

**Запорізький національний технічний університет**



# **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**Виходить двічі на рік**

**№ 1'2015**

Заснований у травні 1999 року.

Засновник і видавець: Запорізький національний технічний університет

Запоріжжя  
ЗНТУ  
2015

## ISSN 1607-6761

Постановою президії ВАК України №1-05/1 від 10.02.2010 р. журнал «Електротехніка та електроенергетика» (скорочена назва – Е&Е), який видається з 1999 року, включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук.

Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/et/index.php?page=index> .

Журнал реферується або індексується міжнародними базами INSPEC, Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, ULRICH'S, РИНЦ. Електронна копія журналу розміщена на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі «Наукова періодика України» за адресою: <http://nbuv.gov.ua/portal/> .

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22913).

Науковий журнал друкує наукові праці, теоретичні розробки, довідкові матеріали про розробки підприємств, вищих навчальних закладів, НДІ у галузі електротехніки, електроенергетики у відповідності з рубриками:

1. Електротехніка.
2. Електроенергетика.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор д-р техн.наук Орловський І. А.  
Заст. гол. редактора д-р техн. наук Тиховод С. М.

## Члени редколегії:

д-р техн. наук Бекбаєв А. Б., Казахстан,  
д-р техн. наук Оніщенко Г. Б., Росія,  
д-р техн. наук Желінський М., Польща,  
д-р техн. наук Урбаняк В., Польща,  
д-р техн. наук Чунашвілі Б. М., Грузія,  
д-р техн. наук Андрієнко П. Д., Україна,  
д-р техн. наук Биковський О. Г., Україна,  
д-р техн. наук Зіновкін В. В., Україна,  
д-р техн. наук Кириленко О. В., Україна,

д-р техн. наук Клепиков В. Б., Україна,  
д-р фіз.-мат. наук Корніч Г. В., Україна,  
канд. техн. наук Метельський В. П., Україна,  
д-р фіз.-мат. наук Онуфрієнко В. М., Україна,  
д-р техн. наук Пересада С. М., Україна,  
д-р техн. наук Півняк Г. Г., Україна,  
д-р техн. наук Піза Д. М., Україна,  
д-р техн. наук Пуйло Г. В., Україна,  
канд. техн. наук Яримбаш С. Т., Україна,

Рекомендовано до видання Вченою радою Запорізького національного технічного університету, протокол № 12 від 03.06.2015 року.

Рукописи проходять незалежне рецензування із залученням провідних фахівців, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення про опублікування. У разі невідповідності матеріали не повертаються авторіві.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.  
Тел.: (061) 7-698-296, факс: (061) 764-21-41.  
E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Куриць Л. В., Бялобржеський О. В. СХЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ.....	4
Лебедев В. А. ЭЛЕКТРОПРИВОД МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	11
Волкова О. Г. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ В ПРОЦЕССЕ КОММУТАЦИИ.....	17
Малюшевська А. П., Дмитрішин О. Я., Топоров С. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА Т-1500 В ПЛІВКОВИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	21
Мельников В. О., Калінов А. П., Кочуров І. М. КОМПЕНСАЦІЯ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ.....	26
Остренко В. С. ОЦІНКА ЧАСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ IGBT4 МОДУЛІВ В РЕЖИМІ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	34
Кулагін Д. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ САМОЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМУ ГАЛЬМУВАННІ З ЖИВЛЕННЯМ ВІД ДЖЕРЕЛА ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	39
Тиховод С. М. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	46

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Шкрабець Ф. П., Остапчук О. В., Кожевников А. В., Акулов А. В. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ НАПРУГИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РОБОЧИХ ГОРИЗОНТІВ ГЛИБОКИХ ШАХТ.....	50
Волков В. А., Довбищук Д. В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПУСКА ГИДРОАГРЕГАТА ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В НАСОСНОМ РЕЖИМЕ.....	55
Літвінов В. В., Саченко Я. С. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ.....	62
Дьяченко В. В. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	70
Ципленков Д. В., Красовський П. Ю. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	77

# CONTENTS

## I ELECTROTECHNICS

Kurys L.V., Bialobrzeski O.V. THE STRUCTURE OF THE ELECTROTECHNIC TRACTION COMPLEX OF VEHICLE WITH ENERGY STORAGE.....	4
Lebedev V. A. LOW POWER ELECTRIC DRIVE FOR WELDING EQUIPMENT.....	11
Volkova O. G. METHOD FOR THE TEMPERATURE DETERMINATION OF HIGH CURRENT CONTACTS SURFACE DURING THE SWITCHING PROCESS.....	17
Malyushevskaya A. P., Dmitrishin A. Ya., Toporov S. O. RESEARCH OF INFLUENCE OF HEIGHTENED TEMPERATURES ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL T-1500 IN FILM INSULATION SYSTEMS.....	21
Melnykov V., Kalinov A., Kochurov I. THE COMPENSATION OF THE INFLUENCE OF INDUCTION MOTOR STATOR WINDINGS ASYMMETRY IN THE VECTOR-CONTROL SYSTEMS.....	26
Ostrenko V. S. TIME EVALUATION OF THE EXPLOITATION OF IGBT4 MODULES UNDER CYCLIC LOAD MODE.....	34
Kulagin D. O. INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF SELF-EXCITATION ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR WITH REGENERATIVE BRAKING POWERED BY LIMITED POWER SOURCES.....	39
Tykhovod S. M. IMPROVEMENT OF ITERATIVE METHODS OF THE NONLINEAR SYSTEMS SOLUTION OF STATE EQUATIONS OF MAGNETOELECTRIC EQUIVALENT SCHEMES.....	46

## II ELECTROENERGETICS

Shkrabets F. P., Ostapchuk O. V., Kozhevnikov A. V., Akulov A. V. TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF OPTIMAL VOLTAGE LEVEL FOR THE POWER SUPPLY OF DEEP MINE OPERATING HORIZONS.....	50
Volkov V. A., Dovbischuk D. V. IMPROVEMENT OF FREQUENCY START OF HYDROELECTRIC PUMPED STORAGE POWER PLANT IN THE PUMPING MODE.....	55
Litvinov V. V., Sachenko Ya. S. THE IMPROVEMENT OF RELAY PROTECTION SCHEMES RELIABILITY ESTIMATION METHOD.....	62
Dyachenko V. V. CREATION OF ENERGY SAVING PROGRAM FOR POWER SUPPLY SYSTEMS.....	70
Tsyplenkov D. V., Krasovskiy P. Yu. METHODS AND MEANS OF TECHNICAL LOSSES REDUCTION OF ELECTRICITY IN THE ELEMENTS OF POWER SUPPLY SYSTEMS.....	77

# I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.316.718

Курись Л. В.<sup>1</sup>, Бялобржеський О. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант, кафедра Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, E-mail: wow.lesichka@mail.ru

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри Систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

## СХЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

В роботі проведено аналіз існуючих способів підвищення енергетичної ефективності транспортних засобів з електричною трансмісією, на підставі якого визначене особливе місце накопичувачів електроенергії. Для дослідження перехідних процесів в режимах роботи транзисторного перетворювача розроблена математична модель тягового електротехнічного комплексу. В моделі реалізовані динамічний (розгін) та стаціонарний (ослаблення магнітного потоку) режими двигуна постійного струму з конденсаторним накопичувачем енергії.

**Ключові слова:** електрифікований транспорт, система диференціальних рівнянь, математична модель, перехідні процеси, ослаблення магнітного потоку, накопичувач енергії.

### ВСТУП

Проблема ефективного використання енергетичних ресурсів в цілому та електроенергії зокрема набуває все більшого значення [1, 2]. Дана проблема на різних рівнях та в різні періоди може мати різні цілі, пріоритети, завдання.

В епоху розвитку електрифікації міського електричного транспорту виявлені нові тенденції економії та енергозбереження електроенергії [3]. Реальним, ефективним засобом енергозбереження та підвищення надійності роботи для міського електротранспорту є застосування накопичувачів електроенергії [4].

Накопичувачі енергії, дозволяють забезпечити прийом надлишкової енергії електричної рекуперації шляхом відведення заряду та обмеження напруги у вузлі до якого під'єднані. Деякі виробники використовують накопичувачі енергії для підвищення енергетичної ефективності засобів міського транспорту [1, 3].

Ефективність використання накопичувача залежить від схемного рішення в якому він застосовується та алгоритму функціонування системи управління. Використання повністю керованих напівпровідникових пристроїв дозволяє реалізувати багатофункціональні силові схеми [2]. Але взаємозв'язок між характеристиками зазначених схем та бажаними характеристиками руху, як правило, не враховується.

### МЕТА РОБОТИ

Розробка схеми тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу, що має накопичувач енергії.

### МАТЕРІАЛІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тяговий електропривод широко використовується для енергозберігаючого та екологічно чистого міського громадського транспорту з живленням, як від контактної мережі, так і від акумуляторної батареї [3].

Тяговий електропривод з накопичувачем енергії скорочує викиди пилу від колодок механічних гальм через

наявність електродинамічного гальмування, забезпечує роботу при відсутності напруги в контактній мережі, що скорочує простой в пробках при обривах контактної мережі, забезпечує транспортну роботу з мінімальними затратами, за рахунок мінімізації пускових втрат та рекуперації енергії гальмування [3].

Одним з основних факторів, які істотно впливають на якість електроспоживання електротранспорту, є високі коливання напруги в контактних мережах [5]. Це цілий комплекс питань, які потребують перегляду з точки зору сучасних підходів до електропостачання та енергозбереження.

У деяких зарубіжних країнах стабілізація тягової напруги здійснюється електромашинними інерційними накопичувачами електроенергії – маховиками [6]. У інших країнах на тяговій підстанції встановлюють нерегульовані випрямлячі, які живлять через трансформатор від трифазної мережі [7] надвисокоємні конденсатори (суперконденсатори) – джерела струму нового покоління [4]. На кожній підстанції пропонують встановлювати комплект суперконденсаторів ємністю кілька сотень Фарад. При виникненні на лінії великого пікового навантаження комплект суперконденсаторів або інерційних накопичувачів бере на себе компенсацію цього навантаження, не викликаючи перевантажень мережі, а розподіляючи навантаження рівномірно в часі.

Особливий інтерес серед індуктивних накопичувачів енергії в системах тягового електропостачання представляють надпровідникові індуктивні накопичувачі енергії (НПН) з можливістю тривалого терміну її зберігання [8].

У деяких зарубіжних країнах розпочато роботу з оснащення тягових ліній вторинними джерелами струму: комплектами акумуляторних батарей [4]. Головні недоліки існуючих методів стабілізації тягової напруги: значна собівартість та небезпека для персоналу при експлуатації накопичувачів, істотні капіталовкладення для розміщення таких систем, існує загроза екологічної безпеки.

В основу побудови швидкодіючих трансформаторно-напівпровідникових стабілізаторів було покладено

принцип модуляції і демодуляції змінної напруги з широтно-імпульсним регулюванням додаткової напруги [9].

Таким чином, в даний час є необхідна елементна база для використання накопичувачів в структурі електричної частини міського електричного транспорту.

На рис. 1 приведена силова схема для регулювання тягового електроприводу з накопиченням енергії. Дана система дозволяє забезпечити накопичення надлишкової енергії, яка виробляється електродвигуном в процесі гальмування, на конденсаторному накопичувачі та в її подальшому використанні в режимі розгону.

В стаціонарному режимі живлення якірної обмотки *Я* двигуна здійснюють від транзисторного перетворювача напруги, з'єднаного через фільтр *F* та діод *VD12* з мережею постійного струму через струмоприймач.

При русі вперед у режимі повного магнітного потоку транзистор *VT6* постійно включений, а транзистором *VT11* здійснюється регулювання напруги, що прикладається до якірної обмотки *Я* та обмотки збудження *L*, послідовно з'єднаної з останньою за допомогою діода *VD8*.

При постійності заданого значення струму в колі якірної обмотки *Я* шпаруватість регулювання транзистора *VT11* зі збільшенням швидкості руху також збільшується, і при певній швидкості транзистор *VT11* відкривається повністю.

Подальша підтримка заданої величини струму якірної обмотки *Я* здійснюється ослабленням магнітного потоку електродвигуна за допомогою зміни шпаруватості регулювання транзистора *VT9*. При включеному стані транзистора *VT9* струм якірної обмотки *Я* замикається по колу: контактна мережа – діод *VD12* – транзистор *VT6* – якірна обмотка *Я* – транзистор *VT9* – контактна мережа, а струм в обмотці збудження *L* замикається по колу: обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод

*VD9* – діод *VD8* – обмотка збудження *L*, при цьому зменшуючись із постійною часу цього ланцюга.

Слід відмітити, що в цьому режимі по елементах *VT9* та *VD9* протікає різниця струму якоря та струму збудження. При виключеному стані транзистора *VT9* складова струму рівна різниці між струмом якірної обмотки *Я* та струмом обмотки збудження *L* замикається через діоди *VD8* та *VD7*. При роботі в розглянутому режимі величина відношення середнього значення струму обмотки збудження *L* електродвигуна до середнього значення струму якірної обмотки *Я* при збільшенні шпаруватості регулювання транзистора *VT9* зменшується.

При русі вперед у гальмівному режимі регулювання шпаруватості роботи транзистора *VT7* забезпечується величина струму в обмотці збудження *L*, необхідна для забезпечення заданої величини струму в якірній обмотці *Я*. Зі зменшенням швидкості руху транспортного засобу та постійному значенні струму в колі якірної обмотки *Я*, регульованому за допомогою зміни струму в обмотці збудження *L*, останній збільшується та при певній швидкості стає рівним струму в якірній обмотці *Я*. У цьому режимі роботи електроприводу й режимах, що відповідають меншим значенням швидкостей, при включеному стані транзистора *VT7* струм якірної обмотки *Я* та струм обмотки збудження *L* замикаються по колу: якірна обмотка *Я* – транзистор *VT7* – обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод *VD9* – якірна обмотка *Я*.

При подальшому зменшенні швидкості шпаруватість регулювання транзистора *VT7* збільшується й при певній швидкості, при якій е.р.с. якірної обмотки *Я* стає рівною сумарному падінню напруги на елементах кола: якірна обмотка *Я* – транзистор *VT7* – обмотка збудження *L* – транзистор *VT11* – діод *VD9* – якірна обмотка *Я*, транзистор *VT7* відкривається повністю.

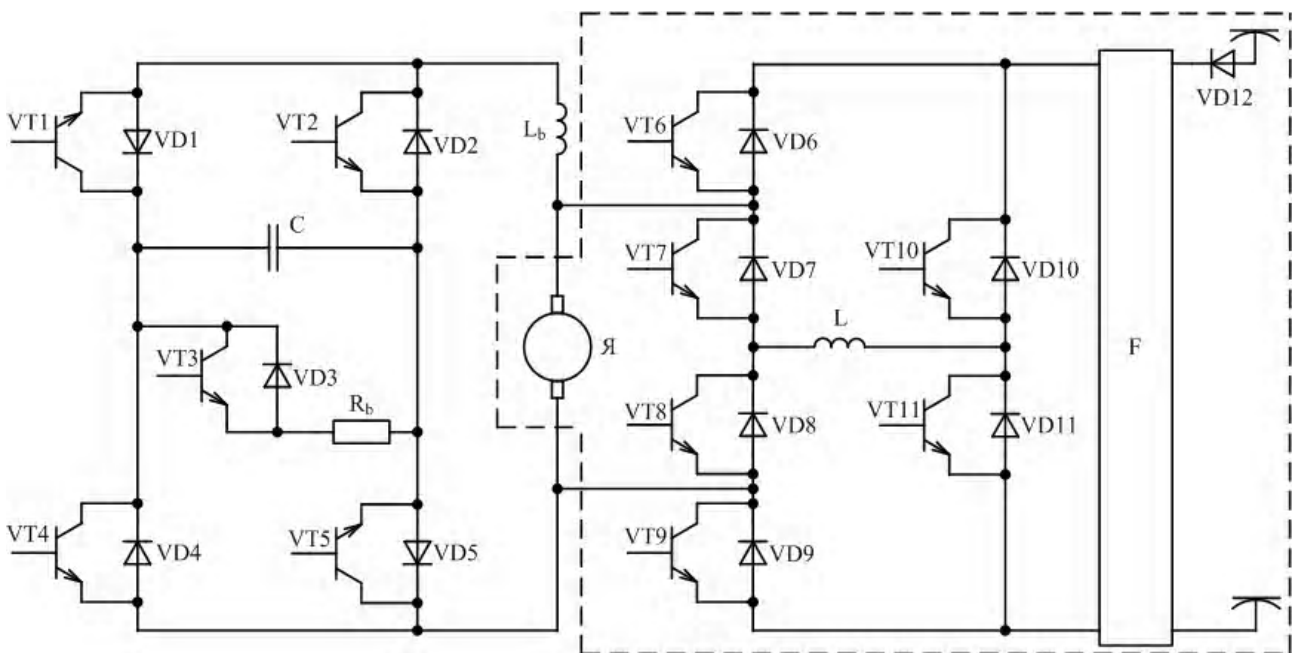


Рисунок 1 – Силовa схема для регулювання тягового електроприводу постійного струму з акумулюванням енергії

При подальшому зменшенні швидкості струм якірної обмотки  $Я$  замикається по контуру: якірні обмотка  $Я$  – буферна індуктивність  $L_b$  – транзистор  $VT2$  – конденсатор  $C$  – транзистор  $VT3$ . Потужність, вироблювана електродвигуном у цьому режимі, не передається в контактну мережу, а накопичується на конденсаторі  $C$ , протікаючи по контуру якірні обмотка  $Я$  – буферна індуктивність  $L_b$  – діод  $VD1$  – конденсатор  $C$  – діод  $VD5$ .

Якщо в процесі гальмування значення напруги на конденсаторі  $C$  підвищується до допустимого значення вмикається транзистор  $VT3$ , за допомогою якого забезпечується контур замикання струму якірної обмотки  $Я$

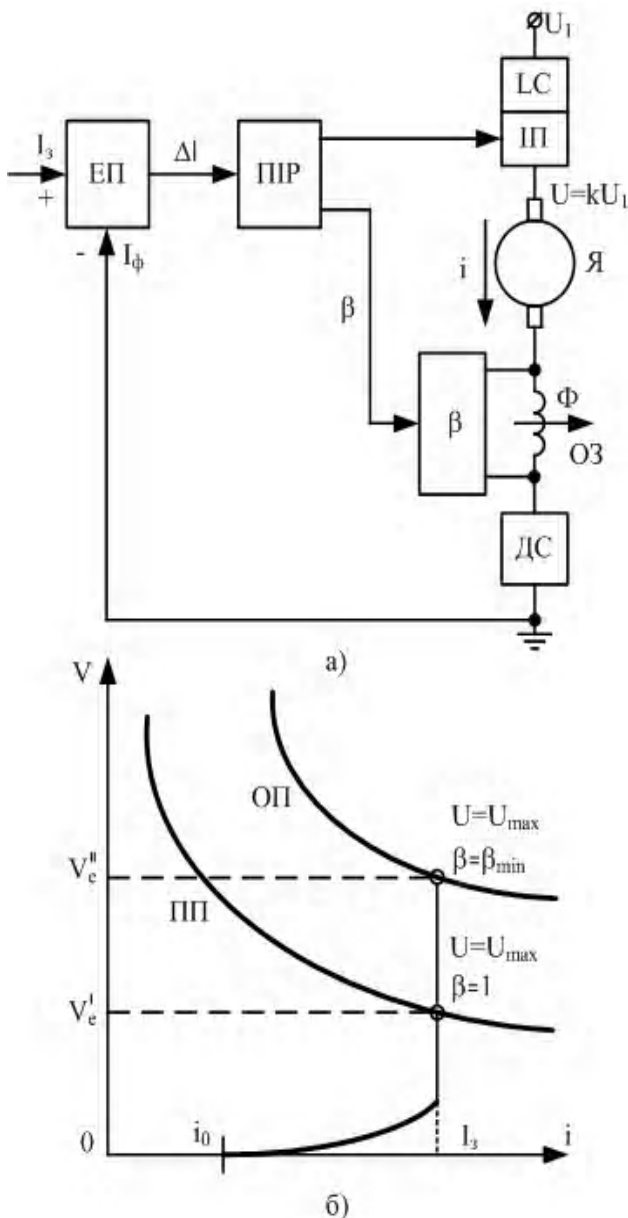
через резистор  $R_b$ , тим самим передача в нього енергії, вироблюваної електродвигуном у цьому режимі [10].

Для наведених режимів роботи складено системи диференціальних рівнянь [11] зведені у табл. 1, де прийняті наступні позначення  $u_M$  – напруга мережі,  $u_{я}$  – напруга якоря,  $i_{я}$  – струм якоря,  $i_{зб}$  – струм обмотки збудження,  $i_{cm}$  – струм статичний,  $i_{дин}$  – струм динамічний,  $E_0$  – електрорушійна сила,  $C_e$  – еквівалентна ємність,  $R_H$  – опір навантаження,  $R_{я}$  – опір якірної обмотки,  $L_{я}$  – індуктивність якірної обмотки,  $R_{зб}$  – опір обмотки збудження,  $L_{зб}$  – індуктивність обмотки збудження,  $k\phi$  – параметр магнітного потоку.

