЭД с превышением температурных показателей выше допустимых пределов (рис. 1). Невозможность спрогнозировать характер изменения температуры ТЭД в процессе рейса и рабочей смены требует решения вопроса повышения надежности функционирования как самого двигателя, так и всего электротехнического комплекса, которое видится в создании эффективной системы охлаждения ТЭД и разработке комплексного

© В.О. Черная, Д.А. Шокарев, 2017

технического решения по контролю и защите ТЭД от превышения температурных режимов [5].

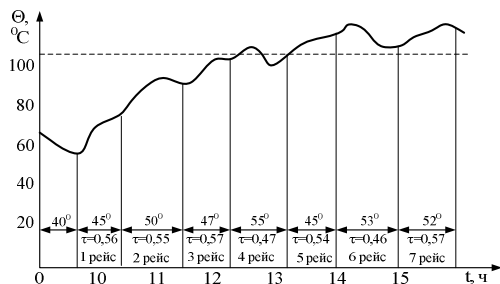


Рис. 1 – Изменение температуры обмотки якоря тягового двигателя ДТН-45 в течение рабочей смены электровоза К14

Следует отметить, что по видам охлаждения ТЭД подразделяются на:

- закрытые неветилируемые двигатели, к которым относятся большинство двигателей отечественных рудничных электровозов;
- двигатели с независимой вентиляцией от отдельных вентиляторов – двигатели зарубежных тяжелых электровозов;
- самовентилируемые двигатели с вентиляторами, устанавливаемыми на валу двигателя, – на отечественных тяжелых контактных электровозах.

В зависимости от вида системы вентиляции изменяются допустимые нагрузки ТЭД и их продолжительность (рис. 2). С усилением охлаждения ТЭД возрастает не только продолжительная мощность двигателя, но и часовая, но в меньшей степени – 20–30 %. При независимом охлаждении можно несколько уменьшить размеры двигателя, но в целом за счет дополнительной вентиляционной установки размеры системы привода возрастают, возрастают также затраты, поэтому данный вариант на отечественных электровозах не нашел применения.

На тяжелых отечественных электровозах массой 14 т применены самовентилируемые ТЭД за счет вентилятора, установленного на валу внутри двигателя, и через окна на концах двигателя происходит продувка. Это довольно простое решение, позволившее более чем в 1,5 раза увеличить продолжительную мощность.

Вместе с тем, в этом варианте вместе с воздухом в двигатель попадает грязь, тем более, что вентиляционные окна расположены сверху, а в рудничных условиях присутствуют и вода, и пыль. В целях повышения надежности эта конструкция требует доработки.

Следует отметить, что эффективность системы охлаждения можно охарактеризовать, используя коэффициент использования Эссона:

$$C_{\text{Э}} = \frac{P}{l \cdot D^2 \cdot n} \cdot 10^6, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность двигателя;  
 $l$  – длина пакета активной стали;  
 $D$  – диаметр внутренней расточки статора;  
 $n$  – скорость вращения.

Коэффициент  $C_{\text{Э}}$  для большинства машин находится в пределах 2–5 [9].

Двигатель ДТН-45 имеет следующие энергетические и технические параметры:  $P = I_n U_n = 50$  кВт,

$l = 20,4$  см,  $D = 45$  см,  $n = 1320$  об/мин.

Подставив численные значения переменных в выражение 1, получим:

$$C_{\text{Э}} = 0,92 \ll 2.$$

Это говорит о том, что при существующей схеме охлаждения – самовентилиации – энергетические возможности двигателя ДТН-45 не используются полностью, что вызывает необходимость доработки конструкции ТЭД с учетом специфики их функционирования в условиях шахт.

Для повышения мощности тяговых двигателей шахтных электровозов за счет применения более эффективной системы охлаждения предлагается использование нагнетательной аксиальной схемы вентиляции с разомкнутым циклом (рис. 2).