Таблиця 1 – Системи диференціальних рівнянь для режимів роботи системи для регулювання тягового електроприводу з акумулюванням енергії

Схема роботи	Диференціальне рівняння
<p>Режим повного магнітного потоку</p>	$\begin{cases} u_M = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{cm} + i_{дин}; \quad \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 = i_{cm} \cdot R_H; \\ k\phi = f(i_{зб}); \quad i_{зб}(0) = i_{я}(0). \end{cases}$
<p>Режим ослаблення магнітного потоку (VT9 відкритий)</p>	$\begin{cases} u_{я} = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt}; \\ 0 = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{cm} + i_{дин}; \quad \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 = i_{cm} \cdot R_H; \\ k\phi = f(i_{зб}); \quad i_{зб}(0) = i_{я}(0). \end{cases}$
<p>Режим ослаблення магнітного потоку (VT9 закритий)</p>	$\begin{cases} u_{я} = \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt + E_0 + i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ i_{я} = i_{зб} + i'_{я}; \\ 0 = i'_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di'_{я}}{dt} + \frac{1}{C_e} \int i'_{я} dt + E_0; \\ k\phi = f(i_{зб}). \end{cases}$
<p>Режим гальмування (VT2 відкритий)</p>	$\begin{cases} u_M \gamma = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ (E_0 + u_c) + \frac{1}{C} \int i_{дин} dt + \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + L_b \frac{di_{я}}{dt}. \end{cases}$
<p>Режим гальмування (VT2 закритий)</p>	$\begin{cases} u_M \gamma = i_{зб} R_{зб} + L_{зб} \frac{di_{зб}}{dt}; \\ (E_0 - u_c) + \frac{1}{C} \int i_{дин} dt + \frac{1}{C_e} \int i_{дин} dt = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + L_b \frac{di_{я}}{dt}. \end{cases}$

Наведену на рис. 1 силову схему, можна розглядати у загальному випадку, як схему з двома каналами управління: струмом якоря та ослабленням збудження. Для розрахунку контуру струму за рис. 2 а необхідно представити тяговий електродвигун як ланку типової замкнутої системи авторегулювання за відхиленням. Цю ланку за теорією автоматичного управління можна розглянути як нелінійну інтегруючу ланку з двома входними величинами ( $U = U_1 k$  та  $\beta$ ) та з вихідною величиною – струм  $i$ . Тут  $k$  – коефіцієнт заповнення імпульсного перетворювача ( $0 \leq k \leq 1$ ),  $\beta$  – коефіцієнт ослаблення збудження тягового електродвигуна.



**Рисунок 2** – Функціональна схема регулювання струму тягового електричного двигуна (а) та діаграма її роботи (б): ЕП – елемент порівняння; ППР – пропорційно-інтегральний регулятор; ІП – імпульсний перетворювач; ДС – датчик струму; ОЗ – обмотка збудження

Для побудови розрахункової моделі цієї ланки доцільно скористатися представленням магнітної характеристики тягового електродвигуна в аналітичній формі, названої також формулою Фроліша:

$$k\phi = \frac{\beta i}{A\beta i + B}, \quad (1)$$

де  $\phi$  – магнітний потік;  $k$  – постійна;  $A, B$  – коефіцієнти апроксимації.

Підставивши (1) в рівняння електричної рівноваги тягового електродвигуна

$$I = \frac{U - k\phi\omega}{R}, \quad (2)$$

де  $R$  – опір обмоток;  $\omega$  – частота обертання;  $k\phi\omega$  – електрорушійна сила тягового електродвигуна, отримаємо вираз для регульованої величини, а точніше аналітичний запис статичної характеристики регулювання двигуна в неявному вигляді

$$I = \frac{U}{R} - \frac{\beta i \omega}{(A\beta i + B)R}. \quad (3)$$

На базі схеми рис. 1 з урахуванням позицій наведених на рис. 2 в програмному пакеті Matlab розроблена математична модель тягового електротехнічного комплексу постійного струму для дослідження перехідних процесів в динамічному режимі.

В основі математичної моделі тягового приводу лежить вбудована в Simulink модель машини постійного струму. Для моделювання основного питомого опору руху задається момент опору  $M_o$ , пропорційний квадрату швидкості машини:

$$M_o = w_0(v) \left. \begin{aligned} w_0(v) &= 12 + 0,004v^2 \\ &\frac{M_{EPC} R_k}{\mu_{ред}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $R_k$  – радіус колеса транспортного засобу,  $\mu_{ред}$  – передавальне число тягового редуктора,  $M_{EPC}$  – фізична маса транспортного засобу.

Тяговий електродвигун постійного струму послідовного збудження ДК210-А3 в математичній моделі представлений блоком DC Machine: напруга  $U_H = 550$  В, потужність  $P_H = 110$  кВт, частота обертів  $n_H = 1500$  об/хв, опір якорної обмотки  $R_{я} = 0,0062$  Ом, опір обмотки збудження  $R_{зб} = 0,0048$  Ом. Величина ємності конденсатора дорівнює  $C = 12,71$  Ф.

В моделі реалізовані режими розгону, послаблення поля та гальмування, елементи перехідних процесів наведені на рис. 3. Аналіз результатів (рис. 3) показує працездатність запропонованої схеми та наступне:



1. Робота схеми відбувається за рахунок періодичної комутації вентилів зумовленою системою регулювання, при цьому амплітуда пульсацій струму на перевищує 3%.

2. При послабленні поля (рис. 3 б) короточасні шунтування обмотки збудження, та відповідно прямі підключення якоря до джерела живлення призводять до виникнення пульсацій струму які складають близько 5%.

3. Підтримка струму якоря (рис. 3в) при гальмуванні забезпечується системою управління накопичувача на заданому рівні а пульсації не перевищують 7%.

**ВИСНОВКИ**

1. Запропонована схема силового перетворювача, який забезпечує роботу машини постійного струму послідовного збудження з регулюванням напруги якоря та струму збудження, яка дозволяє реалізувати необхідні тягові характеристики.

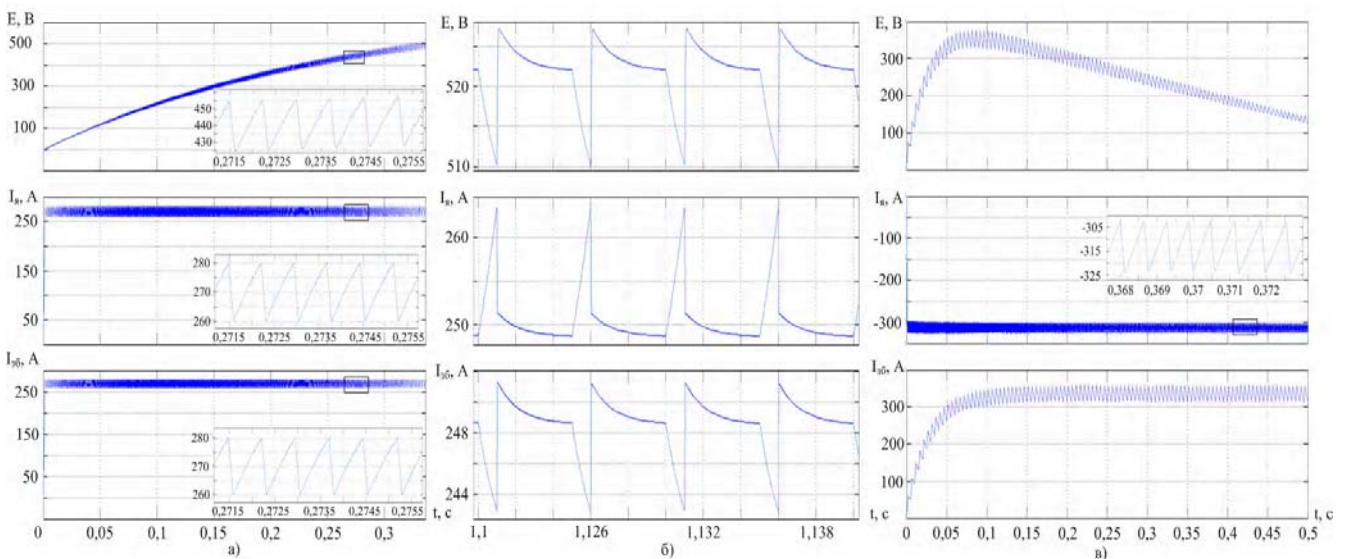
2. Шляхом введення в схему керованого конденсаторного накопичувача, та відповідного формування імпульсів управління транзисторами, реалізовано режими гальмування з накопиченням енергії гальмування на конденсаторі.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков – М. : Транспорт, 2005. – 464 с.
2. Иньков Ю. М. ЭПС с электрическим торможением / Ю. М. Иньков, Ю. И. Фельдман – М. : УМЦ ЖДТ, 2008. – 412 с.
3. Малоземов Б. В. Энергосберегающие технологии технического обслуживания электрического транс-

4. Пакулин А. Г. Уменьшение потерь и повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения / Пакулин А. Г. – Самара : СамИИТ, 1991. – 59 с.
5. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
6. Почаевец А. Г. Электрические подстанции / А. Г. Почаевец / – М. : Желдориздат, 2001. – 512 с.
7. Скляр В. Ф. Диагностическое обеспечение энергетического производства / В. Ф. Скляр, Р. А. Гуляев – Киев : Техника, 1985. – 184 с.
8. Шапиро С. В. Система стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта / С. В. Шапиро, С. Р. Муфтиев // Электротехника. 2010 № 3. С. 40–46.
9. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1981. – 320 с.
10. Пристрій для регулювання тягового електроприводу з акумулюванням енергії [Текст] : патент на корисну модель № 75123. Україна: МПК НО23 7/00 / Курись Л. В., Бялобржеський О. В., Лосіна К. І.; Заявник та патентовласник: Кременчуцький національний університет умені М. В. Остроградського. – заявл. 17.04.2012; опубл. 26.11.2012, бюл. №22, 2012.
11. Черный А. П. Моделирование электромеханических систем / А. П. Черный, А. В. Луговой, Д. И. Родькин. – Кременчуг, 1999. – 204 с.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2015  
Після доробки 20.04.2015



**Рисунок 3** – Графіки перехідних процесів електричної сили, струму якоря та струму збудження тягового електроприводу постійного струму в режимі повного магнітного потоку (а), режимі ослаблення магнітного потоку (б) та в режимі гальмування (в)

Курьсь Л. В.<sup>1</sup>, Бялобржеский А. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант, кафедра Систем електропостачання та енергетичного менеджмента, Кременчузький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри Систем електропостачання та енергетичного менеджмента, Кременчузький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

**СТРУКТУРА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

*В работе проведен анализ существующих способов повышения энергетической эффективности транспортных средств с электрической трансмиссией, на основании, которого выделено особое место накопителей электроэнергии. Для исследования переходных процессов в режимах работы транзисторного преобразователя разработана математическая модель тягового электротехнического комплекса. В модели реализованы динамический (разгон) и стационарный (ослабление магнитного потока) режимы двигателя постоянного тока с конденсаторным накопителем энергии.*

**Ключевые слова:** *электрифицированный транспорт, система дифференциальных уравнений, математическая модель, переходные процессы, ослабление магнитного потока, накопитель энергии.*

Kurys L.V.<sup>1</sup>, Bialobrzieski O.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate Department Electricity consumption systems and power management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

<sup>2</sup>Associate Professor Department. Electricity consumption systems and power management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

**THE STRUCTURE OF THE ELECTROTECHNIC TRACTION COMPLEX OF VEHICLE WITH ENERGY STORAGE**

*This paper analyzes the existing means of improving the energy efficiency of vehicles with electric transmission, on its basis the special place of electricity storage is allocated. The scheme of transistor converter for implementation of the DC motor traction characteristics by consistent or independent excitation modes of acceleration movement and braking is given. Additionally, the scheme is introduced for the controlled capacitor drive for accumulation of excess braking energy and use it during acceleration. To study the transition process in operation mode of transistor converter the mathematical model of electro-technical traction complex is developed. The model realizes the dynamic (acceleration) and stationary (weakening magnetic flux) modes of DC motor with capacitor energy storage.*

**Key words:** *electrified transportation, system of differential equations, mathematical model, transitional processes, weakening magnetic flux, energy storage.*

**REFERENCES**

1. Burkov A. T. Elektronnaya tehnika i preobrazovateli. Moscow, Transport, 2005, 464 p.
2. In'kov U. M., Fel'dman U. I. E'PS s e'lektricheskim tormozheniem. Moscow, UMCZ ZHDCZ, 2008, 412 p.
3. Malozemov B. V. E'nergoberegaushie tehnologii tehnicheskogo obsluzhivaniya e'lektricheskogo transporta. E'lektroe'nergiya I buduchhee civilizachii: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Tomsk, 2004, pp. 391–393.
4. Pakulin A. G. Umen'shenie poter i povыshenie kachestva e'lektricheskoy e'nergii v sisteme tyagovogo e'lektrosnabzheniya. Samara, SamIIT, 1991, 59 p.
5. Moskalenko V. V. E'lektricheskii privod. Moscow, Akademiya, 2007, 368 p.
6. Pochaevecz A. G. E'lektricheskije podstanczii. Moscow, Zheldorizdat, 2001, 512 p.
7. Sklyarov V. F. Diagnosticheskoe obespechenie e'nergeticheskogo proizvodstva. Kyiv, 1985, 184 p.
8. Shapiro S. V. Sistema stabilizaczii napryazheniya tyagovy'h podstanczuy gorodskogo e'lektrotransporta, E'lektrotehnika, 2010, No. 3, pp. 40-46.
9. Parhomenko P. P. Osnovy' tehnicheskoy diagnostiki (optimizaczija algoritmov diagnostirovaniya, apparaturny'e sredstva). Moscow, 1981, 320 p.
10. Kurys L. V., Bialobrzieski O. V., Losina K. I. Prustriy dlya regulyvannya tyagovogo elektroprivodu z akumulyvannya energii: patent na korysnu model № 75123. Ukraina: MPK HO23 7/00, Zaiavnyk ta patentovlasnik: Kremenchuczkyy natsionalnyi universtet imeni M. V. Ostrogradskogo, zaiavl. 17.04.2012; opubl. 26.11.2012, biul. №22, 2012.
11. Chorny'y A. P. Modelirovanie e'lektromehaniicheskikh sistem. Kremenchug, 1999, 204 p.

## ЭЛЕКТРОПРИВОД МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Разработана концепция построения транзисторного регулятора для электроприводов малой мощности с использованием оригинального принципа управления.*

*Выполнено изготовление и испытание в реальных объектах образцов регуляторов, характеристики которых при простом, но эффективном построении удовлетворяют всем требованиям систем, которые устанавливаются в сварочном оборудовании.*

**Ключевые слова:** сварка, механизация, автоматизация, системы, электропривод, регулирование, точность

Рациональное конструирование оборудования в соответствии с требованиями потребителя – необходимое условие современного рынка. В любой конструкции должны быть заложены все условия для обеспечения его успешной эксплуатации и минимизации затрат потенциальных заказчиков. Всё это в полной мере относится к механизированному и автоматическому оборудованию для дуговой сварки и наплавки сталей и сплавов алюминия.

Основу движущихся систем сварочных автоматов и полуавтоматов составляют различные приводы разных конструкций. В последнее время всё более используют регулируемые электроприводы.

Можно заметить, что в механизированном сварочном оборудовании используются электродвигатели постоянного тока мощностью не более 100 Вт. В автоматизированном оборудовании несколько более мощные электродвигатели, в том числе и трёхфазные [1].

Следует отметить, что и ранее и в настоящее время серийно регулируемые комплектные электроприводы для механизированного сварочного оборудования не выпускались ни в нашей стране, ни за рубежом. Каждая фирма – разработчик сварочного оборудования, как показывает анализ [2, 3], разрабатывали и в составе сварочных полуавтоматов производили электроприводы различных конструкций и разной сложности в зависимости от конкретного назначения полуавтоматов (тип сварочной проволоки, режимы, условия эксплуатации и др.).

Как правило, большинство этих электроприводов, исключая электроприводы с параметрическим регулированием, использовало в качестве силовых ключей тиристоры или, в последнее время всё более часто, транзисторы с различными структурами. Транзисторные регуляторы электроприводов имеют существенные преимущества перед другими практически во всех областях применения, а для сварочного оборудования в особенности, так как могут получать питание практически от любого источника, в частности от выходного напряжения (напряжения на дуге).

Традиционно регулируемые электроприводы имеют обратные связи, стабилизирующие частоту вращения вала электродвигателя при изменениях нагрузки. Достигается такая стабилизация введением обратных связей по напряжению на якоре электродвигателя (непосред-

ственное измерение), по ЭДС (в безтоковых паузах), с  $I_{я}R_{я}$  – компенсацией ( $I_{я}$ ,  $R_{я}$  – ток и сопротивление якорной цепи соответственно). Для улучшения динамических свойств комплектного электропривода и соответствующего механизма используют различные корректирующие структуры (ПИ, ПИД и др., в том числе их комбинации и гибкие связи, а также двухзонное регулирование). Всё это существенно усложняет систему регулирования электропривода.

В последнее время значительно повысились и расширились требования к электроприводам сварочного оборудования, в частности надёжности, диапазона регулирования, простоты конструкции и, особенно, жесткости механических характеристик. Так, например, для электропривода механизма подачи электродной проволоки из сплавов алюминия для ряда случаев поддержание установленной скорости подачи должно быть не хуже 2% [4]. Конструкции электроприводов, используемых в отечественном сварочном оборудовании не обеспечивают в полном объеме выполнение этих требований. Невозможность выполнить требование точности поддержания частоты вращения вала электродвигателя обуславливается использованием известных способов формирования и отработки соответствующих обратных связей по стабилизации рассматриваемого параметра.

**Целью настоящей работы является разработка рациональной конструкции регулируемого электропривода повышенной точности для применения в оборудовании дуговой механизированной и автоматической сварки.**

Использование обратной связи по частоте вращения вала электродвигателя или комбинации другого типа обратных связей, которые в той или иной мере могут являться аналогом прямого измерения частоты вращения, при пропорциональном регуляторе (П-регулятор) приводят к наличию ошибки регулирования, которая является следствием того, что система регулирования электропривода обрабатывает сигнал управления (рассогласование)  $U_p$ , который определяется выражением

$$U_p = U_3 - U_{o.c.}, \quad (1)$$

где  $U_3$ ,  $U_{o.c.}$  – сигналы задания уровня частоты вращения вала электродвигателя и обратной связи соответственно.

При П-регуляторе выражение (1) в виде сигнала управления может только стремиться к пределу

$$U_3 - U_{o.c.} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Но именно при сигнале управления равном или близким к нулю, обеспечивается точное регулирование частоты вращения вала электродвигателя. Очевидно, что в этом случае практически никакого регулирования нет. Нам представляется возможным назвать в обобщённом виде такое регулирование односторонним или однополярным. Стремление уменьшить значение сигнала рассогласования по выражению (1) вызывает необходимость применения в регуляторе электропривода усилителей, что неизбежно ведёт к его усложнению.

На основании изложенного, а также, анализируя возможные варианты схемотехнического решения задачи повышения точности работы электропривода при очень простой конструкции, нами предложена схема транзисторного электропривода, работающего по принципу релейных электроприводов, но существенно отличающихся от них.

Схема электрическая принципиальная такого электропривода с обозначенным нами регулированием представлена на рис. 1.

Электропривод включает в себя, электродвигатель постоянного тока М1.1 с датчиком обратной связи в виде тахогенератора М1.2, силовой транзистор VT3, генератор, собранный на транзисторах VT1, VT2. Напряжение задания  $U_3$  определяется резистором R7, который под-

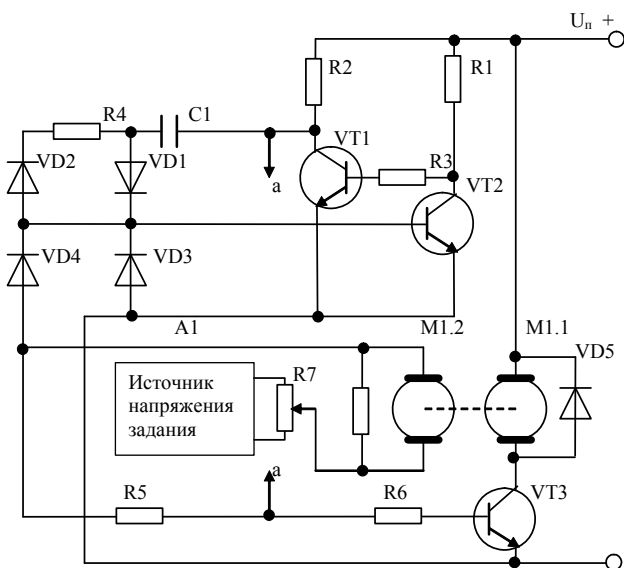


Рисунок 1 – Электропривод постоянного тока с двухсторонним регулированием частоты вращения вала.

ключён к стабилизированному источнику А1 (может быть цепь со стабилитроном).

Следует заметить, что тип используемых транзисторов не имеет значения, а некоторые узлы могут быть реализованы в микросхемном исполнении. Так нами в качестве силового транзистора использовались и обычные биполярные транзисторы и транзисторы с полевыми структурами.

Длительность импульса управления формируется цепочкой R2, C1, VD1, через которую ток поступает на базу VT2 до полного заряда конденсатора C1. Транзистор VT2 открывается, поэтому на базу VT1 приходит нулевой уровень напряжения. Заряженный конденсатор C1 ток не пропускает, поэтому транзистор VT2 закрывается, появляется ток на базе VT1, через который конденсатор C1 разряжается по цепочке R4, VD2, VD3, которая образует время паузы или остановку работы генератора на транзисторах VT1, VT2, если не поступает напряжение управления через диод VD4.

Рассмотрим более подробно работу электропривода, обратив внимание на то, что в нём применено три типа обратных связей:

1. положительная обратная связь через конденсатор C1, формирующая фронты включения и выключения импульсов;
2. положительная обратная связь через резистор R5, формирующая два порога срабатывания регулятора;
3. отрицательная обратная связь через тахогенератор, формирующая регулирующее напряжение в соответствии с (1).

Идеализованно принцип регулирования в электроприводе можно представить в виде диаграммы, представленной на рис. 2

Анализ работы рассматриваемого электропривода целесообразно вести с использованием достаточно простых, но показательных и точно выбранных (обоснованных) соотношений.

Рассмотрим момент когда  $U_3 = U_{o.c.}$ . При этом ток базы  $I_{б1}$  транзистора VT2 равен нулю и транзистор закрыт, а транзистор VT1 открыт и шунтирует базу силового транзистора VT3. Транзистор VT3 закрыт и напряжение питания на электродвигатель не поступает и он снижает частоту вращения. Равенство  $U_3 = U_{o.c.}$  нару-

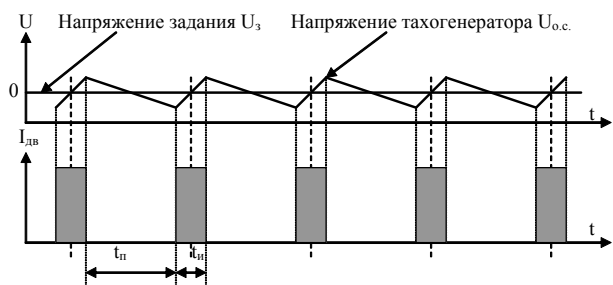


Рисунок 2 – Идеализованная диаграмма регулирования в двухстороннем регуляторе электропривода:  $t_n$ ,  $t_п$  – времена действия импульсов тока и пауз соответственно

шается в соответствие с выражением (1), которое для двухстороннего управления можно уточнить в виде

$$U_3 - U_{o.c.} = +U_p \quad (3)$$

При снижении частоты вращения величина  $+U_p$  растёт до уровня напряжения, при котором ток базы транзистора VT2 становится равным  $I_{б1нз}$  – току начала генерирования импульса. Это приводит к открытию транзистора VT2 и закрытию транзистора VT1. Шунтирование с базы транзистора VT3 снимается и он открывается, подавая напряжение питания на электродвигатель, частота вращения вала которого повышается и вместе с тем растёт напряжение, снимаемое с тахогенератора  $U_{o.c.}$ . Во время снятия шунтирования с базы транзистора VT3 также снимается шунтирование с резистора положительной обратной связи R5. Через резистор R5 протекает ток  $I_{б1o.c.}$ , образуя ток базы транзистора VT2  $I_{б2o.c.}$ , который определяется в виде

$$I_{б2o.c.} = I_{б1нз} + I_{б1o.c.} \quad (4)$$

Характеристика генератора, состоящего из транзисторов VT1, VT2 в идеализированном виде для иллюстрации описания представлена на рис. 3.

При росте частоты вращения вала электродвигателя  $+U_p \rightarrow 0$  транзистор VT2 не закрывается потому, что суммарный ток через его базу составляет  $I_{б2o.c.} \rightarrow I_{б1o.c.}$  и достаточен для удержания его в открытом состоянии.

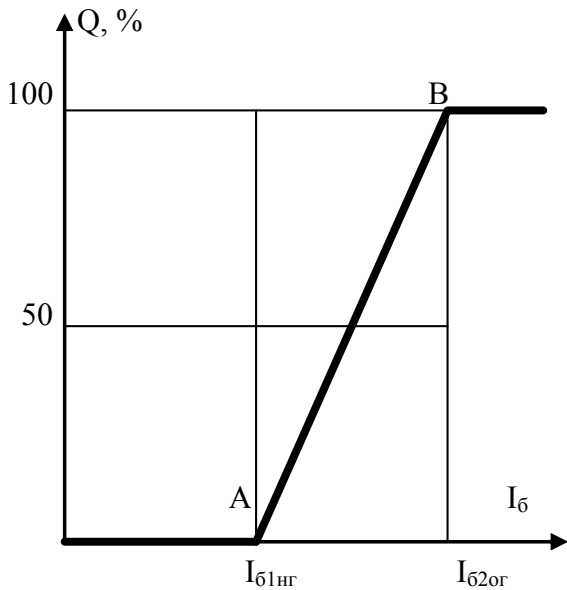


Рисунок 3 –Характеристика генератора, составленного из транзисторов VT1 и VT2:

Q – скажность генерируемых импульсов

Частота вращения вала электродвигателя продолжает увеличиваться и напряжение с тахогенератора  $U_{o.c.}$  начинает превышать напряжение задания  $U_3$ . При этом образуется новый уровень напряжения управления  $U_p$ , определяемый в виде

$$U_3 - U_{o.c.} = -U_p. \quad (5)$$

Отрицательное напряжение  $-U_p$  создаёт противоток  $I_{-U_p}$ , который, суммируясь с током  $I_{б1o.c.}$  через резистор R5, обеспечивает величину тока  $I_{б2з}$ , при котором транзистор VT2 закрывается, т.е.

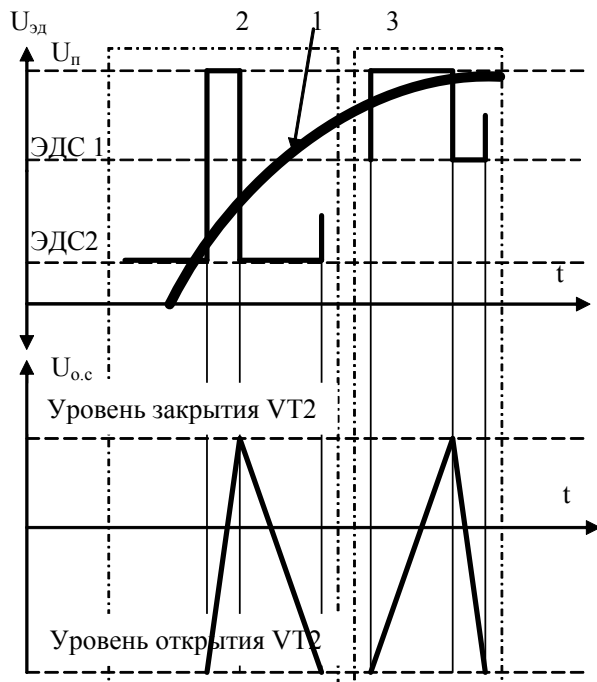
$$I_{б2з} = I_{б1o.c.} - I_{-U_p}. \quad (6)$$

Когда величина тока (6) ниже порога срабатывания транзистора VT2: он закрывается, обеспечивая закрытие силового транзистора VT3 и, соответственно безтоковую паузу электродвигателя. Именно через резистор R5 действует положительная обратная связь, обеспечивающая регулирование частоты вращения вала электродвигателя.

Рассмотрим более подробно, как в рассматриваемом электроприводе происходит поддержание заданного числа оборотов вала электродвигателя при изменении нагрузки, что весьма характерно для ряда узлов оборудования для дуговой сварки плавящимся электродом. Особенно это проявляется в системах подачи электродной проволоки полуавтоматов с длинными шланговыми держателями. На рис. 4. графически представлен алгоритм отработки возмущения при изменении момента нагрузки на валу приводного электродвигателя. Для простоты представления работы транзистора VT2, а, следовательно, и силового транзистора VT3 и, соответственно, электродвигателя изменение нагрузки представлено в виде прямолинейных участков. Несколько более точно на рис.5 графически представлен принцип изменение частоты вращения вала электродвигателя при изменении уровня напряжения задания  $U_3$ . Напряжения ЭДС1 и ЭДС2 соответствуют малому и большому уровню напряжения задания.

Особо отметим, что в при формировании импульсов открытия и закрытия транзисторов VT2 и VT3 время действия импульса и паузы образуется в соответствие со скоростью уменьшения частоты вращения вала электродвигателя, которое, естественно, зависит от момента на валу электродвигателя, что следует из основного уравнения движения электропривода [5]

$$M_n - M_c = J \sum \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$



**Рисунок 5** – Принцип регулирования частоты вращения при изменении напряжения задания: 1 – изменение тока электродвигателя в зависимости от уровня напряжения задания; 2 – формирование импульса управления при малом уровне задания; 3 – формирование импульса управления при большом уровне задания

где  $M_n, M_c$  – момент, на валу электродвигателя и момент сопротивления соответственно;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции;  $\omega$  – частота вращения вала электродвигателя.

Очевидно, что чем больше момент нагрузки на валу, тем выше скорость снижения частоты вращения и короче время действия паузы, но при этом чем больше момент нагрузки на валу, тем меньше скорость возрастания частоты вращения во время действия импульса и, естественно, больше длительность импульса. Таким образом длительность импульса определяется временем увеличения частоты вращения (рост ЭДС электродвигателя) между двумя уровнями транзисторов VT2 и VT3 (закрыты - открыты). Длительность паузы зависит от времени снижения частоты вращения (спад ЭДС). Скважность импульсов, поступающих на якорь электродвигателя, как следует из изложенного, определяется условиями его работы.

Следует особо подчеркнуть, что регулятор электропривода обрабатывает не просто изменение величины на валу электродвигателя момента или задания – он практически обрабатывает скорость изменения возмущений

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$

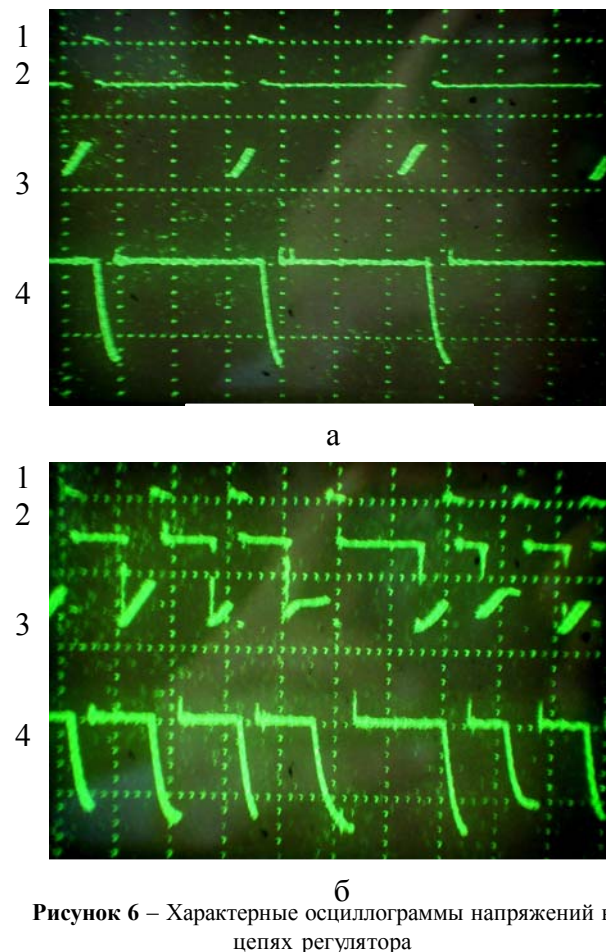
где  $\varepsilon$  – угловое ускорение.

Отработка величин пропорциональных скоростям изменений возмущений позволяет при достаточной простоте технических решений получить высокие показатели точности регулирования.

Экспериментальные исследования электропривода проводились с применением электродвигателя ДПУ87-75 (мощность 75 Вт, номинальная частота вращения вала  $\omega_n = 16,7 \text{ C}^{-1}$ ) со встроенным тахогенератором ТП-80. Настройка схемы проводилась с обеспечением следующих основных параметров:  $I_{\theta 1} = 1,5 \text{ mA}$ ;  $I_{\theta 2 \text{ o} \theta 2} = 2,0 \text{ mA}$ . При этом обеспечивалась частота следования импульсов 200 Гц.

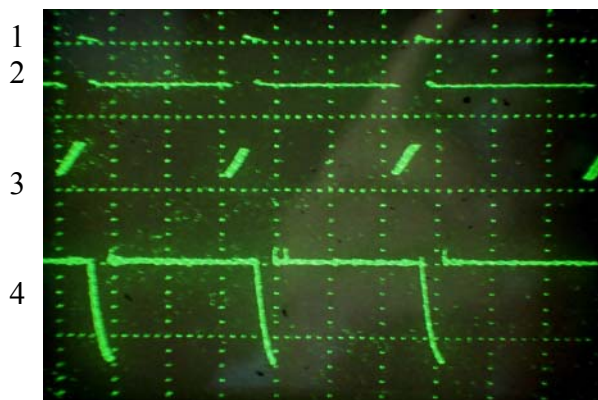
Характерные осциллограммы напряжений в некоторых важных точках схемы для разных режимов работы электропривода представлены качественно на рис. 6. На рис. 6 а даны осциллограммы стационарного режима работы электропривода, а на рис. 6 б – с импульсной нагрузкой.

Подтверждена ожидаемая в высокой степени инвариантность (квазиинвариантность) электропривода к параметрическим и координатным возмущениям. Так при изменении момента нагрузки в диапазоне  $(0,3 \dots 1,2) M_n$  ( $M_n$  – номинальный момент) в диапазоне регули-

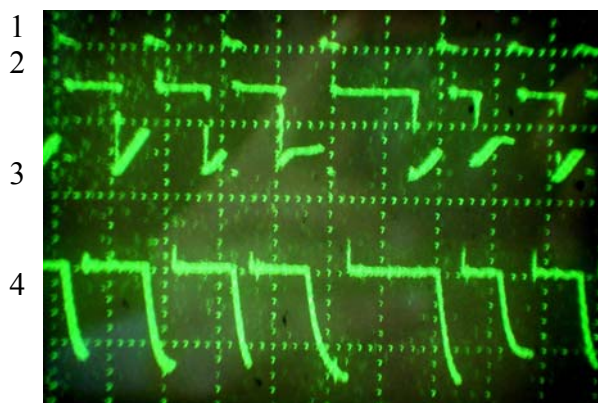


**Рисунок 6** – Характерные осциллограммы напряжений в цепях регулятора





а



б

Рисунок 6 – Характерные осциллограммы напряжений в цепях регулятора

рования частоты вращения  $(0,2 \dots 1,0) \omega_n$  ( $\omega_n$  – номинальная частота вращения) отклонения в частоте вращения вала не превысили 1,0% внизу диапазона регулирования, а при диапазоне  $(0,08 \dots 1,0) \omega_n$  – 2,0% внизу диапазона регулирования.

Простота и эффективность разработанного электропривода, его высокая помехоустойчивость позволяют широко использовать его в различных системах сварочного оборудования. В рамках настоящей работы электропривод был применён в наиболее проблематичном узле – механизме подачи электродной проволоки полуавтомата многовариантного применения – ПШ107В.

Перспективой для дальнейшего развития предложенной технической разработки является решение с использованием в качестве датчиков частоты вращения вала параметров режима электродвигателя.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанный транзисторный электропривод с двухсторонним регулированием для установки в сварочное оборудование при очевидной простоте конструкции обеспечивает высокую степень инвариантности к основному типу возмущения – моменту на валу приводного электродвигателя.

2. Электропривод с двухсторонним регулированием близок по концепции к электроприводам с релейным принципом функционирования [6,] или автоколебательным электроприводам [7], однако отличается от них по способу получения режима регулирования с использованием дополнительных обратных связей.

3. По нашему мнению разработанный и рассмотренный в статье транзисторный электропривод малой мощности с двухсторонним регулированием может быть предложен для реализации в микросхемном исполнении, например по типу ИЛ33153Р или подобным с введением необходимых защит.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В. А. Современное механизированное оборудование для сварки и наплавки и его технико-технологические возможности. / В. А. Лебедев., С. Ю. Максимов. – Киев : Основа, 2012. – 392 с.
2. Лебедев В. А. Международная выставка «Сварка Украины 2002» // Автомат. сварка. – 2002. – № 6. – С. 56–59
3. Можайский В. А. Сварочное оборудование фирмы Lincoln Electric / В. А. Можайский, О. В. Колупанов, Ф. В. Квасов // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 37–41.
4. Зусин В. Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В. Я. Зусин. – Мариуполь. Рената, 2004. – с. 468
5. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, – 1985. – 560 с.
6. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического управления и регулирования / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1979. – 255 с.
7. Лебедев В. А. Автоколебательные транзисторные электроприводы постоянного тока для сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона / В. А. Лебедев, В. Г. Новгородский // Сварочное производство 2003. – № 8. – С. 26–31.

Статья поступила в редакцию 27.04.2015  
После доработки 27.05.2015

Лебедев В. А.

Докт. техн. наук, ІЕЗ ім. Е.О. Патона, НАН України

### ЕЛЕКТРОПРИВІД МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

*Розроблено концепцію побудови транзисторного регулятора для електроприводів малої потужності з використанням оригінального принципу управління.*

*Запропонований принцип регулювання близький до релейного або коливального типу електроприводу, проте відрізняється від нього більш високим ступенем інваріантності до змін моменту завантажень на валу приводного електродвигуна.*

*Особливістю розробки є те, що регулятор електроприводу відпрацьовує не просто зміна величини на валу електродвигуна моменту або завдання - він практично відпрацьовує швидкість зміни збурень.*

*Показано, що нова розробка електроприводу враховує особливості роботи основних вузлів механізованого та автоматичного обладнання для дугового зварювання електродом, але може бути використані і в інших об'єктах промисловості.*

*Виконано виготовлення та випробування в реальних об'єктах зразків регуляторів, характеристики, яких при простому, але ефективному побудові задовольняє всім вимогам систем, які встановлюються в зварювальному обладнанні.*

*Запропоновано розширити застосування розглянутого електроприводу при його реалізації в мікросхемному виконанні.*

**Ключові слова:** зварювання, механізація, автоматизація, системи, електропривід, регулювання, точність.

Lebedev V. A.,

Doctor of science PWI. EO Paton, NASU, Ukraine

### LOW POWER ELECTRIC DRIVE FOR WELDING EQUIPMENT

*The concept of transistor controller construction for low-power electric drives using the original principle of control is presented.*

*The proposed principle of regulation is close to the relay or oscillatory type actuator, but differs from it by the higher degree of invariance to changes in torque downloads on drive motor shaft.*

*The feature of the development is that the drive controller fulfills not just a change in the value on the torque motor shaft or jobs - it fulfills almost the rate of disturbances change.*

*It is shown that new development takes into account the drive features of the basic units of mechanized and automated equipment for arc welding, but can be used in other industrial facilities.*

*Manufacture and testing facilities are performed in real samples regulators, which characteristics in a simple but efficient construction meets all requirements of systems that are installed in the welding equipment.*

*It is proposed to expand the use of electric considered at its implementation in integrated circuit design.*

**Keywords:** welding, mechanization, automation systems, electric, regulation, precision

### REFERENCES

1. Lebedev V. A., Maksimov S. Yu. *Sovremennoe mehanizirovannoe oborudovanie dlya svarki i naplavki i ego tehniko-tehnologicheskie vozmozhnosti*. Kiev, Osnova, 2012, 392 p.
2. Lebedev V. A. *Mezhdunarodnaya vystavka Svarka ukrainy 2002*, *Avtomat. Svarka*, 2002, No 6, pp. 56–59
3. Mozhayskiy V. A., Kolyupanov O. V., Kvasov F. V. *Svarochnoe oborudovanie firmy Lincoln Electric, Svarochnoe proizvodstvo*, 1998, No 8, pp. 37–41.
4. Zusin V. Ya. *Svarka i naplavka alyuminiya i ego splavov*. Mariupol, Renata, 2004, 468 p.
5. Klyuchev V. I. *Teoriya elektroprivoda*. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 560 p.
6. Popov E. P. *Teoriya nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya i regu-lirovaniya*. Moscow, Nauka, 1979, 255 p.
7. Lebedev V. A., Novgorodskiy V. G. *Avtokolebatelnyie tranzistornyie elektroprivody postoyannogo toka dlya svarochnogo oborudovaniya IES im. E.O. Patona. Svarochnoe proizvodstvo 2003*, No 8, pp. 26–31.



## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ В ПРОЦЕССЕ КОММУТАЦИИ

*В статье рассмотрена методика определения температуры поверхности сильноточных разрывных контактов работающих при бездуговой коммутации цепи переменного тока. Определение температуры основы валось на численном решении граничной обратной задачи теплопроводности. Получены расчеты температуры контактных поверхности в зависимости от времени. Расчет выполнен с помощью пакета прикладных программ MathCAD. Полученные значения температуры с помощью данной методики являются более точные, чем при использовании известных.*

**Ключевые слова:** электрический контакт, температура, задача теплопроводности, контактная поверхность, коммутация.

### ВВЕДЕНИЕ

Причины, по которым происходят повреждения контактных систем электрических аппаратов, носят как эксплуатационный, так и конструкторско-технологический характер [1–4]. Последние, не столько результат просчетов в проектировании или технологии изготовления контакт-деталей, такие причины с ростом опыта их производства, как правило, устраняются, а результат неполного понимания условий работы контактных систем. В первую очередь, это происходит из-за слабого обеспечения средствами и методиками диагностики состояния работы разрывных контактов (РК). Основную сложность в оценке разрушающего действия эксплуатационных факторов на РК, оказывает быстротечный характер выделения энергии при их коммутации. Этот процесс проявляется скачкообразным ростом температуры и динамикой механических и физико-химических реакций на контактных поверхностях и в рабочей среде. Отмечено что, несмотря на различную природу деструктивных процессов происходящих при коммутации сильноточных электрических аппаратов, все они проявляются ростом температуры контактных поверхностей РК. Температурный режим работы контактов, считается оперативным и надежным индикатором их рабочего состояния [5]. Рост температуры контактных поверхностей в процессе коммутации обусловлен нарушением баланса тепла генерируемого согласно закону Джоуля-Ленца на контактных соединениях и его количества отдаваемого в окружающую среду. Применение получивших широкое распространение эллиптической и сферической модели невозможно для данной задачи, т. к. они используются для слаботоочных контактов или для контактов работающих в установившемся режиме, что не рассматривалось в данной статье [6, 7].

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** заключается в разработке методики определения температуры поверхности сильноточных разрывных контактов в процессе коммутации.

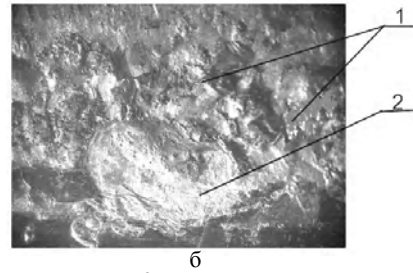
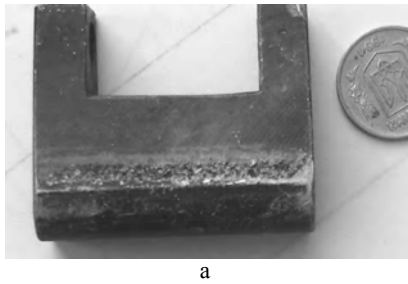
### МАТЕРИАЛИ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Процесс теплоотвода в окружающую среду значительно более длительный, чем генерация тепла, что приводит к локализации температуры в узком слое контактных поверхностей РК. На рис. 1 показан снимок сильноточного РК (материал – медь М1), с типичными следами электротермического повреждения, локализованными в верхнем слое рабочей поверхности. На рисунке видно, что поверхность контакта нагревалась до температуры плавления (для меди  $T_{пл} = 1083^{\circ}\text{C}$ ). На это отчетливо указывают оплавленные участки и застывшие на поверхности расплава окисные пленки. Такая картина повреждения не соответствует используемым методикам оценки температуры контактных поверхностей [6, 7], при использовании которых значения, получаемые расчетным путем, составили бы менее  $300^{\circ}\text{C}$ .

Для устранения этого противоречия предложен метод оценки температуры контактной поверхности во время замыкания сильноточных контактов на основе численного эксперимента. При его использовании температура недоступных для прямого измерения рабочих зон, какой является поверхность сильноточных разрывных контактов во время коммутации, оценивается по результатам интерполяции значений температур в других точках контакт-детали.