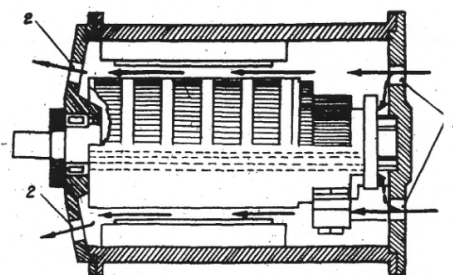


Рис. 2 – Предлагаемый вариант системы вентиляции тягового электрического двигателя РН исполнения ДТН-45 (1, 2 – соответственно входные и выходные отверстия)

Принцип охлаждения ТЭД заключается в нагнетании воздуха через вентиляционные отверстия в околосборную камеру и распределении по параллельным путям: между полюсным пространством, воздушному зазору между якорем и полюсами и по аксиальным каналам якоря.

$$Q_B = 60 \frac{10^3 \cdot \sum \Delta P}{\rho \cdot C_p \cdot \Theta_B}, \quad (2)$$

$$\sum \Delta P = I \cdot U \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-3}$$

Количество воздуха, необходимое для охлаждения двигателя, определяется на основании тепловых потерь и допустимого перегрева по формуле:

$$\eta = \frac{P_n}{I_n \cdot U_n}, \quad \Theta_B = \tau_{B2} - \tau_{B1},$$

где  $Q_B$  – расход воздуха;  
 $\sum \Delta P$  – суммарные потери в машине;  
 $\rho$  – плотность воздуха;  
 $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха (при постоянном давлении);  
 $\Theta_B$  – температура перегрева воздуха;  
 $\tau_{B2}, \tau_{B1}$  – температура соответственно выходящего и входящего воздуха;  
 $\eta$  – КПД двигателя;  
 $P_n$  – номинальная мощность двигателя;  
 $I_n, U_n$  – соответственно номинальные ток и напряжение двигателя.

Температура перегрева воздуха принята равной 55 °С для часового режима нагрузки [9]. Учитывая, что по длине пакета стали двигателя температура изменяется линейно, средний перегрев воздуха составляет:

$$\Theta_{cp} = \frac{\Theta_B}{2} = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этой температуре удельная теплоемкость и плотность воздуха  $C_p = 1008 \text{ Дж/кг град}$ ,  $\rho = 1,165 \text{ кг/м}^3$ .

Подставляя значения переменных в уравнение (2), находим

$$Q_B = 5,1 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Напор, необходимый для подачи заданного количества воздуха, определяется исходя из выражения [10]:

$$H = 2300 \left( \frac{8Q}{D_a^2 - D_i^2} \right)^2, \quad (3)$$

где  $D_a$  – диаметр якоря, 2,75 см;

$D_i$  – внутренний диаметр стального пакета якоря, 7,5 см;

$Q$  – максимальный расход, 5 м<sup>3</sup>/мин.

После подстановки значений переменных в уравнение (3), находим:

$$H = 7,8 \text{ кг/м}^2.$$

Для подтверждения вышеприведенных теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования в условиях шахт Криворожского железорудного бассейна научными коллективами Криворожского национального университета, в т.ч. с непосредственным участием авторов по установлению эффективности предложенного способа охлаждения ТЭД типа ДТН-45.

Основная цель исследований – определение температуры нагрева обмоток якоря, главных и дополнительных полюсов при естественной и принудительной вентиляции ТЭД, поэтому для оценки температурных режимов были использованы хромель-копелевые термопары, основные достоинства которых заключаются в следующем:

- высокая механическая прочность чувствительного элемента;
- отсутствие теплового сопротивления между измерительным элементом и окружающей средой;
- высокая стабильность показаний;
- линейность градуировочной характеристики.

Измерения температуры нагрева обмотки якоря производились с помощью 5 термопар, расположенных как показано на рис. 3. Термопары 1-4 размещены между проводниками секций обмотки якоря (1 – в зоне петушков, 2, 3, 4 – в пазах, 5 – в лобовой части), принимая во внимание, что в этой зоне наиболее высокая температура по сечению паза.

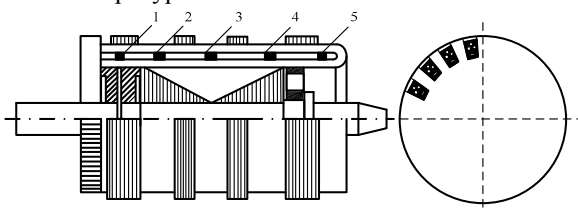


Рис. 3 – Расположение термопар в обмотке якоря

Исследования зависимости требуемых напоров охлаждающего воздуха от заданных расходов показали, что при 6 выходных отверстиях общей площадью 143 см<sup>2</sup> напор в 200 Н/м<sup>2</sup> обеспечивает расход 5 м<sup>3</sup>/мин (рис. 4).

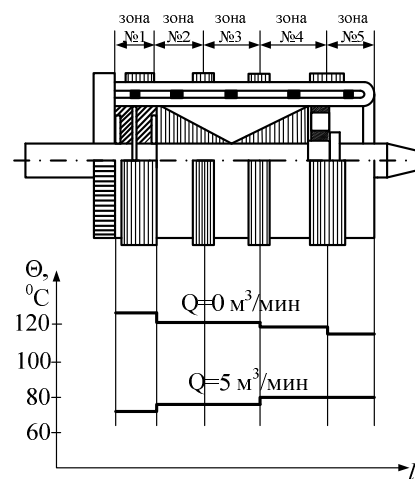


Рис. 4 – Распределение температуры обмотки по длине якоря

С целью оценки влияния аэродинамического сопротивления на нагрев якорной обмотки проведено нагревание и охлаждение ТЭД с одновременным регулированием площади выходных отверстий. Установлено, что наиболее благоприятные условия охлаждения при полностью открытых отверстиях.

Исследования скорости движения охлаждающего воздуха показали следующее:

- скорость воздуха в межполюсном пространстве значительно изменяется по высоте полюса;
- в межполюсном пространстве преобладает аксиальная составляющая, скорости воздуха, среднее значение которой 6,8 м/сек при расходе 5 м<sup>3</sup>/мин.

**Выводы.** 1. Проведенный анализ видов охлаждения ТЭД для условий рудничных контактных электровозов позволил выявить наиболее перспективные направления, заключающиеся в использовании дополнительно к естественной принудительной вентиляции.

2. Применение принудительной вентиляции позволит устранить перепад температуры по длине якоря, снизить температуру нагрева обмоток на 30–45 % и позволит без изменения веса и габаритов повысить мощность ТЭД до 30 % с одновременной реальностью повышения надежности и срока службы двигателей в 4–5 раз.

3. В результате лабораторных исследований установлено, что оптимальный расход воздуха при принудительной вентиляции тягового двигателя находится в пределах 5–7 м<sup>3</sup>/мин.

#### Список литературы

1. Дебелый, В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31. – ISSN 0041-5804.
2. Найш, Н.М. Современный железнодорожный транспорт [Текст] / Н.М. Найш, Ю.В. Белецкий, А.В. Маслов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 18 (207). – С. 79–84. – ISSN 1998-7927.
3. Черная, В.О. К вопросу анализа повреждений тяговых двигателей шахтных электровозов [Текст] / В.О. Черная // Молодь: наука та інновації : І Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених: матеріали конференції. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 421–422.
4. Вопросы повышения надежности системы мониторинга температурных режимов тяговых электрических двигателей рудничных электровозов [Текст] / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, И.О. Син-