По примеру исследования быстротечных тепловых процессов в других отраслях науки и техники (в области сварки, металлургии, двигателестроения, аэрокосмической технике и др.) применялся хорошо зарекомендовавший себя метод численного эксперимента на основе решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ), что, существенно упрощает и одновременно повышает точность получаемых результатов.

Теоретической основой тепловых нестационарных электротермических процессов служит уравнение теплопроводности:



**Рисунок 1** – Картина электротермического повреждения контактной поверхности: а – общий вид РК; б – зона повреждения контактной поверхности при увеличении в 30 раз

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T), \quad (1)$$

где  $c\gamma$  – удельная объемная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Q_w(x, y, z, t, T)$  – мощность источников тепловыделения.

Поскольку уравнение является многовариантным, необходимо вводить уточняющие условия, содержащие информацию о размерах и теплофизических свойствах изучаемого объекта, а также о начале и продолжительности процесса теплопередачи и зоне нагрева. Это существенно упрощает математическую постановку задачи, сведя ее к одномерному нестационарному решению

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w(x, t, T). \quad (2)$$

В результате, сформулированные условия вместе с крайевыми условиями (начальными и граничными) позволяют получить численную модель теплового процесса, т. е. тепловое поле в виде таблиц чисел, получаемых расчетным путем [8].

На рис. 2 показана общая схема алгоритма решения граничной ОЗТ, которая на разных этапах может быть сформулирована как псевдообратная задача, или как задача Коши [9], решаемая методом конечных разностей или методом квазиобращения соответственно [10].

Для проверки методики была взята модель сильноточного контакта в виде прямоугольного теплоизолированного стержня, нагрев которого осуществляется одномерным тепловым потоком  $q_0(t)$  со стороны полупространства  $x < 0$  (рис. 3).

Решение уравнений теплопереноса проводится путем рассмотрением двух граничных ОЗТ. При этом первая задача решается как прямая граничная задача теплопроводности. Использование численного метода решения уравнения конечных разностей позволило получить

значение искомой сеточной функции на участке  $x_1 - x_2$

$$T_i^{k+1} = \left( 1 - \frac{2\tau\lambda}{c\gamma h^2} \right) T_i^k + \frac{\tau\lambda}{c\gamma h^2} (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k), \quad N-1 < i < M-1, k = 0, 1, 2, \dots, K-1. \quad (3)$$

Далее вычислялся тепловой поток  $q_1(t)$  на глубине  $x = x_1$

$$q_1 = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1}, \quad (4)$$

При решении второй ОЗТ, представленной в виде неклассической задачи Коши, используются экспериментальные значения температуры  $\hat{T}_1(t)$  и рассчитанный тепловой поток  $q_1(t)$ . Задача относится к типу некорректных обратных задач математической физики, принцип решения которых, сводится к замене исходного уравнения на регуляризованное (с коэффициентом регуляризации  $\beta$ ), обладающее свойствами устойчивости. В дальнейшем, на основе этого уравнения, строится расчетная разностная схема

$$q_{i+1}^0 = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^1 - T_i^0) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^0; \quad j = 0;$$

$$q_{i+1}^j = -\frac{hc\gamma}{2\tau} (T_i^{j+1} - T_i^{j-1}) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^j, \quad j = 1, \dots, M-1;$$

$$q_{i+1}^M = -\frac{hc\gamma}{\tau} (T_i^M - T_i^{M-1}) - \left( \alpha \frac{h}{\lambda^2} - 1 \right) q_i^j, \quad j = M;$$

$$T_{i+1}^j = -\frac{h}{\lambda} q_i^j - \alpha \frac{c\gamma^2 h}{\tau^2} (T_i^{j+1} - 2T_i^j + T_i^{j-1}) + T_i^j, \quad j = 1, \dots, M-1.$$



Рисунок 2 – Схема моделирования и идентификации тепловых процессов, протекающих при электроконтактном нагреве

Трудности, обусловленные соблюдением устойчивости решения, в дальнейшем потребовали корректировки алгоритма.

Эта методика прошла проверку при исследовании температуры рабочих поверхностей главных контактов контактора РПН в период их замыкания. Входными данными при исследовании служили значения температуры двух точек внутри тела контакта, полученные экспериментальным путем. Измерение и фиксация температуры в этих точках проводилась с помощью термопар по методике и на оборудовании ВИТ.

Начальное значение температуры во всех точках контакта  $T_0$  принималось равным максимальной температуре рабочей среды (для маслонаполненных аппаратов это  $90^{\circ}\text{C}$  – температура трансформаторного масла в баке). Шаг сетки по шкале времени принимался равным  $\tau = 4 \cdot 10^{-3}$  с, по пространству –  $h = 0,001$  м. Теплофизические характеристики медного контакта: удельная теплоемкость –  $c\gamma = 3,35 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ , теплопроводность –

$$l = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

Коэффициенты регуляризации подбирались в пределах  $\alpha = 10^{-9} \dots 10^{-15}$  по аналогии со значениями, применяемыми при решении подобных задач тепловой диффузии. Размерность коэффициента регуляризации при вычислении теплового потока –  $[\frac{\text{м}^5 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}]$ , при вычислении температурного поля –  $[\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}{^{\circ}\text{C}^2 \cdot \text{м}^3}]$ . Шаг по шкале температур выбирался с учетом устойчивости численного решения уравнения диффузии.

На основе полученных алгоритмов составлена программа в среде «MathCAD», с помощью которой рассчитаны значения, теплового поля РК в период замыкания. Полученная в результате имитационного эксперимента температура рабочей поверхности представлена на рис. 4.

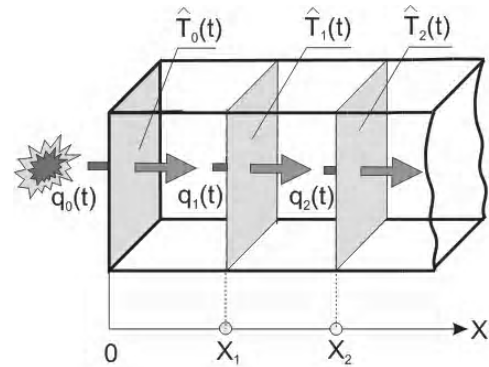


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения температуры контактной поверхности  $T_0(t)$

Анализ результатов показывает, что расчетная температура контактных поверхностей значительно превосходит значения температуры в теле контакта даже на глубине 3 мм от поверхности. Динамика роста температуры активно проявляется за период не более 3 с после замыкания.

### ВЫВОДЫ

1. Методы, применяемые для измерений температуры контактов в лабораторных условиях, недостаточно объективно оценивают тепловые процессы на поверхности разрывных контактов, поскольку не учитывают их быстротечность и локализацию.

2. Моделирование тепловых процессов при коммутации с помощью ОЗТ является перспективным методом оценки температуры контактных поверхностей. Численный эксперимент, проведенный по результатам имитирующего процесс коммутации сильноточных контактов показал, что температура контактной поверхности определяемая таким методом значительно ближе к реальным значениям.

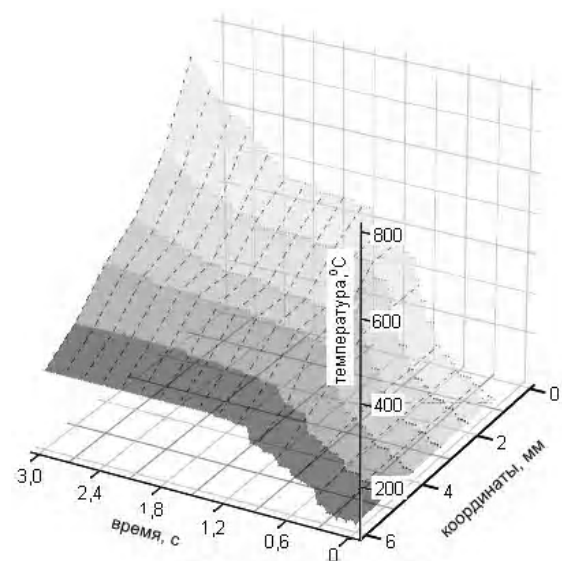


Рисунок 4 – Расчетные значения температуры контакта при электротермическом нагреве

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей от 13.06.2003г. – Режим доступа: <http://www.rza.org.ua/download/o-31.html>
2. Braunovic M. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology / M. Braunovic, N.K. Myshkin, V. V. Konchits. – New York : CRC Press, – 2007. – P. 646.
3. Electrical contacts. Principles and applications / [Slade P. G., Abbott W. H., Braunovic M. etc.] ; ed. by P. G. Slade. – New York : Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 1055.
4. Garzon R. D. High voltage breakers: design and applications / R. D. Garzon. – New York : Marcel Dekker, Inc. – 2002. – P. 456.
5. Timsit R. S. Electrical conduction through small contact spots / R.S. Timsit // Proceedings of 50<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – 2004. – Pp. 184–190.
6. Залесский А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А. М. Залесский, Г. А. Кукеков. – Л., 1967. – 378 с.
7. Александров Г. Н. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, В. Л. Иванов. – М., 1985. – 312 с.
8. Волкова О. Г. Измерение температуры поверхности разрывных контактов / О. Г. Волкова // Электрика. – Москва. – 2013. – № 4. – С. 41–43.
9. Алифанов О. М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О. М. Алифанов. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
10. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности / Мацевитый Ю. М. – К. : Наукова думка, 2002. – Т. 2 – 408 с.

Статья поступила в редакцию 27.05.2015  
После доработки 12.06.2015

Волкова О. Г.

Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

#### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ СИЛЬНОСТРУМНИХ РОЗРИВНИХ КОНТАКТІВ У ПРОЦЕСІ КОМУТАЦІЇ

*У статті розглянуто методику визначення температури поверхні сильнострумних розривних контактів, що працюють при бездуговій комутації змінного струму. Визначення температури ґрунтувалося на чисельному рішенні граничної оберненої задачі теплопровідності. Отримано розрахунки температури контактних поверхні в залежності від часу. Розрахунок виконаний за допомогою пакета прикладних програм MathCAD. Отримані значення температури за допомогою даної методики є більш точними, ніж при використанні існуючих.*

*Ключові слова:* електричний контакт, температура, задача теплопровідності, контактна поверхня, комутація.

Volkova O. G.

Ph.D., Associate Professor, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

#### METHOD FOR THE TEMPERATURE DETERMINATION OF HIGH CURRENT CONTACTS SURFACE DURING THE SWITCHING PROCESS

*The article describes the method of temperature determination of the electrical contact surface, which works without electrical arc in AC circuits. Pictures of contact surfaces damage are shown. It indicates that the temperature rises above the melting point of the contact material and there is disagreement in use of the temperature calculation methods. The temperature determination is based on the numerical solution of the boundary inverse heat conduction problem. The regularized solutions are done with the help of quasi-inversion method. The feature of the method is the temperature determination from the experimental temperature values obtained at points available for measurement. Calculation of the contact surface temperature as a function of time is obtained. The calculation is made using the program «MathCAD». The resulting temperature obtained by this method is more accurate than using previously known methods.*

**Keywords:** electrical contact, the temperature, the problem of heat conduction, the contact surface, switching.

## REFERENCES

1. Tehnicheskaja jekspluatacija jelektricheskijh stancij i setej ot 13.06.2003g., Rezhim dostupa: <http://www.rza.org.ua/download/o-31.html>
2. Braunovic M., Myshkin N. K., Konchits V. V. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology. New York, CRC Press, 2007, P. 646.
3. Electrical contacts. Principles and applications. Slade P. G., Abbott W. H., Braunovic M. etc.; ed. by P. G. Slade, New York, Marcel Dekker, Inc., 1999, P. 1055.
4. Garzon R. D. High voltage breakers: design and applications. New York, Marcel Dekker, Inc, 2002, P. 456.
5. Timsit R. S. Electrical conduction through small contact spots. Proceedings of 50<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2004, pp. 184–190.
6. Zalesskij A. M., Kukekov G. A. Teplovye raschety jelektricheskijh apparatov. Leningrad, 1967, 378 s.
7. Aleksandrov G. N., Borisov V. V., Ivanov V. L. Teorija jelektricheskijh apparatov, Moscow, 1985, 312 s.
8. Volkova O. G. Temperature Measurement of a surface interrupting contacts. Electrician, Moscow, 2013, No. 4, pp. 41–43.
9. Alifanov O. M. Identifikacija processov teploobmena letatel'nyh apparatov. Moscow, Mashinostroenie, 1979, 216 s.
10. Macevityj Ju. M. Obratnye zadachi teploprovodnosti. Kiev, Naukova dumka, 2002, T. 2, 408 s.

УДК 621.315.615:621.319.4

Малюшевська А. П.<sup>1</sup>, Дмитрішин О. Я.<sup>2</sup>, Топоров С. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна, E-mail: dphc@ijpt.com.ua

<sup>2</sup>Молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна

<sup>3</sup>Провідний інженер Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА Т-1500 В ПЛІВКОВИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

*Обрано критеріальні параметри, що дозволяють достовірно оцінювати термостабільність експлуатаційних властивостей діелектричних рідин. Проаналізовано зміну експлуатаційних властивостей трансформаторного масла Т-1500 в ході його взаємодії з пропіленою і поліетилентерефталатними плівками під впливом підвищеної температури. Виявлено вплив морфологічних особливостей поверхні поліпропіленої плівки на термостабільність плівкового просоченого діелектрика, а також низький ступінь термостимульованої взаємодії поліетилентерефталатної плівки з трансформаторним маслом Т-1500.*

**Ключові слова:** плівковий просочений діелектрик, електроізоляційні рідини, старіння діелектрика, термостабільність

### ВСТУП

У високовольтній техніці особлива увага приділяється стану внутрішньої ізоляції, яка підпадає під вплив різних факторів, що змінює, в кінцевому підсумку, її електрофізичні властивості. Внутрішня ізоляція, як правило, є комбінацією різних діелектриків (рідких і твердих, газоподібних і твердих). Неминучим для внутрішньої ізоляції електроустаткування є старіння, яке у практичному аспекті електротехніки являє собою погіршення електричних характеристик у процесі експлуатації. Розрізняють три основні форми старіння діелектриків – іонізаційну, теплову, електрохімічну. Загальновідомим є той факт, що при будь-яких формах старіння найбільш слабкою ланкою є просочуюча рідина [1].

Діелектрики, які використовуються для виготовлення внутрішньої ізоляції високовольтного устаткування, повинні мати комплекс високих електричних, теплофізичних і механічних властивостей та забезпечувати необхідний рівень електричної міцності, а також необхідні теплові й механічні характеристики ізоляційної конструкції при розмірах, яким відповідають високі техніко-економічні показники всієї установки в цілому. Тривала практика створення й експлуатації високовольтного устаткування показує, що у багатьох випадках весь комплекс вимог щонайкраще задовольняється при використанні в складі внутрішньої ізоляції комбінації з декількох матеріалів, що доповнюють один одного й виконують дещо різні функції.

Проведені в ШПТ НАН України дослідження [2] показали, що підвищення питомих енергетичних характеристик, ресурсу і частоти проходження зарядів-розрядів високовольтних імпульсних конденсаторів може бути досягнуто при застосуванні в якості робочого діелектрика секцій конденсаторів комбінованої поліпропіленово-поліетилентерефталатної плівкової ізоляції, просоченої не-

полярною рідиною з низьким тангенсом кута діелектричних втрат. Використання плівкового діелектрика дозволяє створювати конденсатори з більш високими питомими характеристиками й низькими діелектричними втратами в порівнянні з конденсаторами на основі паперово-плівкового діелектрика.

Однак, спроба дослідити процес старіння поліпропіленово-поліетилентерефталатної діелектричної системи, що просочена неполярною органічною рідиною (трансформаторним маслом марки Т-1500 ГОСТ 982-80), в цілому, без розділення компонентів системи, дозволило одержати тільки вельми суперечливі дані в частині зміння електрофізичних характеристик секцій із вказаною діелектричною системою. У той же час дослідження проб трансформаторного масла з макетів конденсаторів з такими секціями, що пройшли ресурсні випробування, показало значне збільшення тангенса кута діелектричних втрат у порівнянні з початковим станом. Таким чином, стає очевидною необхідність вивчення особливостей процесів, що розвиваються саме в сучасних просочуючих рідинах для конденсаторів.

Метою цих досліджень є вивчення термостабільності експлуатаційних властивостей трансформаторного масла Т-1500, що використовується в поліпропіленово-поліетилентерефталатних діелектричних системах високовольтних імпульсних конденсаторів. При цьому необхідно брати до уваги, що за умов відсутності початкових часткових розрядів основною причиною зниження працездатності просоченої плівкової ізоляції є процеси, які пов'язані з термоокисною деструкцією самої рідини й термостимульованою взаємодією компонентів діелектричної композиції. При вивченні факторів, що впливають на працездатність рідких електроізоляційних компонентів діелектричної системи високовольтних імпульсних конденсаторів із просоченням неполярними рідина-

ми під впливом підвищеної температури, доцільно приділити увагу саме тепловому впливу, а в якості критеріальних вибирати параметри, найбільш чутливі до розвитку руйнуючих термостимульованих процесів.

Конденсаторні просочуючі рідини є надзвичайно важливим і у той же час досить проблемним компонентом діелектричної системи. До них пред'являються досить жорсткі вимоги, такі як: високі питомий об'ємний опір і діелектрична проникність; малий тангенс кута діелектричних втрат; мала в'язкість у робочому діапазоні температур; висока стабільність електричних характеристик; стійкість до впливу електричних і теплових полів конденсатора; хімічна стійкість; сумісність із компонентами діелектричної системи й конструктивних матеріалів; мала випаровуваність; висока температура кипіння; нетоксичність; негорючість; екологічність [1].

**Методика досліджень.** Велику кількість досліджень присвячено вивченню властивостей низки нафтових масел і, зокрема, трансформаторного масла через широке його застосування в електротехнічних пристроях (трансформаторах, конденсаторах, кабелях, високовольтних вводах, вимикачах тощо). Відомо, що нафтові масла взагалі і трансформаторні зокрема являють собою складну суміш вуглеводнів парафінового, нафтового, ароматичного ряду з невеликою (до 1%) домішкою інших компонентів, що містять атоми сірки, кисню, азоту. Ароматичні вуглеводні є необхідною складовою частиною нафтових електроізоляційних масел.

Кількісний і структурний склад багато в чому визначає фізико-хімічні та електричні характеристики масел. Для трансформаторного масла марки Т-1500, яке досить часто використовується в ШПТ НАН України для просочення високовольтних імпульсних конденсаторів, характерне наступне співвідношення числа вуглецевих атомів в ароматичній, нафтовій і парафіновій структурах: відповідно 12,5; 39,8; 47,7%, розраховуючи на 100 вуглецевих атомів.

Негативним наслідком взаємодії компонентів просоченого полімерного плівкового діелектрика є зростання діелектричних втрат провідності просочуючої рідини за рахунок десорбції із плівки (разом із аморфною складовою полімеру) іонів (Al, Cu, Fe, Cl, Cr), іоногенних домішок, технологічних забруднень і продуктів старіння полімеру [3, 4]. Поява продуктів розкладання самої рідини й руйнування плівки незмінно буде впливати на експлуатаційні властивості рідини, зокрема електрофізичні. Тому необхідно контролювати такі характеристики електроізоляційних рідин, як тангенс кута діелектричних втрат, діелектрична проникність, питомий об'ємний електричний опір, короточасна електрична міцність.

При дослідженні впливу полімерної плівки на діелектричні втрати просочуючої рідини – трансформаторного масла марки Т-1500 дотримувались наступного співвідношення компонентів: 15 мас. частин рідини на 1 мас. частину полімерної плівки. Використовувалися двостороннє шорстка поліпропіленова плівка TERVAKOSKI

FILM марки RER товщиною 10 мкм, гладка поліпропіленова плівка ТУ 619-057-65-87 товщиною 10 мкм і гладка поліетилентерефталатна плівка ПЭТ-КЭ ГОСТ 24234-80 товщиною 15 мкм. Зразки плівок являли собою стрічки шириною 80 мм і довжиною, що відповідає вищенаведеному масовому співвідношенню рідина – плівка. Зразки плівок попередньо висушувалися при температурі 80°C протягом двох годин і поміщалися у скляні ємності. Потім плівки заливалися попередньо відфільтрованим, висушеним і дегазованим трансформаторним маслом марки Т-1500, після чого ємності встановлювалися в термостат. Крім того, температурному впливу піддавалися зразки трансформаторного масла без полімерної плівки. Температура старіння зразків рідини (з плівками й без них) витримувалась постійною – 100°C. Загальний час старіння модельних зразків становив 300 год, кожні 50 год проводилися виміри тангенса кута діелектричних втрат, діелектричної проникності, питомого об'ємного електричного опору. Температура, при якій здійснювали виміри електрофізичних характеристик, була постійною – 100°C (за винятком вимірювань короточасної електричної міцності, для якого була обрана температура вимірювань 18–20°C).

Для кількісної оцінки ступеня впливу полімеру на діелектричні втрати трансформаторного масла використовувався коефіцієнт дестабілізації ( $D$ ) [5]. Для зразків рідини, зістареної без плівки, цей коефіцієнт представляє собою відношення тангенса кута діелектричних втрат рідкого діелектрика після його термостаріння до  $\text{tg}\delta$  похідної рідини, тобто коефіцієнт  $D$  в даному випадку ілюструє вплив термоокисної деструкції рідини на діелектричні втрати. Для решти зразків коефіцієнт дестабілізації є відношенням тангенса кута діелектричних втрат рідини, зістареної в контакт з полімерними плівками, до  $\text{tg}\delta$  рідини після її термостаріння в ідентичних умовах без плівки, тобто він ілюструє ступінь впливу термоокисної деструкції та взаємодії рідини з полімером на її діелектричні властивості.

Для діагностики стану електроізоляційних просочуючих рідин, крім традиційних методів виміру їх електрофізичних властивостей все частіше використовують методи, що базуються на вивченні оптичних властивостей рідких середовищ [6, 7]. Є доцільним використання методу оцінки термостабільності плівкового просоченого діелектрика, заснованого на аналізі кінетики оптичних властивостей просочуючого складу при термостарінні в контакт з полімерною плівкою. За додатковий критеріальний параметр, що відображає оптичні властивості просочуючої рідини, було обрано відносну характеристику, а саме – коефіцієнт відносного світлопропускання, що ілюструє зміну стану рідкого середовища з появою в ній дрібнодисперсних часток (макромолекул і фрагментів полімеру). Величина відносного світлопропускання досліджуваних рідких діелектриків визначалася за допомогою колориметра фотоелектричного концентраційного КФК-2. Суть виміру полягає в порівнянні світлопропус-

кання еталонної (вихідної) проби рідини й досліджуваного зразка, попередньо підданого зовнішньому впливу. Вимірювання відносного світлопропускання трансформаторного масла Т-1500 проводилось також кожні 50 год протягом 300 годин термостаріння модельних зразків. Попередньо експериментально було встановлено температуру вимірювання, яка виключала утворення супернатанта, та довжину хвилі випромінювання, чутливу до появи розчиненого полімеру в трансформаторному маслі Т-1500.