- чук, Д.О. Кальмус, В.О. Черная // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 4 (87). – С. 44–50. – ISSN 1995-0519.
5. Синчук, І.О. Исследование тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных контактных электровозов [Текст] / І.О. Синчук, В.О. Черная // Проблеми енергосурозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика : наукове видання. – Кременчук, 2014. – № 1/2014 (2). – С. 98–100. – ISSN 2221-5160.
  6. Пухов, Ю.С. Рудничний транспорт [Текст] / Ю.С. Пухов. – М. : Недра, 1991. – 238 с.
  7. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд [и др.]. – М. : Транспорт, 1995. – 294 с. – ISSN 5-277-01462-4.
  8. Черная, В.О. Анализ тепловых режимов тяговых электрических двигателей рудничных двоосных электровозов [Текст] / В.О. Черная, Я.В. Федорова, В.О. Черный // Проблеми енергосурозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика. Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів. 20-24 квітня 2015 р. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2015. – С. 40.
  9. Розробка безсенсорного способу захисту тягових електричних двигунів рудничних электровозів від перегріву [Текст] / О.М. Синчук [та ін.] // Вісник НТУ "ХПІ" : зб. наук. пр. темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 204-208
  3. Chernaja, V.O. K voprosu analiza povrezhdenij tjadgovykh dvigatelej shahtnykh jelektrovozov [Tekst]. V.O. Chernaja. Molod': nauka ta innovacii : I Vseukraïns'ka naukovo-tehnicna konferencija studentiv, aspirantiv i molodih uchenih: materiali konferencii. – Dnipropetrovs'k, 2013. – S. 421–422.
  4. Voprosy povyshenija nadezhnosti sistemy monitoringa temperaturnykh rezhimov tjadgovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh jelektrovozov [Tekst]. O.N. Sinchuk, Je.S. Guzov, I.O. Sinchuk, D.O. Kal'mus, V.O. Chernaja. Visnik Kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo. – 2014. – № 4 (87). – S. 44–50. – ISSN 1995-0519.
  5. Sinchuk, I.O. Issledovanie teplovykh rezhimov tjadgovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh kontaktnykh jelektrovozov [Tekst]. I.O. Sinchuk, V.O. Chernaja. Problemi energoresursozberezhennja v elektrotehnicnih sistemah. Nauka, osvita i praktika : naukove vidannja. – Kremenčuk, 2014. – № 1/2014 (2). – S. 98–100. – ISSN 2221-5160.
  6. Puhov, Ju.S. Rudnichnyj transport [Tekst]. Ju.S. Puhov. – M. : Nedra, 1991. – 238 s.
  7. Teorija jelektricheskoi tjadgi [Tekst]. V.E. Rozenfel'd [i dr.]. – M. : Transport, 1995. – 294 s. – ISSN 5-277-01462-4.
  8. Chernaja, V.O. Analiz teplovykh rezhimov tjadgovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh dvoosnykh jelektrovozov [Tekst]. V.O. Chernaja, Ja.V. Fedorova, V.O. Chernyj. Problemi energoresursozberezhennja v promisl'ovomu regioni. Nauka i praktika. Tezi dopovidej Vseukraïns'koï naukovo-praktičnoi konferencii molodih uchenih, special'istiv, aspirantiv. 20-24 kvitnja 2015 r. – Mariupol': DVNZ «PDTU», 2015. – S. 40.
  9. Rozrobka bezsensornogo sposobu zahystu tyagovykh elektrichnykh dyguniv rudnychnykh jelektrovoziv vid peregrivu [Tekst]. O. Sinchuk [ta in.]. Visnyk NTU "KhPI" : zb.nauk. pr. temat. vyp. Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teoriya i praktyka. – Kharkiv : NTU "KhPI". – 2015. – № 12 (1121). – S. 204-208.

## References (transliterated)

1. Debelyj, V.L. Osnovnye napravlenija razvitija shahtnogo lokomotivnogo transporta [Tekst]. V.L. Debelyj, L.L. Debelyj, S.A. Mel'nikov. Ugol' Ukrainy. – 2006. – №6. – S. 30–31. – ISSN 0041-5804.
2. Najsh, N.M. Sovremennij zheleznodorozhnyj transport [Tekst]. N.M. Najsh, Ju.V. Beleckij, A.V. Maslov. Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja. – 2013. – № 18 (207). – S. 79–84. – ISSN 1998-7927.
3. Chernaja, V.O. Analiz teplovykh rezhimov tjadgovykh jelektricheskikh dvigatelej rudnichnykh dvoosnykh jelektrovozov [Tekst]. V.O. Chernaja, Ja.V. Fedorova, V.O. Chernyj. Problemi energoresursozberezhennja v promisl'ovomu regioni. Nauka i praktika. Tezi dopovidej Vseukraïns'koï naukovo-praktičnoi konferencii molodih uchenih, special'istiv, aspirantiv. 20-24 kvitnja 2015 r. – Mariupol': DVNZ «PDTU», 2015. – S. 40.
9. Rozrobka bezsensornogo sposobu zahystu tyagovykh elektrichnykh dyguniv rudnychnykh jelektrovoziv vid peregrivu [Tekst]. O. Sinchuk [ta in.]. Visnyk NTU "KhPI" : zb.nauk. pr. temat. vyp. Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teoriya i praktyka. – Kharkiv : NTU "KhPI". – 2015. – № 12 (1121). – S. 204-208.