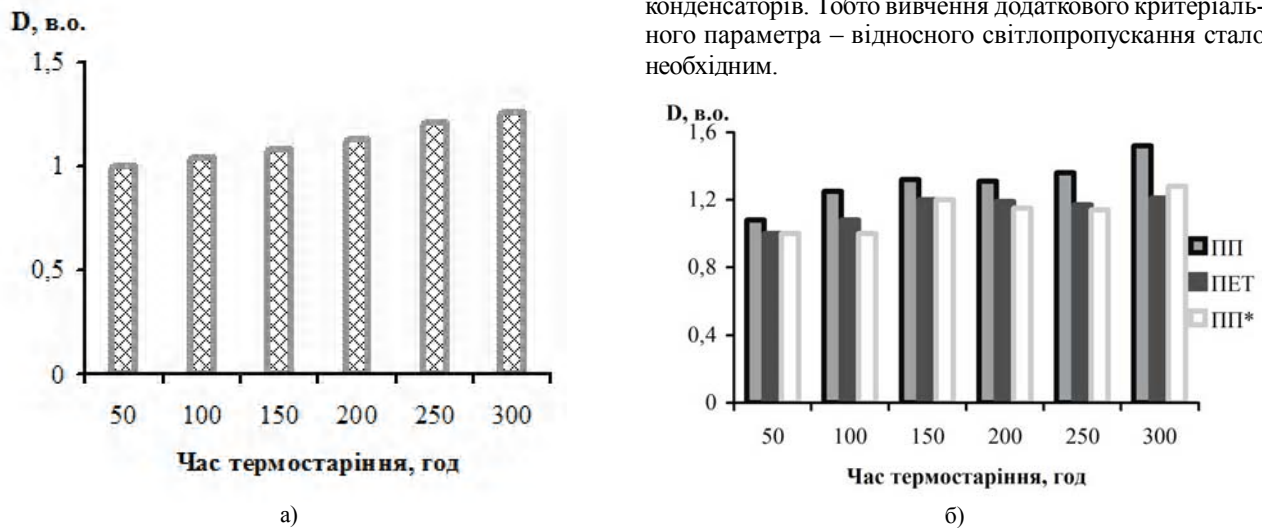
**Результати і обговорення.** Термостаріння протягом 300 год не виявило помітного впливу на діелектричну проникність і питомий об'ємний електричний опір трансформаторного масла –  $\epsilon_{\text{сп}} = 2,22 \pm 0,05$ ,  $\rho_{\text{всп}} = (1,19 \pm 0,02) \cdot 10^{10}$  Ом·м, причому не було виявлено чітких закономірностей змін цих параметрів. Такі коливання електрофізичних характеристик не можуть бути прийняті за критеріальні для оцінювання ступеня взаємодії рідкого й твердого діелектриків та рівня термостабільності електроізоляційної рідини.

Експериментальні дані, які отримано при термостарінні трансформаторного масла Т-1500 у складі модельних зразків плівкових просочених діелектричних систем, наведено на рис. 1, де прийнято такі умовні позначення: модельний зразок твердої ізоляції, що складається із шорсткої поліпропіленової плівки – ПП, з поліетилентерефталатної – ПЕТ, модельний зразок, що складається з гладкої поліпропіленової плівки – ПП\*. Видно (рис. 1, а), що якщо для рідини без плівок вплив термоокисної деструкції на діелектричні властивості є монотонно зростаючим, то для зразків рідини, що зазнали старіння в контакт з полімерними плівками, зміна коефіцієнта дестабілізації носить більш складний характер (рис. 1, б). В той час, як взаємодія із гладкою поліпропіленовою плівкою помітно позначається на стабільності рідини тільки після 100 год нагріву, речовини, що переходять у рідину з поверхні та із об'єму шорсткої поліпропіленової плівки, починають суттєво впливати на її термостабільність відразу після початку нагрівання. Наявність поліетилентерефталатної плівки в рідині починає помітно позначатися після 150 год нагріву.

Зростання коефіцієнта дестабілізації в процесі термостаріння модельних зразків системи рідина – полімерна плівка свідчить про десорбцію з полімерного матеріалу іонів металів та іоногенних домішок, що має місце при розчиненні аморфних мікрооб'ємів полімеру. Процес тим інтенсивніше ( $D$  тим більше), чим вище вміст аморфної складової й нижче ступінь чистоти плівки. Задовільна термостабільність по параметру  $D$  зазначається для модельних зразків на основі гладкої поліпропіленової плівки у порівнянні із шорсткою. У випадку використання гладкої плівки  $D$  дорівнює 1 аж до 100 год термостаріння в середовищі трансформаторного масла, тобто за даним параметром взаємодія плівки й рідини не фіксується. Зазначений факт може трактуватися неоднозначно, оскільки  $D$  не змінюється й у випадку взаємодії з плівками підвищеної чистоти. Однак, після 100 год нагріву  $D$  для такої плівки різко зростає, в той час як для шорсткої поліпропіленової й поліетилентерефталатної плівок зростання коефіцієнта дестабілізації носить більш монотонний характер, причому впродовж 150–250 год нагріву для цих плівок відзначалася стабілізація коефіцієнта  $D$  на рівні 1,3 і 1,2 відповідно. Після 250 год термостимульованої взаємодії трансформаторного масла й плівок коефіцієнт дестабілізації для всіх зразків, що містять поліпропілен, знову різко зростає. Можливо, на цьому етапі починається процес переходу макромолекул поліпропілену в рідину.

З метою вивчення впливу термодії на експлуатаційні властивості рідкого діелектрика й стабільність його електрофізичних характеристик проводилося визначення короткочасної електричної міцності трансформаторного масла Т-1500 в ході його термостаріння (без полімерних плівок). Зниження короткочасної електричної міцності ( $E_{\text{пр}}$ ) трансформаторного масла може бути пояснено появою в ньому продуктів термоокисної деструкції, але підтвердження цієї гіпотези є науковим завданням для подальших досліджень.

Таким чином, дослідження тільки кінетики електрофізичних характеристик трансформаторного масла не дало достатньо достовірної інформації про його термостабільність і ступінь взаємодії з полімерними матеріалами діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів. Тобто вивчення додаткового критеріального параметра – відносного світлопропускання стало необхідним.



**Рисунок 1** – Залежність коефіцієнта дестабілізації трансформаторного масла Т-1500 від часу старіння: а – без плівок; б – старіння в контакт з полімерними плівками.



Кінетика процесу розчинення полімерних плівок в трансформаторному маслі Т-1500 може бути описана залежністю  $K_{ec}$  трансформаторного масла Т-1500, що контактує з елементами плівкової твердої ізоляції, від часу дії підвищеної температури (рис. 2). На рис.2 прийнято наступні умовні позначення – модельні зразки твердої ізоляції, що склалися тільки з шорсткої поліпропіленової плівки – ПП; тільки з поліетилентерефталатної – ПЕТ; такі, що містили 43 мас. % поліетилентерефталатної та 57 мас. % поліпропіленової плівки – ПП+ПЕТ; тільки з гладкої поліпропіленової плівки – ПП\*. Діаграма зміни  $K_{ec}$  трансформаторного масла Т-1500 наочно ілюструє поступове зниження світлопропускання рідини в порівнянні з трансформаторним маслом в початковому стані ( $K_{ec}=100\%$ ).

Наведені дані свідчать про розчинення аморфної фази полімерів у рідкому діелектрику, тобто про перехід обмеженого набухання полімерної плівки в необмежену стадію і появу в електроізоляційній рідині макромолекул полімеру. Причому простежується тенденція до значно більш інтенсивної взаємодії компонентів просоченої ізоляції у разі використання поліпропіленової плівки в порівнянні з поліетилентерефталатною. Очевидно, що  $K_{ec}$  трансформаторного масла при термостарінні в контакт з обома плівками (поліетилентерефталатною й поліпропіленовою) знижується більш плавно, ніж у випадку використання тільки поліпропіленового компонента просоченої ізоляції. Інтерес викликають дані щодо зміни  $K_{ec}$  трансформаторного масла Т-1500, що зазнало термоста-

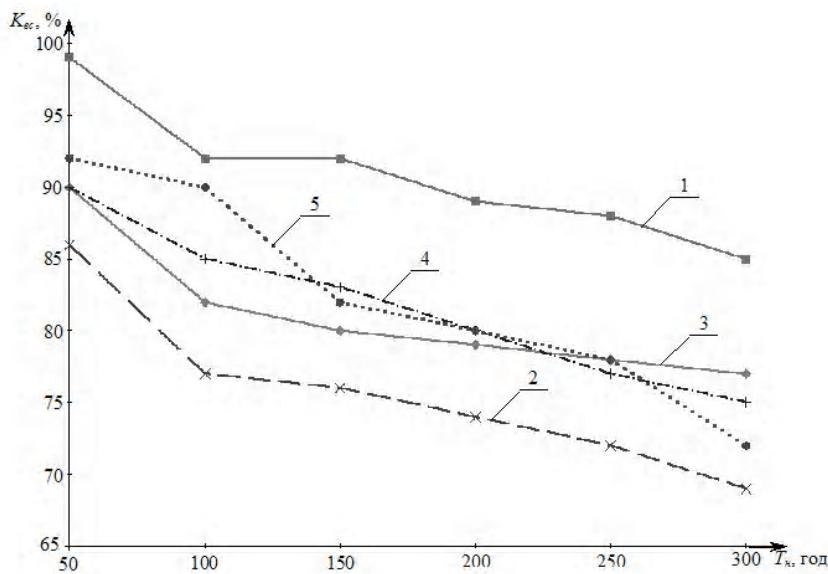
ріння в присутності гладкої поліпропіленової плівки в порівнянні з аналогічною шорсткою. Як показано на діаграмі, зниження коефіцієнта світлопропускання рідини, що контактує з гладкою плівкою, аж до 100 год термостаріння дуже незначне, його можна порівняти із зміною  $K_{ec}$  рідини, що зазнала термостаріння без плівок. Згодом (аж до 300 год термостаріння)  $K_{ec}$  для модельних зразків з гладкою поліпропіленовою плівкою зберігається стабільно вищим, ніж  $K_{ec}$  трансформаторного масла Т-1500, що зазнало впливу високої температури у присутності шорсткої поліпропіленової плівки. Отже, морфологія поверхні поліпропіленової плівки дуже впливає на процес розчинення плівки в електроізоляційній рідині. Наявність на поверхні мікрокапілярної системи (шорстка плівка) робить цей процес більш яскраво вираженим.

### ВИСНОВКИ

Таким чином, обраний комплекс критеріальних параметрів – тангенса кута діелектричних втрат (коефіцієнта дестабілізації) та коефіцієнта відносного світлопропускання, дозволив достовірно оцінювати ступінь термостабільності трансформаторного масла Т-1500 як рідкого компонента поліпропіленово-поліетилентерефталатної просоченої діелектричної системи. Виявлено перевагу (за термостабільністю властивостей діелектрика «поліпропіленова плівка – трансформаторне масло марки Т-1500») гладкої плівки перед шорсткою та висока термостабільність діелектрика «поліетилентерефталатна плівка – трансформаторне масло Т-1500».

Таблиця 1 – Середні значення короткочасної електричної міцності трансформаторного масла Т-1500 в процесі термостаріння

Рідина	Вихідний стан		Після 150 год нагрівання		Після 300 год нагрівання	
	$E_{np\ cp} \pm \Delta E$ , кВ/мм	$K_{вар}$ %	$E_{np\ cp} \pm \Delta E$ , кВ/мм	$K_{вар}$ %	$E_{np\ cp} \pm \Delta E$ , кВ/мм	$K_{вар}$ %
Трансформаторне масло Т-1500	29,9±4,2	13	19,5±1,2	5	15,4±2,8	18



1 – без плівок; 2 – ПП; 3 – ПЕТ; 4 – ПЕТ+ПП; 5 – ПП\*

Рисунок 2 – Залежність  $K_{ec}$  трансформаторного масла Т-1500, що контактує з елементами плівкової твердої ізоляції, від часу дії підвищеної температури



Зниження коефіцієнта відносного світлопропускання ілюструє термостимульоване взаємне розчинення полімеру в рідині, наслідком якого і є погіршення електрофізичних характеристик компонентів просоченого плівкового діелектрика. Аналіз кінетики відносного світлопропускання просочуючих рідких середовищ може бути інформативним і практично корисним при порівняльних дослідженнях різних плівкових просочених діелектриків, а також для проведення експрес-діагностики стану плівкової просоченої ізоляції в ході ресурсних випробувань високовольтних імпульсних конденсаторів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучинский Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
2. Гребенников И. Ю. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком от режимов эксплуатации / И. Ю. Гребенников, В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, И. Г. Михайлов, Л. И. Онищенко, Т. А. Фещук // Электротехника. – 2006. – №6. – С. 36–41.
3. Кучинский Г. С. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными жидкостями [Текст] / Г. С. Кучинский, Л. Н. Галахова // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 33–39.
4. Zhuravleva N. M. Effect of modified surface structure of impregnated polypropylene film on capacitor properties during thermal ageing / N. M. Zhuravleva, A. M. Andreev, M. Evtic // Electrical Engineering. – 1998. – Vol. 81, № 4. – P. 271–274.
5. Журавлева Н. М. Стабилизация диэлектрических потерь конденсаторных пропитывающих синтетических жидкостей в процессе термостарения [Текст] / Н. М. Журавлева, А. М. Андреев, Л. Н. Галахова // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1991. – № 5. – С. 64–67.
6. Высокогорец С. П. Метод оценки эффективности восстановления ресурса трансформаторных масел в процессе работы силовых трансформаторов [Текст] / С. П. Высокогорец, А. П. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 59–65.
7. Львов М. Ю. Применение оптической мутности масла для оценки состояния высоковольтных герметичных вводов трансформаторов / М. Ю. Львов // Электрические станции. – 1999. – № 6. – С. 60–63.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2015  
Після доробки 22.04.2015

Малюшевская А. П.<sup>1</sup>, Дмитришин А. Я.<sup>2</sup>, Топоров С. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующей отделом ИИПТ НАН Украины, E-mail: dphc@iippt.com.ua

<sup>2</sup>Младший научный сотрудник ИИПТ НАН Украины

<sup>3</sup>Ведущий инженер ИИПТ НАН Украины

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА T-1500 В ПЛЕНОЧНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*Выбраны критериальные параметры, позволяющие достоверно оценивать термостабильность эксплуатационных свойств диэлектрических жидкостей. Проанализировано изменение эксплуатационных свойств трансформаторного масла T-1500 в ходе его взаимодействия с полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленками под влиянием повышенной температуры. Выявлено влияние морфологических особенностей поверхности полипропиленовой пленки на термостабильность пленочного пропитанного диэлектрика, а также низкую степень взаимодействия полиэтилентерефталатной пленки с трансформаторным маслом T-1500.*

**Ключевые слова:** пленочный пропитанный диэлектрик, электроизоляционная жидкость, старение диэлектрика, термостабильность.

Malyushevskaya A. P.<sup>1</sup>, Dmitrishin A. Ya.<sup>2</sup>, Toporov S. O.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., associate professor, senior staff scientist of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

<sup>2</sup>Research assistant of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

<sup>3</sup>Senior engineer of Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine

### RESEARCH OF INFLUENCE OF HEIGHTENED TEMPERATURES ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL T-1500 IN FILM INSULATION SYSTEMS

*The criteria parameters allowing to estimate authentically the thermostability of dielectric liquids' operational properties are chosen. Change of transformer oil's operational properties during its interaction with polypropylene and polyethylenetereftalate films under the influence of the heightened temperature is analysed. The influence of morphological features of polypropylene film's surface on the thermostability of the impregnated dielectric film is revealed. Low degree of the interaction between the polyethylenetereftalate film and transformer oil T-1500 is defined.*

*The reduction of the comparative light transmission coefficient illustrates the thermostimulated mutual dissolution in the system «polymer in the liquid». The consequent of this process is the degradation of the impregnated dielectric film components' electrical characteristics. Analysis of kinetics of impregnating liquid's light transmission can be informative and useful in comparative studies of various impregnated dielectric films, as well as for express diagnostics of impregnated film insulation during high-voltage pulse capacitors life tests.*

**Keywords:** film impregnated dielectric, insulating liquid, dielectric aging, thermostability.

## КОМПЕНСАЦІЯ ВПЛИВУ НЕСИМЕТРІЇ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

*Представлено методи компенсації впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна на характеристики систем електропривода з векторним керуванням. Показано, що застосування запропонованих систем керування, за рахунок внесення додаткових сигналів компенсації в замкнені контури регулювання струму статора двигуна, дозволяють компенсувати змінну складову електромагнітного моменту, чи змінну складову споживаної потужності. При цьому застосування системи компенсації змінної складової електромагнітного моменту двигуна дозволяє зменшити вібрації двигуна, а застосування системи компенсації змінної складової споживаної активної потужності дозволяє зменшити теплове перевантаження окремих фаз, що збільшує термін експлуатації ізоляції обмоток статора асинхронного двигуна.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, векторне керування, несиметрія статора, компенсація.

### ВСТУП

Підвищені вимоги до статичних, динамічних та енергетичних показників якості керування електроприводами (ЕП) змінного струму призвели до того, що на сьогоднішній день широкого застосування набули системи векторного керування асинхронними двигунами (АД). Можливість керування перехідними процесами, забезпечення високої швидкодії і енергоефективності системи електропривода надає перевагу даному методу в порівнянні з іншими. Вирішальним фактором, що впливає на якість регулювання є наявність точної інформації про поточні значення електромагнітних параметрів АД. Неточність визначення цих параметрів, призводить до зниження якості регулювання вихідних координат ЕП [1].

Відомо, що під час роботи АД його параметри можуть відхилятися від паспортних внаслідок різноманітних пошкоджень [2]. Основними причинами виникнення таких несправностей є вібрації двигуна, його перегрів та механічні впливи [3]. Зазначені чинники призводять до появи електричної та магнітної несиметрії двигуна. Порушення симетрії АД може бути викликано різноманітними пошкодженнями обмоток і осердя статора та ротора, виникнення ексцентриситету ротора. Несиметрія обмоток статора може з'являтися в результаті таких пошкоджень як обриви в паралельних гілках та елементарних провідниках фазних обмоток. Найчастіше такі пошкодження є наслідком пробіїв ізоляції та виникнення виткових замикань. Ці замикання викликають локальний перегрів, що в результаті може призвести до обриву фази, паралельної секції або до фазного чи міжфазного короткого замикання. Ступінь несиметрії, спричиненої такими пошкодженнями, залежить від кількості паралельних гілок у фазі та елементарних провідників в пазу. Аналіз схем конструктивної реалізації обмоток АД показав, що АД невеликої потужності ( $\leq 15\text{--}20\text{кВт}$ ) зазвичай мають

невелику кількість паралельних гілок (2, 3), і обрив однієї з них призведе до суттєвої несиметрії, яка може бути швидко діагностована. У потужних ( $\geq 100\text{ кВт}$ ) багатополосних ( $2p \geq 4$ ) АД обмотки зазвичай виконуються із значною кількістю паралельних гілок та додатковим розподілом ефективного провідника на декілька елементарних, з'єднаних паралельно. У АД великої потужності обмотки найчастіше виконуються із прямокутного проводу із можливою кількістю елементарних провідників в ефективному провідникові, рівної двом, чотирьом або шести. Через це, при пошкодженні одного провідника або паралельної гілки такі двигуни можуть працювати в несиметричному режимі досить довго без спрацьовування систем струмового захисту. Але це призводить до несиметрії струмового завантаження фаз статора та суттєвого підвищення гріючих втрат в окремих фазах АД при невеликій зміні в значенні сумарних втрат.

Таким чином, унаслідок роботи систем ЕП з пошкодженими АД, спостерігаються значна втрата якості керування, знижуються показники енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії, суттєво збільшуються втрати та з'являються змінні складові електромагнітного моменту та споживаної активної потужності.

На даний час відомі методи, які в тій чи іншій мірі дозволяють вирішити питання зменшення впливу зміни параметрів АД на якість керування систем ЕП в робочому режимі [4]. Однак у більшості з розроблених підходів не враховується зміна параметрів АД за фазами. Тобто такі методи не дозволяють в повній мірі використовувати переваги систем векторного керування двигунами з несиметричними обмотками статора. Для можливості керування пошкодженими АД, можуть бути використані методи запропоновані в роботах [5–6]. Однак останні забезпечують лише безаварійну зупинку АД при обриві однієї з фаз статора, при цьому питання роботи системи

ЕП з АД, що має несиметрію обмоток взагалі не розглядається.

Задача керування АД з пошкодженнями обмоток статора може бути вирішена при використанні запропонованої в роботі [7] системи роздільного векторного керування. Принципова можливість корекції енергетичних показників асинхронних двигунів з пошкодженнями статора, показана в аналітичному вигляді на основі алгоритму дискретної згортки двох рядів [8] шляхом зміни вхідних векторів ортогональних складових струмів і потокозчеплень двигуна. При цьому корекція режимів роботи досягається шляхом зменшення потокозчеплення несиметричної фази АД. Представлена система керування дозволяє ефективно компенсувати вплив несиметрії обмоток статора на характеристики системи ЕП [9]. Однак вона відрізняється складністю своєї технічної реалізації за рахунок формування сигналів керування за кожною фазою двигуна.

При вирішенні задач компенсації нелінійності та несиметрії навантаження в електричних мережах застосовуються напівпровідникові силові активні фільтри (САФ). Алгоритми роботи САФ базуються на використанні різноманітних теорій потужностей [10], що дозволяють вирішити наступні задачі: усунення вищих гармонік струму, компенсація реактивної складової основної гармоніки струму мережі живлення, симетрування струмів в фазах трифазного навантаження, придушення струмів нульової послідовності, компенсація змінних складових активної та реактивної потужності. Однак такі системи та методи не розглядають можливість керування АД з несиметрією та пошкодженими обмотками статора.

Можливість застосування в якості компенсатора безпосередньо перетворювача частоти в системі частотно-керованого електропривода зі скалярним керуванням показано в роботі [11]. У запропонованій системі окрім основних сигналів керування перетворювачем вводяться додаткові компенсуючі сигнали, розраховані на основі миттєвих значень струму та напруги. Виявляючи змінні складові потужності та електромагнітного моменту, які необхідно усунути, компенсатор формує відповідні сигнали керування автономним інвертором напруги. Однак запропонований метод не було розвинуто для застосування у системах ЕП з векторним керуванням.

## МЕТА

Розробка методів компенсації впливу несиметрії обмоток статора АД на динамічні та енергетичні характеристики систем ЕП з векторним керуванням, які б відрізнялися ефективністю та простотою реалізації.

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження динамічних та енергетичних режимів роботи АД з несиметричними обмотками статора у складі системи ЕП з векторним керуванням проводилися із використанням математичних моделей АД у трифазній системі координат. Зміна електромагнітних пара-

метрів двигуна за наявності несиметрії обмоток фаз статора, враховується за допомогою коефіцієнта несиметрії  $\varepsilon_w$ , що визначається наступним чином:

$$\varepsilon_w = w_d / w_h, \quad (1)$$

де  $w_d$  – число витків в пошкодженій фазі;  $w_h$  – число витків в непошкодженій фазі.

Відповідно електромагнітні параметри несиметричної фази статора двигуна будуть визначатися наступним чином:

$$r_s = \varepsilon_w R_s; \quad l_{s\sigma} = \varepsilon_w^2 L_{s\sigma}; \quad l_\mu = \varepsilon_w L_\mu, \quad (2)$$

де  $R_s$ ,  $L_{s\sigma}$ ,  $L_\mu$  – активний опір, індуктивність розсіювання та індуктивність контуру намагнічування непошкодженої фази статора;  $r_s$ ,  $l_{s\sigma}$ ,  $l_\mu$  – активний опір, індуктивність розсіювання та індуктивність контуру намагнічування несиметричної фази статора.

Система векторного керування побудована в ортогональній системі координат при орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. Вимірювання потокозчеплення визначається непрямим методом, а вимірювання швидкості забезпечується встановленим на вал двигуна датчиком швидкості.

Математичне моделювання систем електропривода було проведено для АД серії 4A112M4Y3:  $P_n = 5,5$  кВт;  $n_n = 1445$  об/хв;  $\cos\varphi = 0,85$ ;  $h = 85,5\%$ ;  $R_s = 1,036$  Ом;  $R_r = 0,787$  Ом;  $L_{ss} = 4,75 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $L_{rs} = 7,94 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $L_m = 0,171$  Гн. Аналіз якості керування проводився на основі наступних параметрів: втрати в міді статора двигуна ( $\Delta P_{Cu1}$ ) в кожній фазі окремо та відносні значення змінних складових електромагнітного моменту ( $\tilde{M} / M_n$ ) та споживаної активної потужності ( $\tilde{P} / P_n$ ).

Дослідження режимів роботи системи електропривода з векторним керуванням було проведено для наступних випадків: несиметрія в фазі А складає 5 % ( $\varepsilon_{wd} = 0,95$ ) (режим № 1); несиметрія в фазі А складає 10 % ( $\varepsilon_{wd} = 0,9$ ) (режим № 2); несиметрія в фазі А складає 5 %, в фазі С – 3 % ( $\varepsilon_{wd} = 0,95$ ,  $\varepsilon_{wc} = 0,97$ ) (режим № 2); несиметрія в фазі А складає 10 %, в фазі С – 7 % ( $\varepsilon_{wd} = 0,9$ ,  $\varepsilon_{wc} = 0,93$ ) (режим № 4).

## КОМПЕНСАЦІЯ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ АД

При роботі АД з несиметричними обмотками статора електромагнітний момент двигуна може бути представлений сумою постійної та змінної складових:

$M = M_0 + \tilde{M}$ . Відповідно до чого, для зменшення впливу несиметрії обмоток статора АД на характеристики системи ЕП, запропоновано метод, що дозволяє проводити компенсацію змінну складової електромагнітного моменту.

Згідно із запропонованим методом, в системі керування виділяється значення змінної складової електромагнітного моменту АД на основі виразу:

$$\tilde{M} = M - \frac{1}{T} \int_0^T M dt, \quad (3)$$

де  $M$  – електромагнітний момент двигуна;  $T$  – період сигналу змінної складової електромагнітного моменту, який визначається при частоті мережі живлення ( $T=1/f$ ).

Отриманий сигнал змінної складової електромагнітного моменту  $\tilde{M}$  заводить на вхід регулятора моментотворюючої складової струму статора  $I_{sq}$  в каналі регулювання швидкості. Відповідно сигнал задання струму статора АД за віссю  $q$  буде визначатися як:

$$I'_{sq(ref)} = I_{sq(ref)} - k_i \tilde{M}, \quad (4)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт приведення ( $k_i = I_n / M_n$ )

Враховуючи, що електромагнітний момент АД важко піддається безпосередньому вимірюванню, його визначення може бути забезпечено непрямым методом на основі відомих значень моментотворюючої складової вектора струму статора та модуля потокозчеплення ротора відповідно до виразу [12]:

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_\mu}{L_{r\sigma} + L_\mu} |\Psi_r| I_{sq}, \quad (5)$$

де  $p_n$  – кількість пар полюсів асинхронного двигуна;  $|\Psi_r|$  – модуль потокозчеплення ротора двигуна;  $I_{sq}$  – проекція вектора струму статора на вісь  $q$  нерухомої системи координат.

В свою чергу, потокозчеплення ротора може бути розраховано на основі виразу:

$$\Psi_r = \frac{L_\mu}{T_r p + 1} I_{sd}, \quad (6)$$

де  $I_{sd}$  – проекція вектора струму статора на вісь  $d$  нерухомої системи координат;  $T_r$  – постійна часу роторного кола ( $T_r = L_r / R_r$ ).

Функціональна система запропонованої системи векторного керування з функцією компенсації змінної складової електромагнітного моменту АД зображена на рис. 1.

На основі розробленої системи векторного керування були проведені дослідження режимів роботи АД для зазначених випадків несиметрії обмоток статора. Так графіки перехідних процесів за швидкістю, моментом та споживаною активною потужністю АД наведено на рис. 2. Пуск АД здійснюється при симетричному статорі, в момент часу  $t_1$  до валу двигуна прикладається номінальне навантаження. В момент часу  $t_2$  моделюється пошкодження фази А, що викликає її несиметрію на 10% відносно інших (режим № 2). В момент часу  $t_3$  вмикається система компенсації змінної складової електромагнітного моменту двигуна. На рис. 2 момент АД представлено в масштабі 2:1, а споживана активна потужність – 1:50.

Порівняння середньоквадратичних значень змінних складових електромагнітного моменту та споживаної активної потужності, для зазначених випадків несиметрії обмоток статора наведено на рис. 3.

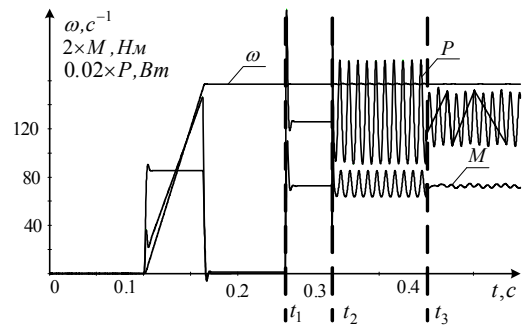


Рисунок 2 – Динамічні характеристики ЕП з ситемою векторного керування з функцією компенсації змінної складової електромагнітного моменту АД

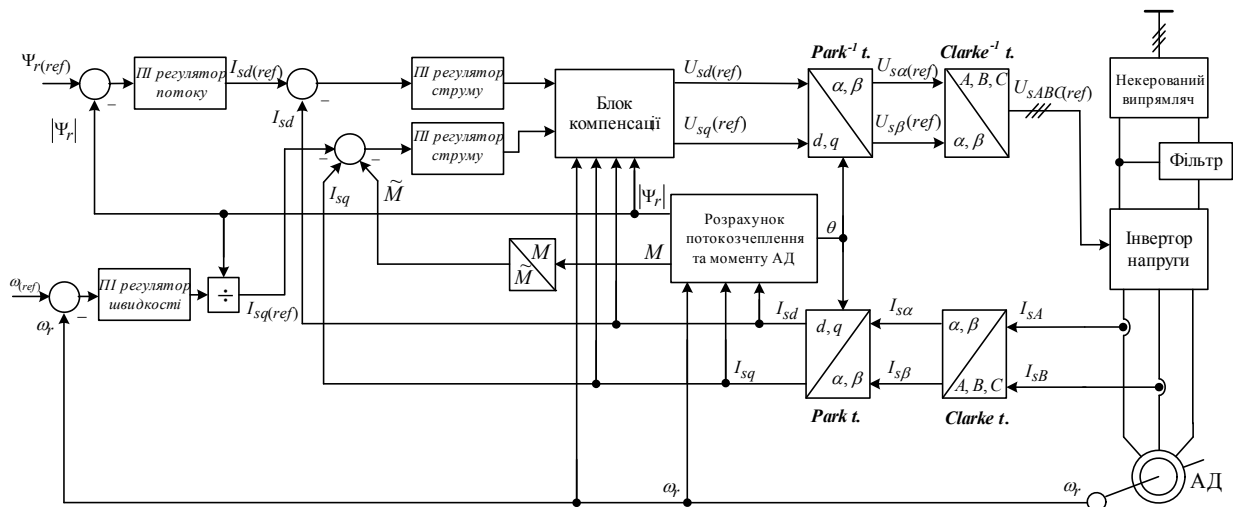


Рисунок 1 – Функціональна схема системи векторного керування асинхронним двигуном з функцією компенсації змінної складової електромагнітного моменту

На рисунках 3, 4, 7 та 8 прийнято наступні позначення досліджуваних параметрів: ■ – до компенсації; ■ – після компенсації.

Проведені дослідження показали, що використання запропонованого методу компенсації впливу несиметрії обмоток АД на характеристики системи ЕП з векторним керуванням дозволяє зменшити змінну складову електромагнітного моменту на 87 %, а змінну складову споживаної потужності на 41 %.

Як показують дослідження [13], несиметрія обмоток статора АД може призвести до суттєвого перегріву окремої обмотки навіть за умови незначного збільшення сумарних втрат. Тому, при дослідженні режимів роботи ситеми компенсації, необхідно контролювати не тільки змінні складові електромагнітного моменту, чи споживаної потужності, але і грюючі втрати в фазах. Відповідно до чого, перерозподіл втрат в міді статора за фазами АД з зазначеними випадками несиметрії обмоток до і після компенсації наведено на рис. 4.

Проведений аналіз втрат в міді статора за фазами АД показав, що при використанні запропонованого методу компенсації, величину відхилення втрат в міді статора у найбільш навантаженої фазі можливо зменшити всередньому на 30% при несиметрії в одній фазі, та на 25% при несиметрії в двох фазах.

Таким чином запропонований метод компенсації впливу несиметрії обмоток АД дозволяє зменшити змінну складову електромагнітного моменту до допустимого рівня, однак змінна складова споживаної потужності та втрати в міді статора двигуна залишаються майже не змінними.

### КОМПЕНСАЦІЯ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ АД

Оскільки система векторного керування передбачає зворотній зв'язок за проекціями струму статора на осі

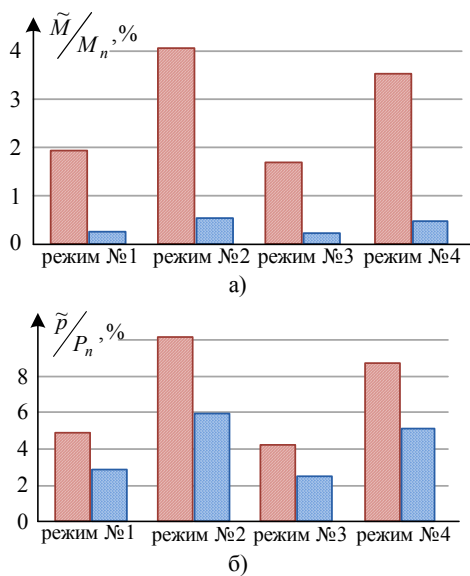


Рисунок 3 – Змінні складові електромагнітного моменту (а) та споживаної потужності (б) АД

обертової системи координат  $d-q$ , тому для задачі компенсації впливу несиметрії обмоток двигуна на енергетичні показники системи електропривода може бути використана одна з відомих теорій потужностей. Так в роботі [14] запропоновано модифікований метод  $p-q$  теорії потужності, який ґрунтується на використанні перетворень Парка та Кларка, та який дістав назву  $i_d-i_q$  метода. Відповідно до даного методу, перехід від сигналів фазних струмів та напруг в нерухомій системі координат до обертової відбувається на основі співвідношень:

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}} \begin{bmatrix} U_{s\alpha} & U_{s\beta} \\ -U_{s\beta} & U_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$  та  $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$  – проекції вектора напруги та струму в нерухомій системі координат;  $I_{sd}, I_{sq}$  – проекції вектора струму в обертовій системі координат.

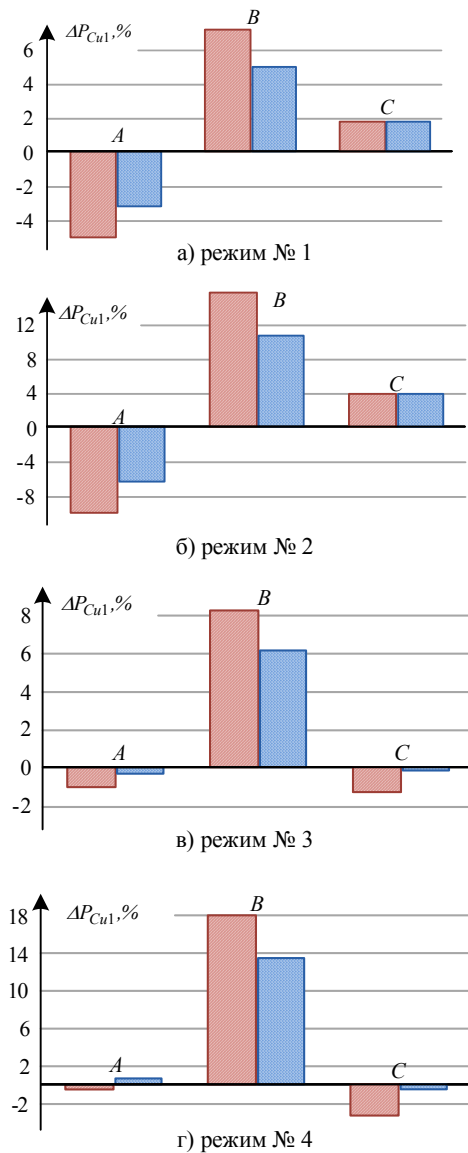


Рисунок 4 – Відхилення втрат в обмотках статора від їх номінального значення до і після компенсації при різних зазначеннях несиметрії

Отримані сигнали потокоутворюючої та моментоутворюючої складових струму статора в нерухомій системі координат можуть бути представлені сумою постійної та змінної складових:

$$\begin{cases} I_{sd} = I_{sd0} + \tilde{i}_d; \\ I_{sq} = I_{sq0} + \tilde{i}_q. \end{cases} \quad (8)$$

Для випадку компенсації змінних складових за проєкціями струму, завдання на компенсацію в нерухомій системі координат буде визначатися наступним чином:

$$\begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}} \begin{bmatrix} U_{s\alpha} & -U_{s\beta} \\ U_{s\beta} & U_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Отримані сигнали струму компенсації за допомогою прямих перетворень Кларка перетворюються в обертову систему координат ( $I_{cd}, I_{cq}$ ) та заводяться на входи відповідних регуляторів струму в системі керування. Сигнали задання потокоутворюючої та моментоутворюючої складових струму будуть визначатися наступним чином:

$$\begin{cases} I'_{sd(ref)} = I_{sd(ref)} + I_{cq}, \\ I'_{sq(ref)} = I_{sq(ref)} - I_{cd}. \end{cases} \quad (10)$$

Функціональна система запропонованої системи векторного керування з функцією компенсації змінної складової споживаної потужності зображена на рис. 5.

Графіки перехідних процесів за швидкістю, моментом та споживаною активною потужністю АД в представлений системі векторного керування з функцією компенсації споживаної потужності наведено на рис. 6. Результати досліджень представлені для несиметрії в фазі А рівної 10% (режим № 2).

Порівняння середньоквадратичних значень змінних складових електромагнітного моменту та споживаної активної потужності асинхронного двигуна у складі запропонованої системи векторного керування для зазначених випадків несиметрії обмоток статора наведено на рис. 7.

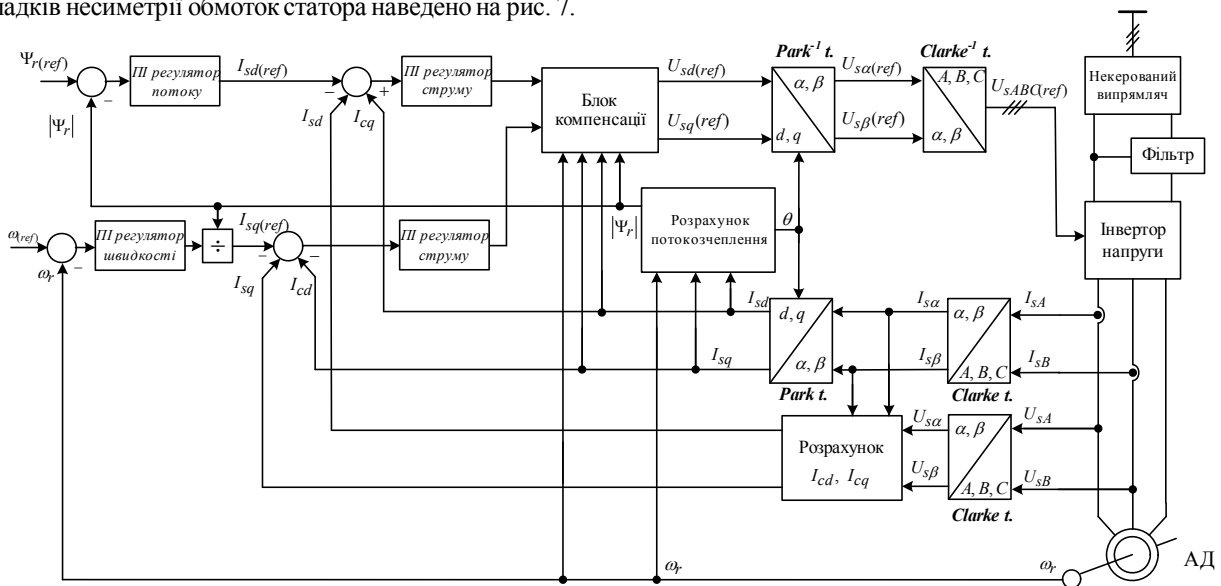


Рисунок 5 – Структурна схема системи векторного керування з функцією компенсації змінної складової споживаної потужності

Результати проведених досліджень показують, що використання запропонованої методики компенсації впливу несиметрії обмоток АД на характеристики системи ЕП, дозволяє зменшити на 90% змінну складову споживаної потужності. Однак змінна складова електромагнітного моменту, в даному випадку, не компенсується, а дещо збільшується.

Таким чином запропонований метод компенсації впливу несиметрії обмоток двигуна дозволяє зменшити змінну складову споживаної потужності до допустимого рівня. Перерозподіл втрат в міді статора за фазами АД до і після компенсації наведено на рис. 8.

Аналіз енергетичних процесів за фазами АД показав, що при використанні запропонованого методу компенсації, величину відхилення втрат в міді статора у найбільш навантаженій фазі можливо зменшити в середньому на 59% при несиметрії як в одній фазі АД, так і при несиметрії в двох фазах.

Проведені дослідження показують, що для зменшення теплового первантаження окремих фаз АД кращі результати показує робота системи ЕП із налаштуванням системи векторного керування на компенсацію змінної

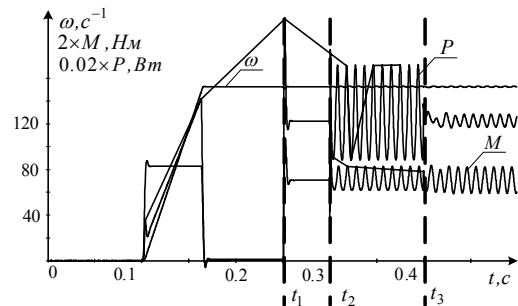


Рисунок 6 – Динамічні характеристики ЕП з ситемою векторного керування з функцією компенсації змінної складової споживаної потужності АД

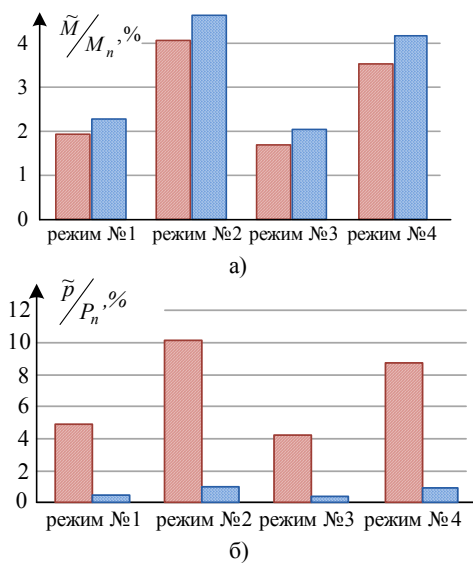
складової трифазної активної потужності. Однак при цьому спостерігається незначне збільшення змінної складової електромагнітного моменту АД. Зважаючи на це, стратегію компенсації потрібно обирати з погляду на вимоги до роботи конкретних систем ЕП робочих механізмів.

**ВИСНОВОК**

Розроблені методи компенсації впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна на характеристики систем електропривода з векторним керуванням, які базуються на внесенні додаткових сигналів компенсації в замкнені контури регулювання струму статора двигуна, в залежності від обраного параметру, дозволяють компенсувати змінну складову електромагнітного моменту на 87%, чи змінну складову споживаної потужності на 90%. При цьому застосування системи компенсації змінної складової споживаної активної потужності дозволяє зменшити теплове перевантаження окремих фаз в середньому на 59%, що збільшує термін експлуатації ізоляції обмоток статора асинхронного двигуна.