Поступила (received) 31.08.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Тяговий електродвигун постійного струму для шахтних електровозів з покращеною системою вентиляції / В.О. Чорна, Д.А. Шокарев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 76–79. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Тяговий електродвигатель постоянного тока для шахтных электровозов с улучшенной системой вентиляции / В.О. Черная, Д.А. Шокарев // Вісник Національно-го технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 76–79. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.**

**DC tractive electric motor for mine electric locomotives with improved ventilation system / V.O. Chorna, D.A. Shokarov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 76–79. – Bibliography: 9. – ISSN 2079-3944.**

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

**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, тел. (067)8575375, chornajav@gmail.com.

**Черная Виктория Олеговна** – канд. техн. наук, доцент кафедри систем електропотреблення и энергетического менеджмента, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг, Украина, ул. Первомайская, 20, 39600, тел. (067)8575375, chornajav@gmail.com.

**Chorna Viktoriia** – PhD. Sc. Associate Professor, Electricity consumption systems and power management department, Kremenčuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenčuk, Ukraine, st. Pershotravneva, 20, 39600, tel. (067) 8575375, chornajav@gmail.com

**Шокарьов Дмитро Анатолійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Багалия, 21, 61002, shokareff@gmail.com.

**Шокарев Дмитрий Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедри електрических станций, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Багалия, 21, 61002, shokareff@gmail.com.

**Shokarov Dmitro** – PhD. Sc. Associate Professor, Department of Power Stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine st. Bahalii 21, 61002, shokareff@gmail.com.

## ЗМІСТ

## ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

<i>Байда Е.И., Чепелюк А.А.</i> Влияние частоты на распределение плотности тока и на нагрев печатных плат .....	3
<i>Данько В.Г., Гончаров Є.В., Поляков І.В.</i> Аналіз конструктивних особливостей екранованого індуктивного обмежувача струму з високотемпературною надпровідністю .....	9
<i>Жорняк Л.Б., Афанасьєв О.І., Леонов Р.С., Карпук А.В.</i> Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму.....	14
<i>Жорняк Л.Б., Волкова О.Г., Макогон М.А.</i> К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов.....	19
<i>Пантелеят М.Г., Єлоєв А.К.</i> Скінченоелементний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті.....	26

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

<i>Болух В.Ф., Кочерга А.И.</i> Эффективность использования различных видов ферромагнетиков в линейных импульсных электромеханических преобразователях индукционного и электромагнитного типов .....	29
<i>Галайко Л.П.</i> Анализ режима рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза.....	38
<i>Шайда В.П., Юр'єва О.Ю., Дзеніс С.Є.</i> Аналіз теплового стану різних модифікацій рудникового тягового двигуна постійного струму типу ДТН-45/27.....	42

## ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ І МЕРЕЖІ

<i>Бурма М.Г., Поліщук В.М., Рой В.Ф.</i> Регулювання режимами роботи електричних кіл освітлювальних установок.....	51
<i>Плешков П.Г., Леванцова Ю.А., Зінзура В.В.</i> Оптимальне керування режимами напруг низьковольтних розподільних електричних мереж із використанням регулюючих пристроїв силових трансформаторів.....	56
<i>Плешков П.Г., Сіріков О.І., Котиш А.І.</i> Радиофиксатор коротких замыканий для повітряних електричних мереж напругою 110 – 150 кВ .....	62
<i>Солдатенко В.П., Плешков С.П.</i> Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії.....	66

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Плешков П.Г., Переверзєв І.О., Петрова К.Г., Савеленко І.В.</i> Система оптимального керування рухом тягової установки з синхронними двигунами на постійних магнітах .....	71
<i>Черная В.О., Шокарев Д.А.</i> Тяговый электродвигатель постоянного тока для шахтных электровозов с улучшенной системой вентиляции.....	76



НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів

№ 34 (1256) 2017

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Б.В. Клименко,  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Болюх  
Технічний редактор І. С. Варшамова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Кафедра "Електричні апарати"  
Тел.: (057) 707-69-76; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com

Підп. до друку 23.10.2017 р. Формат 60×90 1/8. Папір офсетний.  
Друк лазерний. Умов. друк. арк. 9,25.  
Тираж 200 пр. Зам. № 66/172-32-2016. Ціна договірна.

---

Надруковано ТОВ «Друкарня «Мадрид»»  
61002, Харків, вул. Максиміліанівська, 11, тел. (057) 764-03-79