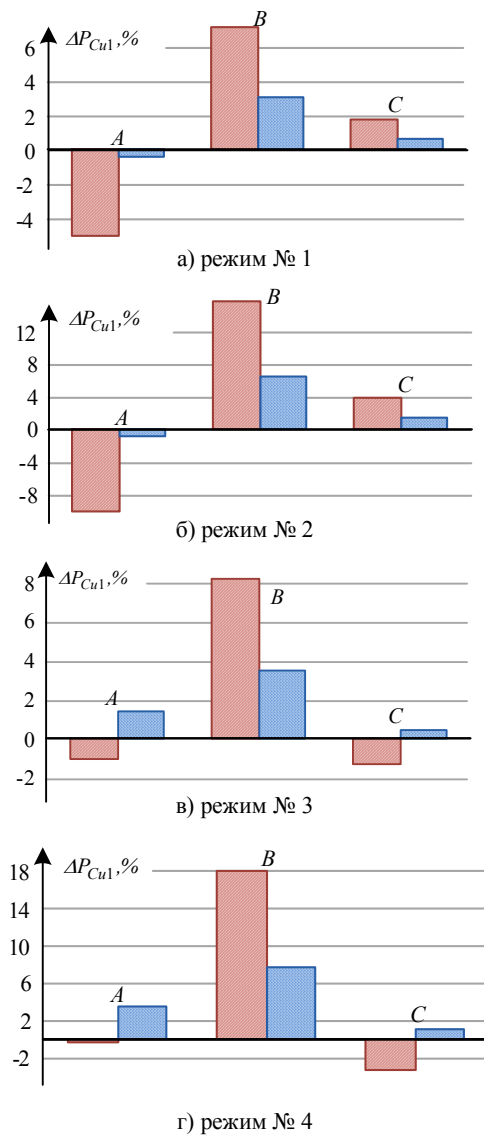
**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Costa Branco P. J. Influence of constant values and motor parameters deviations on the performance of the adaptive sliding-mode observer in a sensorless induction motor drive/ P. J. Costa Branco and J. Ferraz // Progress in Electromagnetics Research B, 2011. – Vol. 34. – PP. 225–245.
2. Zagirnyak M. Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals / M. Zagirnyak, D. Mamchur and A. Kalinov // Przegląd Elektrotechniczny ISSN 0033-2097. – Issue 12b/2012. – PP. 221–224.



**Рисунок 7** – Змінні складові електромагнітного моменту (а) та споживаної потужності (б) АД

3. Siddique Arfat A review of stator fault monitoring techniques of induction motors / Arfat Siddique, S. Yadava Bhim Singh // IEEE Transactions on energy conversion, 2005. – Vol. 20. – No. 1. – PP. 106–114.
4. Peresada S. Speed sensorless control of induction motors based on a reducedorder adaptive observer / S. Peresada, M. Montanari, C. Rossi and A. Tilli // IEEE Trans. Control Systems Techn., 2007. – Vol. 15. – No. 5. – PP. 1049–1064.
5. Jannati M. Speed sensorless fault-tolerant drive system of induction motor using switching extended Kalman filter / M. Jannati, N.R.N. Idris and M.J.A. Aziz// Telkomnika Indonesian journal of electrical engineering, 2014. – Vol. 12. – No.11. – PP.7640–7649.
6. Jannati M. Modeling and Vector Control of Unbalanced induction motors (faulty three phase or single phase



**Рисунок 8** – Відхилення втрат в обмотках статора від їх номінального значення до і після компенсації при різних зазначених несиметрії

- induction motors) / M. Jannati, E. Fallah // 1st. Conference on Power Electronic & Drive Systems & Technologies (PEDSTC), May 2010. – PP. 208–211.
7. Zagirnyak M. Sensorless vector control systems with the correction of stator windings asymmetry in induction motor / M. Zagirnyak, A. Kalinov, V. Melnykov // *Przegld elektrotechniczny*, 2013. – R. 89 NR 12/2013. – PP. 340–343.
  8. Zagirnyak M. V. An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance / M. V. Zagirnyak, A. P. Kalinov, M. S. Maliakova // *Przegld elektrotechniczny*, 2011. – R. 87 NR 12b/2011. – PP. 212–215.
  9. Мельников В. О. Поліпшення енергетичних характеристик електроприводів з векторним керуванням шляхом компенсації параметричної несиметрії асинхронних двигунів / В. О. Мельников, А. П. Калінов // *Технічна електродинаміка*, 2012. – № 3. – С. 85–86.
  10. Домнин И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // *Технічна електродинаміка*. – Ч. 1, 2004. – С. 80–91.
  11. Zagirnyak M. Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor / M. Zagirnyak, A. Kalinov, A. Chumachova // *IEEE Conference publications. EUROCON 2013*. – 1–4 July 2013, Croatia. – ISBN: 978-1-4673-2230-0. – PP. 1033–1037.
  12. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново, 2008. – 298 с.
  13. Чумачова А. В. Компенсація параметричної несиметрії асинхронного двигуна засобами частотно-регульованого електропривода / А. В. Чумачова, А. П. Калінов // *Технічна електродинаміка*, 2012. – № 3. – С. 87–88.
  14. Vasco Soares An instantaneous active and reactive current component method for active filters / Vasco Soares and Pedro Verdelho // *IEEE Transactions on power electronics*. – 2000. – Vol. 15. – No. 4. – PP. 660–669.

*Стаття надійшла до редакції 29.04.2015  
Після доробки 3.06.2015*

Мельников В. О.<sup>1</sup>, Калінов А. П.<sup>2</sup>, Кочуров І. М.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Канд. техн. наук, доцент, Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, Украина

<sup>3</sup>Магистрант, Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, Украина

#### **КОМПЕНСАЦІЯ ВЛИЯНИЯ НЕСИМЕТРИИ ОБМОТКОВ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Представлены методы компенсации влияния несимметрии обмоток статора асинхронного двигателя на характеристики систем электропривода с векторным управлением. Показано, что применение предложенных систем управления, за счет внесения дополнительных сигналов компенсации в замкнутые контуры регулирования тока статора двигателя, позволяют компенсировать переменную составляющую электромагнитного момента, или переменную составляющую потребляемой мощности. При этом применение системы компенсации переменной составляющей электромагнитного момента двигателя позволяет уменьшить вибрации двигателя, а применение системы компенсации переменной составляющей потребляемой активной мощности позволяет уменьшить тепловые перегрузки отдельных фаз, что увеличивает срок эксплуатации изоляции обмоток статора асинхронного двигателя.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, несимметрия статора, компенсация.

Melnykov V.<sup>1</sup>, Kalinov A.<sup>2</sup>, Kochurov I.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Candidate of Science, Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

<sup>3</sup>Master student, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Ukraine

#### **THE COMPENSATION OF THE INFLUENCE OF INDUCTION MOTOR STATOR WINDINGS ASYMMETRY IN THE VECTOR-CONTROL SYSTEMS**

*It is presented the methods for compensation the influence of induction motor stator windings asymmetry on the characteristics of vector-controlled electric drive system. It is shown that the use of proposed control systems at the expense of introduction of additional compensation signals in closed control loops of the motor stator current allows to compensate the variable component of the electromagnetic torque or the variable component of the power consumption. Along with this, the use of the system for compensation of the variable component of the motor electromagnetic torque allows to decrease motor vibrations and the use of the system for compensation of the variable component of active power allows to decrease the heat overloads of the single motor phases, which increases the insulation life of the induction motor stator phases.*

**Keywords:** induction motor, vector control, stator asymmetry, compensation.



REFERENCES

1. Costa Branco P. J., Ferraz J. «Influence of constant values and motor parameters deviations on the performance of the adaptive sliding-mode observer in a sensorless induction motor drive», *Progress in Electromagnetics Research B*, 2011, Vol. 34, PP. 225–245.
2. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. «Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals», *Przeglad Elektrotechniczny 2012, ISSN 0033-2097, Issue 12b/2012*, PP. 221–224.
3. Arfat Siddique, G.S. Yadava, Bhim Singh. «A review of stator fault monitoring techniques of induction motors», *IEEE Transactions on energy conversion*, 2012, Vol. 20, No.1, PP. 106–114.
4. Peresada S., Mon-tanari M., Rossi C. and Tilli A. «Speed sensorless control of induction motors based on a reduced order adaptive observer», *IEEE Trans. Control Systems Techn.*, 2007, Vol. 15, No. 5, PP. 1049–1064.
5. Jannati M., Idris N.R.N. and Aziz M.J.A. «Speed sensorless fault-tolerant drive system of induction motor using switch-ing extended Kalman filter», *Telkomnika Indonesian journal of electrical engineering*, 2014, Vol. 12, No. 11, PP.7640–7649.
6. Jannati M., Fallah E. «Modeling and Vector Control of Unbalanced induction motors (faulty three phase or single phase induction mo-tors)», *1st. Confer-ence on Power Electronic & Drive Sys-tems & Technologies (PEDSTC)*, 2010, PP. 208–211.
7. Zagirnyak M., Kalinov A., Melnykov V. «Sensorless vector control systems with the correction of stator windings asymmetry in induction motor», *Przeglad elektrotechniczny*, 2010, R 89 NR 12/2013, PP. 340–343.
8. Zagirnyak M. V., Kalinov A. P., Maliakova M. S. «An algorithm for electric circuits calculation based on instantaneous power component balance», *Przeglad elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011, R. 87 NR 12b/2011. – PP. 212–215.
9. Melnykov V., Kalinov A. «The increasing of energy characteristics of vector controlled electric drives by means of compensation for the induction motor parametrical asymmetry», *Tehnichna elektro-dinamika*, 2012, No. 3, pp. 85–86. (in Ukrainian)
10. Dominin I., Gemerov G., Krulov D., Sokol I. «Modern theories of power and their use of power electronics converter systems», *Tehnichna elektro-dinamika*, 2011, No. 1, pp. 80–91. (In Russian)
11. Zagirnyak M., Kalinov A., Chumachova A. «Correction of operating condition of a variable-frequency electric drive with a non-linear and asymmetric induction motor», *IEEE Conference publications. EUROCON 2013. – 1–4 July 2013, Croatia*, ISBN: 978-1-4673-2230-0, PP. 1033–1037.
12. Vinogradov A. *Vectornoe ypravlenie electroprivodami peremennogo toka* [Vector control electric AC drives], Ivanovo, 2008, Russia.
13. Chumachova A. and Kalinov A. «Compensation of the induction motor parametric asymmetry by means of the frequency-controlled electric drive,» *Tehnichna elektro-dinamika*, 2012, No. 3, pp. 87–88, 2012. (in Ukrainian)
14. Vasco Soares, Pedro Verdelho. «An instantaneous active and reactive current component method for active filters», *IEEE Transactions on power electronics*, 2012, Vol. 15, No.4, PP. 660–669.

## ОЦІНКА ЧАСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ IGBT4 МОДУЛІВ В РЕЖИМІ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Запропонована методика виконання розрахунків визначення режимів роботи IGBT модулів дворівневого інвертора напруги. Запропоновані формули розрахунків для визначення максимальної та мінімальної температури IGBT чіпів при циклічному навантаженні. На основі експериментальних досліджень фірми SEMIKRON розроблена формула визначення кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури та середньої температури в циклі.

**Ключові слова:** IGBT модуль, час експлуатації та температура IGBT, циклічне навантаження, кількість циклів.

### ВСТУП

Характерним для циклічного навантаження силових напівпровідникових приладів є те, що при цьому температура внутрішніх деталей приладу коливається в певних межах. У зв'язку з тим, що ці внутрішні деталі зроблені з різних матеріалів, вони мають, відповідно, різні значення коефіцієнтів температурного розширення. Тому при зміні температури контактні області з'єднання цих різномірних деталей знаходяться під впливом термомеханічних напружень, які після певної кількості циклів приводять до деградації електричних та теплових параметрів модуля з послідовним його пошкодженням.

Фірма SEMIKRON провела дослідження по визначенню кількості циклів до відмови  $N_f$  IGBT модулів, які зроблені за технологією Trench 4. Результати цих досліджень наведені на рис 1 [1].

При проведенні досліджень виявлено, що циклоустійкість модулів залежить не тільки від значення перепаду температури IGBT чіпа  $\Delta T_j$ , а і від значення середньої температури IGBT чіпа протягом циклу  $T_{jm}$ , які визначаються за формулами:

$$\Delta T_j = T_{j\max} - T_{j\min}; \quad (1)$$

$$T_{jm} = (T_{j\max} + T_{j\min}) / 2, \quad (2)$$

де  $T_{j\max}$ ,  $T_{j\min}$  – максимальне та мінімальне значення температури IGBT чіпа під час циклічного навантаження, відповідно.

Використання результатів експериментальних досліджень фірми SEMIKRON для оцінки часу експлуатації модулів IGBT4 потребує знання алгоритму визначення

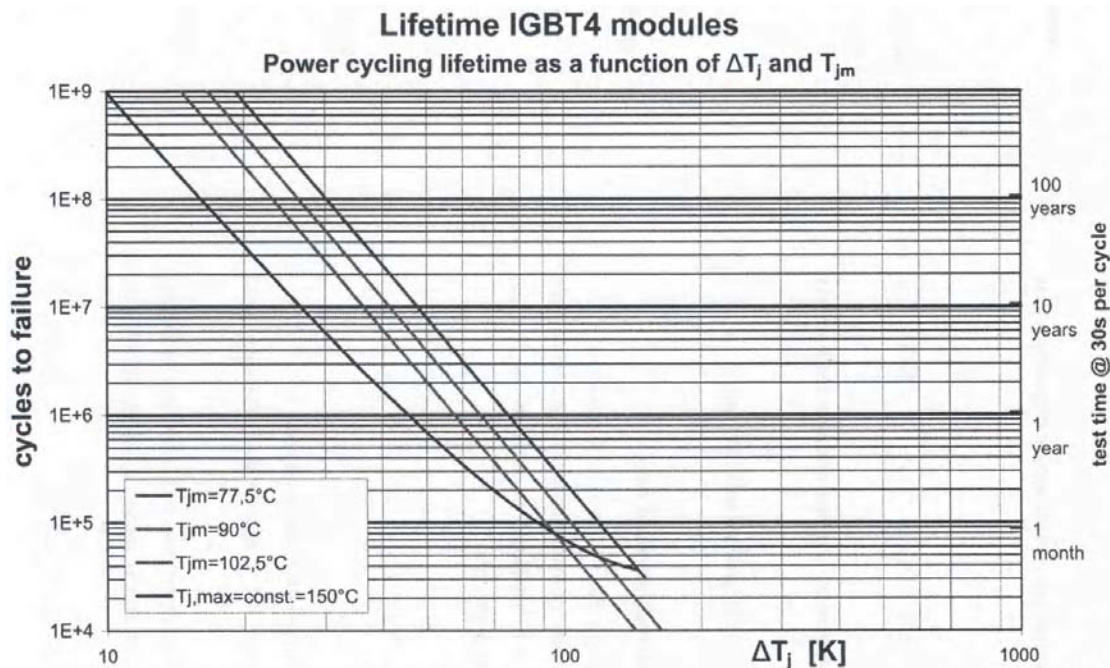


Рисунок 1 – Кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури  $\Delta T_j$  та середньої температури  $T_{jm}$  в циклі

значень  $\Delta T_j$  та  $T_{jm}$ , які мають складну залежність від багатьох параметрів модулів та режимів їх експлуатації. Отримання формул, що зв'язують час експлуатації IGBT модулів з їх параметрами та параметрами системи охолодження є метою цієї статті.

### ФОРМУЛИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РЕЖИМ РОБОТИ IGBT МОДУЛЯ

Значення  $T_{jmax}$  визначається за формулою, що аналогічна формулі для тиристорів, яка наведена у [2]:

$$T_{jmax} = P_T \cdot \left[ \frac{t_p}{t_c} \cdot R_{th(j)sT} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{th(j)sT}(t_p + t_c) - Z_{th(j)sT}(t_c) + Z_{th(j)sT}(t_p) \right] + k \cdot (P_T + P_D) \cdot \left[ \frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thsa} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{thsa}(t_p + t_c) - Z_{thsa}(t_c) + Z_{thsa}(t_p) \right] + T_{amb}, \quad (3)$$

де  $P_T$  – втрати потужності у IGBT чіпі;  $t_p$  та  $t_c$  – тривалість часу навантаження в циклі та тривалість циклу, відповідно;  $R_{th(j)sT}$  – тепловий опір IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача;  $Z_{th(j)sT}(t_p + t_c)$ ,  $Z_{th(j)sT}(t_c)$ ,  $Z_{th(j)sT}(t_p)$  – значення перехідного теплового опору IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача для моментів часу  $(t_p + t_c)$ ,  $(t_c)$ ,  $(t_p)$ , відповідно, які визначаються за формулою:

$$Z_{th(j)sT}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot (1 - e^{-t/\tau_i}), \quad (4)$$

де  $t$  – момент часу, для якого визначається перехідний тепловий опір;  $R_i$ ,  $\tau_i$  – параметри перехідного теплового опору, що наведені у довідникових даних IGBT;  $k$  – кількість силових ключів в модулі,  $P_D$  – втрати потужності в чіпі діоду зворотного струму;  $R_{thsa}$  – тепловий опір охолоджувача;  $Z_{thsa}(t_p + t_c)$ ,  $Z_{thsa}(t_c)$ ,  $Z_{thsa}(t_p)$  – значення перехідного теплового опору охолоджувача для моментів часу  $(t_p + t_c)$ ,  $(t_c)$ ,  $(t_p)$ , відповідно, які визначаються за формулою (4) з використанням параметрів перехідного теплового опору охолоджувача, що визначаються за алгоритмом та програмою наведеними у [3], [4];  $T_{amb}$  – температура охолоджуючого середовища.

**Примітка.** Значення  $T_{jmax}$  не повинне перевищувати значення максимально допустимої температури в тривалому режимі роботи для чіпів IGBT, що створені за технологією Trench 4, яке дорівнює  $T_{j(op)} = 150^\circ\text{C}$ .

Значення  $T_{jmin}$  визначається за формулою, що аналогічна формулі для тиристорів, яка наведена у [5]:

$$T_{jmin} = P_T \cdot \left[ \frac{t_p}{t_c} \cdot R_{th(j)sT} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{th(j)sT}(t_c) - Z_{th(j)sT}(t_c - t_p) \right] + k \cdot (P_T + P_D) \cdot \left[ \frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thsa} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{thsa}(t_c) - Z_{thsa}(t_c - t_p) \right] + T_{amb}, \quad (5)$$

де  $Z_{th(j)sT}(t_c - t_p)$  – значення перехідного теплового опору IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача для моменту часу  $(t_c - t_p)$ ;  $Z_{thsa}(t_c - t_p)$  – значення перехідного теплового опору охолоджувача для моменту часу  $(t_c - t_p)$ .

Втрати потужності в IGBT чіпі визначається за формулою:

$$P_T = P_{condT} + P_{sw}, \quad (6)$$

де  $P_{condT}$  – втрати потужності в IGBT у провідному стані;  $P_{sw}$  – втрати потужності в IGBT при комутації струму.

Втрати потужності в IGBT у провідному стані при роботі у складі дворівневого інвертора напруги, з урахуванням синусоїдальної залежності робочого циклу у часі в режимі ШІМ, визначаються за формулою [6]:

$$P_{condT} = 0,5 \cdot \left( \frac{U_{CE0}}{\pi} \cdot I_m + \frac{r_{CE}}{4} \cdot I_m^2 \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left( \frac{U_{CE0}}{8} \cdot I_m + \frac{r_{CE}}{3 \cdot \pi} \cdot I_m^2 \right), \quad (7)$$

де  $U_{CE0}$ ,  $r_{CE}$  – порогова напруга та динамічний опір транзистора, відповідно, при максимально допустимому значенні робочої температури чіпа  $T_{j(op)}$ ;  $I_m$  – амплітудне значення струму на виході інвертора;

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{out}, \quad (8)$$

де  $I_{out}$  – діюче значення струму навантаження інвертора;  $m$  – коефіцієнт модуляції;  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності навантаження інвертора (електродвигуна).

Втрати потужності в діоді зворотного струму у провідному стані визначаються за формулою [6]:

$$P_{condD} = 0,5 \cdot \left( \frac{U_{F0}}{\pi} \cdot I_m + \frac{r_F}{4} \cdot I_m^2 \right) - m \cdot \cos \varphi \cdot \left( \frac{U_{F0}}{8} \cdot I_m + \frac{r_F}{3 \cdot \pi} \cdot I_m^2 \right), \quad (9)$$

де  $U_{F0}$ ,  $r_F$  – порогова напруга та динамічний опір діоду зворотного струму, відповідно, при максимально допу-

стимому значенні робочої температури напівпровідникової структури  $T_{j(\text{op})}$ .

Сумарні втрати потужності в транзисторі та діоді у провідному стані визначаються за формулою:

$$P_{\text{cond}} = (P_{\text{cond T}} + P_{\text{cond D}}). \quad (10)$$

Для IGBT модуля без металевої основи втрати потужності при максимальному значенні частоти комутації  $f_{\text{sw max}}$  визначаються за формулою [7]:

$$P_{\text{sw max}} = \frac{T_{j(\text{op})} T_{\text{amb}} - P_{\text{cond T}} \cdot R_{\text{th (js)T}} - k \cdot P_{\text{cond}} \cdot R_{\text{th sa}}}{R_{\text{th (js)T}} + k \cdot [1 + (E_{\text{rr m}} / E_{\text{sw m}})] \cdot R_{\text{th sa}}}, \quad (11)$$

де  $E_{\text{rr m}}$  – втрати енергії при відновлюванні замикаючої спроможності діоду зворотного струму та  $E_{\text{sw m}}$  – втрати енергії при комутації транзистора, які визначаються за формулами [6]:

$$E_{\text{rr m}} = \left( \frac{d}{2} + \frac{e}{\pi} \cdot I_m + \frac{f}{4} \cdot I_m^2 \right) \cdot U_{\text{dc}} / U_{\text{nom}}, \quad (12)$$

$$E_{\text{sw m}} = \left( \frac{a}{2} + \frac{b}{\pi} \cdot I_m + \frac{c}{4} \cdot I_m^2 \right) \cdot U_{\text{dc}} / U_{\text{nom}}, \quad (13)$$

де  $a, b, c, d, e, f$  – коефіцієнти поліномів, що апроксимують залежність втрат енергії при комутації транзистора та при відновленні замикаючої спроможності діоду від значення струму, які визначаються за методом, який застосовано в роботі [8];  $U_{\text{nom}}$  – значення напруги, при якій визначаються динамічні параметри модуля;  $U_{\text{dc}}$  – напруга ланки постійного струму інвертора, яка визначається за формулою:

$$U_{\text{dc}} = \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \sqrt{3}} \cdot U_{\text{out}}, \quad (14)$$

де  $U_{\text{out}}$  – значення напруги на виході інвертора.

Максимальне значення частоти комутації IGBT визначається за формулою:

$$f_{\text{sw max}} = P_{\text{sw max}} / E_{\text{sw m}}, \quad (15)$$

Втрати потужності в діоді зворотного струму при відновленні замикаючої спроможності  $P_{\text{rr}}$  визначаються за формулою:

$$P_{\text{rr}} = f_{\text{sw}} \cdot E_{\text{rr m}}. \quad (16)$$

Загальні втрати потужності в діоді зворотного струму при тривалому режимі роботи визначаються за формулою:

$$P_{\text{D}} = P_{\text{cond D}} + P_{\text{rr}}. \quad (17)$$

Таким чином визначаються усі параметри, що характеризують режим циклічного навантаження IGBT модуля і за допомогою діаграм, що зображені на рис. 1, можна оцінити час експлуатації в певному режимі циклічного навантаження.

## ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ

В процесі проектування інверторів, в яких застосовуються IGBT модулі, користування графічними залежностями є не зручним. Тому три верхніх діаграми рис. 1 були апроксимовані наступною формулою:

$$N_f = \exp((\ln A_0 - k \cdot T_{j\text{m}}) - B \cdot \ln \Delta T_j) = \exp((39,82 - 0,055 \cdot T_{j\text{m}}) - 5,055 \cdot \ln \Delta T_j), \quad (18)$$

де  $N_f$  – кількість циклів навантаження IGBT4 модуля до відмови.

Час експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження  $t_w$  визначається за формулою:

$$t_{w1} = t_c \cdot N_f / 3600 \text{ (годин)}, \quad (19)$$

або при річному ресурсі роботи 7000 годин (без урахування часу простою, профілактики та ремонту) за формулою:

$$t_{w2} = t_c \cdot N_f / 252 \cdot 10^5 \text{ (років)} \quad (20)$$

В таблиці 1 наведені результати розрахунків, які свідчать про адекватність формули (18) до діаграм рис. 1 та деякі переваги при застосуванні цієї формули при проектуванні інверторів. Точність розрахунків кількості циклів до відмови визначалась за формулою:

$$\delta = \frac{(N_{f \text{ cal}} - N_{f \text{ d}})}{N_{f \text{ d}}} \cdot 100\%, \quad (21)$$

де  $N_{f \text{ cal}}$  – кількість циклів за формулою (18);  $N_{f \text{ d}}$  – кількість циклів за діаграмами рис. 1.

Оцінка часу експлуатації модулів визначалась при умові тривалості циклу 30 с.

Аналіз результатів розрахунків, що наведені в таблиці 1, свідчить:

1. Формула (18) визначення кількості циклів до відмови з точністю до 4% адекватно відповідає діаграмам, що стосуються модулів IGBT4.

2. Використовування формули (18) дозволяє визначати значення  $N_f$  при будь-яких значеннях  $T_{j\text{m}}$  в межах діапазону температури від  $(T_{\text{amb}} + \Delta T_j / 2)$  до  $(T_{j(\text{op})} - \Delta T_j / 2)$ .

3. Розроблений метод виконання розрахунків може бути застосовано для визначення режимів роботи IGBT модулів та для оцінки часу їх експлуатації в складі індустриальних приводів змінного струму, приводів електромобілів та вітроенергетичних установок.

4. Перепад температури IGBT чіпа  $\Delta T_j$  більш  $50^\circ\text{C}$  значно скорочує термін експлуатації модулів до недопустимого рівня (менше 2 років при тривалості циклу 30 с.).

5. Середня температура IGBT чіпа протягом циклу  $T_{j\text{rr}}$  та максимальне значення температури IGBT чіпа  $T_{j\text{max}}$  суттєво впливають на термін експлуатації модулів.

6. Застосування IGBT4 модулів в комплекті з рідинними охолоджувачами, при яких мінімальна температура в циклі  $T_{j\text{min}}$  не перевищує  $50^\circ\text{C}$  значно підвищує термін їх експлуатації.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

$T_{j\text{np}}$ , °C	$\Delta T_j$ , °C	$T_{j\text{max}}$ , °C	$T_{j\text{min}}$ , °C	$N_{f\text{cal}}$ , циклів	$N_{f\text{d}}$ , циклів	$\delta$ , %	$t_{w2}$ , років
77,5	30	92,5	62,5	101 186 022	1E+8	1,2	119
77,5	50	102,5	52,5	77 288	8E+6	- 3,4	9,5
77,5	60	107,5	47,5	3 086 274	3E+6	2,9	3,5
77,5	80	117,5	37,5	725 049	7E+5	3,6	0,8
77,5	90	122,5	32,5	400 696	4E+5	0,2	0,47
90	20	100	80	391 888 533	4E+8	- 2	476
90	30	105	75	50 879 527	5E+7	1,8	59
90	70	125	55	714 134	7E+5	2	0,8
90	90	135	45	201 482	2E+5	0,8	0,24
102,5	20	112,5	92,5	197 033 929	2E+8	- 1,5	238
102,5	40	122,5	82,5	6 010 340	6E+6	0,2	7
102,5	50	127,5	77,5	1 954 146	2E+6	- 2,3	2,3
102,5	90	147,5	57,5	101 312	1E+5	1,3	0,12
105	30	120	90	22 297 189			26,5
100	40	120	80	6 896 275			8,1
95	50	120	70	2 951 913			3,5
90	60	120	60	1 551 876			1,8
115	30	130	100	12 864 359			15,3
110	40	130	90	3 978 804			4,7
105	50	130	80	1 703 106			2
130	20	140	120	43 422 487			51
125	30	140	110	7 422 089			8,8
120	40	140	100	2 295 570			2,7
115	50	140	90	982 606			1,1
135	30	150	120	4 282 173			4,7
130	40	150	110	1 324 428			1,5
50	30	65	35	459 188 419			546
50	40	70	30	107 875 889			127
60	40	80	40	62 238 973			73
60	50	85	35	20 235 806			24
60	60	90	30	8 080 587			9,6
70	40	90	50	35 968 764			42
70	50	95	45	11 675 044			13
70	60	100	40	4 662 093			5,5

**ВИСНОВКИ**

1. Розроблена методика виконання розрахунків для визначення циклічних режимів роботи IGBT модулів у складі дворівневих інверторів напруги, що дозволило оцінити їх час експлуатації при будь яких температурах та при застосуванні будь якого охолоджувача.

2. Розроблені формули для визначення максимальної та мінімальної температури IGBT чіпів при циклічно-му навантаженні струмом.

3. На основі результатів експериментальних досліджень спеціалістів фірми SEMIKRON, розроблена формула визначення кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури та середньої температури в циклі. екрану.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Application Manual Power Semiconductors [Електронний ресурс] = Підручник до застосування силових

напівпровідникових приладів / Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann/SEMIKRON International GmbH [2011] – Режим доступу:

[http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application\\_handbook/application\\_manual\\_complete.pdf](http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application_handbook/application_manual_complete.pdf) вільний, – Загол. з екрану.

2. Джентри Ф., Гутцвиллер Ф., Голоньяк Р., Э. фон За- стров. Управляемые полупроводниковые вентили. Из-во «Мир», М. : –1967.– 456 с.

3. Остренко В. С. Алгоритм визначення параметрів ек- спонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача. Науковий журнал «Радіоелектроніка Інформатика Управління», 1(24) 2011, С. 23–29.

4. Остренко В. С., Егунова Е. С. Определение парамет- ров экспонент аппроксимирующих кривую переход- ного теплового сопротивления. «Технічна електро- динаміка», тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», –2012. Ч. 2, – С. 147–150.

5. Остренко В. С. Василенко О. В. Определение температуры полупроводниковой структуры тиристора при циклической нагрузке. *Науковий журнал «Електротехніка та електроенергетика»*, №1, –2012., С. 13–16.
6. Applying IGBT Application Note 5SYA 2053-04 [Электронный ресурс] = Застосування IGBT / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Електронні данні (1 файл). – Switzerland [ 2012] – Режим доступу: [http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/\\$file/Applying%20IGBTs\\_5SYA%202053-04.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf) вільний, – Загол. з екрану.
7. Остренко В. С. Определение максимально допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT. *Науковий журнал «Електротехніка та електроенергетика»*, №2, –2012, С. 28–33.
8. Остренко В. С., Критська Т. В. Визначення температури IGBT модуля при пуску асинхронного двигуна. *Науковий журнал «Електротехніка та електроенергетика»*, №2, –2013, С. 47–53.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2015  
Після доробки 25.05.2015

Остренко В. С.

Канд. техн. наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, Украина

**ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ IGBT4 МОДУЛЕЙ В РЕЖИМЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

*Предложена методика выполнения расчётов для определения режимов работы IGBT модулей двухуровневого инвертора напряжения. Предложены формулы расчетов для определения максимальной и минимальной температуры IGBT чипов при циклической нагрузке. На основе экспериментальных исследований фирмы SEMIKRON разработана формула определения количества циклов до отказа IGBT4 модулей в зависимости от перепада температуры и средней температуры IGBT чипов в цикле.*

**Ключевые слова:** IGBT модуль, SKiiP4, циклическая нагрузка, количество циклов

Ostrenko V. S.

Ph.D., Associate Professor, Zaporizhia State Engineering Academy, Ukraine

**TIME EVALUATION OF THE EXPLOITATION OF IGBT4 MODULES UNDER CYCLIC LOAD MODE**

*The method of calculation to determine the mode of IGBT module operation for the two-level voltage inverter is proposed. IGBT module does not have a metal base plate in the calculation assumed. The intensity of the cooling module takes into account the thermal impedance of the heat sink.*

*The maximum permissible switching frequency of IGBT at limited ambient temperature, thermal resistance of the heat sink, load current of the inverter and the maximum permissible IGBT chip temperature are given.*

*Calculation formulae for determination of the maximum and minimum IGBT chips temperatures under cyclic loading are proposed for use.*

*On the basis of experimental research done by SEMIKRON firm the formulae for determination of the number of cycles to failure IGBT4 modules, which are dependent on the temperature differences and the mean temperature of the IGBT chip in cycle, are proposed.*

**Keywords:** IGBT module, SKiiP4, cyclic loading, power cycling, number of cycles

**REFERENCES**

1. Application Manual Power Semiconductors [Electronic resource] Manual/ Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann/SEMIKRON International GmbH [2011] – access mode: [http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application\\_handbook/application\\_manual\\_complete.pdf](http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application_handbook/application_manual_complete.pdf) (free). – Title Screen.
2. Gentry F. E., Gutzwiller F. W., Holonyak N., jr, E. E. von Zastrow Semiconductor Controlled Rectifiers/Prentice-Hall, Inc. N. J. 1964.
3. Ostrenko V. S. Algoritm vyznachennia parametriv eksponent, shcho aproksymuiut perekhidnyi teplovyi opyr okholodzhuvacha. *Radioelektronika, Informatyka, Upravlinnia*, 1(24) 2011, pp. 23–29.
4. Ostrenko V. S., Egunova E. S. Opredelenie parametrov eksponent approksimiruyushchikh krivuyu perekhodnogo teplovogo soprotivleniya. «*Tekhnichna elektrodynamika*», tematychny vypusk «*Sylovaia elektronika ta energoefektyvnist*», 2012 r. CHastyna 2, pp. 147–150.
5. Ostrenko V. S., Vasilenko O. V. Opredelenie temperatury poluprovodnikovoy struktury tiristora pri tsiklicheskoj nagruzke. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 1'2012 pp. 13–16.
6. Applying IGBT Application Note 5SYA 2053-04 [Electronic resource] / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Elektronni dannii (1 file). – Switzerland [ 2012] – access mode: [http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/\\$file/Applying%20IGBTs\\_5SYA%202053-04.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf) (free), – Title Screen.
7. Ostrenko V. S. Opredelenie maksimalno dopusmogo znacheniya chastity kommutatsii modulua IGBT. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 2'2012 pp. 28–33.
8. Ostrenko V. S., Kritska T. V. Vyznachenya temperatury IGBT modulua pry pusku asynkhronogo dvyguna. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 2'2013 pp. 47–53.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ САМОЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМУ ГАЛЬМУВАННІ З ЖИВЛЕННЯМ ВІД ДЖЕРЕЛА ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*В статті проведено визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Проведене дослідження виконано в загальному вигляді, що дозволяє використовувати його результати для асинхронних тягових електроприводів різних серій.*

***Ключові слова:** самозбудження, перехідні процеси, асинхронний двигун, намагнічування, математична модель.*

### ВСТУП

Важливою складовою побудови раціональної структури системи електроживлення автономного рухомого об'єкта є можливість здійснення рекуперації енергії під час гальмування або руху на вибігу. Даним питанням присвячено значне число робіт, проте на сьогодні не впроваджено в практику будівництва автономного рухомого складу залізниць жодної конструкції з можливістю рекуперації [1]. В системах тягових електроприводів електромобілів практичне впровадження рекуперації знаходиться на більш високому рівні, проте значна кількість дослідників відмічає відсутність раціональних структур електроприводів з можливістю здійснення рекуперації. Значний внесок в розгляд питання побудови автономних електромеханічних систем зроблено авторами робіт [2–5], де наведено основні наукові та практичні результати відділу електромеханічних систем ІЕД НАНУ, пов'язані з розробкою математичних моделей і методик розрахунку режимів асинхронних генераторів, їх експериментальними та розрахунковими дослідженнями, мікропроцесорних систем керування для автономних зварювальних мультисистем, асинхронних двигунів, машинно-вентильних комплексів на їх основі та електричних машин з постійними магнітами і вентильно-індукторних машин.

Практики та виробничники пояснюють це передусім відсутністю раціональної структури таких тягових електроприводів, недостатньою вивченістю цілої низки проблем, серед яких, зокрема, задача самозбудження тягової асинхронної машини в гальмівному режимі при використанні рекуперації [1, 2, 4]. Проведені значні експериментальні дослідження [6] даного питання показали, що в більшості гальмівних режимів збудження асинхронної тягової машини забезпечується за рахунок енергії, накопиченої між фазами і додаткового живлення фаз від конденсаторного фільтра перетворювача частоти. Однак, залишається незрозумілим, чи в усіх усталених режимах подібне збудження є достатнім без живлення асинхрон-

ної тягової машини від синхронного генератора через випрямляч. Відповідно до висновку [6] в перехідних режимах, зокрема після ввімкнення гальмівного режиму після руху на вибігу або після тягового режиму, живлення від синхронного генератора може бути необхідним. Тому дане питання потребує значного поетапного опрацювання. На першому етапі вивчення даного питання необхідним є визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Даному питанню і буде присвячено дану роботу.

**Мета роботи** – визначення математичного опису електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності.

**Матеріали дослідження.** Задачею даної статті є дослідження електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Дані процеси будуть розглянуті на основі схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02. До складу тягової електропередачі входять:

- дизельний двигун, що є первинним джерелом енергії;
- синхронний генератор;
- тяговий перетворювач частоти;
- перетворювач власних потреб;
- тяговий двигун;
- перетворювальні пристрої для забезпечення процесу заряд-розряд накопичувального елемента (питання вибору типу накопичувача в статті не розглядається – накопичувач замінено еквівалентною ємністю);
- система керування, що забезпечує узгоджену роботу всіх вузлів відповідно до оптимального режиму функціонування кожного з них, причому забезпечуючи найбільш раціональне споживання енергоресурсів кожним вузлом тягової електропередачі за даних умов експлуатації та при







На рис. 1 показано також накопичувач енергії НЕ в поєднанні з перетворювальною системою накопичувального елемента ПНЕ, що забезпечує його роботу.

Для дослідження електромагнітних процесів використовуємо метод різницевих рівнянь. За високої точності розрахунку він дозволяє отримати рішення в аналітичному вигляді на будь-якому інтервалі часу роботи тягового перетворювача частоти.

Для вирішення поставленої в роботі задачі необхідно аналізувати електромагнітні процеси самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності враховуючи розподіл величини живлячої напруги у часі. Напряга випрямляча  $U_1(t)$ , що живиться від синхронного генератора, який приводиться в дію тепловим двигуном, представляє собою кусково-неперервну функцію часу для будь-якого інтервалу дискретності [8, 9]

$$U_1[t_1, n] = U_m \cdot \sin\left(\omega t_1 + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x\right), \quad (1)$$

де  $U_m$  – амплітуда напруги синхронного генератора;  $\alpha_0$  – кут керування випрямлячем, який відповідає початку рекуперативної;  $n$  – порядковий номер інтервалу дискретності функції напруги;  $t_1$  – змінна координата часу в межах інтервалу дискретності  $0 < t_1 < T$ ;  $T$  – тривалість інтервалу дискретності;  $x$  – коефіцієнт, який характеризує початкову фазу напруги  $1 \leq x \leq 2$ ;  $\varpi$  – відносна частота зміни напруги від одного інтервалу дискретності до іншого.

Відносна частота зміни напруги  $\varpi$  залежить від крутизни зміни сигналу керування випрямлячем  $\lambda$  та характеризує дискретне прирощення кута керування  $\Delta\alpha$  в інтервалі дискретності.

Для випрямляча з роздільним керуванням, виконаного за мостовою схемою (найчастіше використовуються в системах автономного живлення транспортних об'єктів) мають місце наступні співвідношення [6, 9]:

$$\varpi = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\lambda}{\lambda - 1}, \quad (2)$$

$$T = \frac{\pi}{3\omega} \cdot \frac{1}{\lambda - 1}, \quad (3)$$

З урахуванням виразу (1) маємо функцію струму в ланці постійного струму:

$$i_d(t) = \pm \left( \frac{U_m}{Z} \sin\left(\omega t_1 + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right) - \frac{U_{c0}}{R_d} - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} (t - T_d) + A_1 e^{-\frac{t}{T_d}} \right), \quad (4)$$

де  $Z = \sqrt{R_d^2 + (\omega \cdot L_d)^2}$ , а величини  $R_d$  та  $L_d$  є сталими параметрами ланки перетворювача;  $\varphi = \arctg(-\omega \cdot T_d)$ ;  $A_1$  – постійна інтегрування.

Завдання напруги  $U_1(t)$  у вигляді гратчастої функції (1) дозволяє знайти рішення виразу (3) у вигляді різницевого рівняння.

Для знаходження різницевого рівняння скористаємось граничними значеннями для  $n$ -го інтервалу дискретності:

на першому інтервалі дискретності

$$\begin{cases} t = nT; \\ t_1 = 0; \\ i_d(t) = i_d[n], \end{cases} \quad (5)$$

на другому інтервалі дискретності

$$\begin{cases} t = (n+1)T; \\ t_1 = T; \\ i_d(t) = i_d[n+1]. \end{cases} \quad (6)$$

З урахуванням системи (5) знаходимо з виразу (4) постійну інтегрування  $A_1$ .

Вирішуючи рівняння (4) з урахуванням системи (6), отримуємо різничеве рівняння першого порядку

$$i_d[n+1] - i_d[n] e^{-\frac{T}{T_d}} = \left( \frac{U_m}{Z} \left[ \sin\left(\omega T + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right) - \sin\left(\varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3}x + \varphi\right) e^{-\frac{T}{T_d}} \right] - \frac{U_{c0}}{R_d} \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \left[ (nT - T_d) \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) + T \right] \right). \quad (7)$$

Застосовуючи до виразу (7) пряме дискретне перетворення Лапласа (динамічні процеси в дискретних системах керування описуються рівняннями в кінцевих різницях, для яких зручним методом вирішення є операційний метод, заснований на дискретному перетворенні Лапласа, яке є узагальненням звичайного перетворення Лапласа на дискретні функції, при тому що багатьом співвідношенням і операціям над оригіналами відповідають простіші співвідношення над їх зображеннями), отримаємо алгебраїчне рівняння відносно шуканої ступінчастої функції струму  $i_d^*(q)$

$$i_d^*(q) = \frac{e^q}{e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}} i_d[0] + \frac{U_m}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) Z} D\{A_2\} - \frac{e^q U_{c0}}{R_d \left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)} \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \frac{e^q \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right)}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)} - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \frac{e^q \left(T - T_d \left(1 - e^{-\frac{T}{T_d}}\right)\right)}{\left(e^q - e^{-\frac{T}{T_d}}\right) (e^q - 1)}, \quad (8)$$

де  $i_d[0]$  – початкове значення струму випрямляча для відповідної фази рекуперації на етапі початку рекуперації;  $q$  – абсциса ступінчастості величини струму;  $D\{A_2\}$  – операція диференціювання за часом виразу

$$A_2 = \sin\left(\omega T + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x + \varphi\right) - \sin\left(\varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x + \varphi\right) e^{-\frac{T}{T_d}}.$$

Використовуючи в подальшому основні теореми, таблиці відповідності, а також зворотне перетворення Лапласа, знаходимо гратчасту функцію струму у режимі рекуперації:

$$i_d[n] - i_d[0] e^{-\frac{Tn}{T_d}} = \frac{U_m}{Z} \sum_{m=0}^{n-1} A_2 e^{-\frac{T}{T_d} (n-m-1)} - \frac{U_{c0}}{R_d} \left(1 - e^{-\frac{Tn}{T_d}}\right) - \frac{k_i I_{1a}}{C_\phi R_d} \cdot \left(T_d \left(1 - e^{-\frac{Tn}{T_d}}\right) - Tn\right). \quad (9)$$

Активний опір фільтра, як правило, має мале значення, а в перетворювачах потужністю більш 40 кВА значення  $T_d$  лежить у межах 0,1 – 0,3 с, тому величиною  $R_d$  можна знехтувати.

Вважаючи  $R_d=0$ , отримаємо різницеве рівняння у більш зручному для аналізу вигляді

$$i_d[n+1] - i_d[n] = \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x\right) - \frac{U_{c0}}{L_d} T - \frac{k_i I_{1a}}{2C_\phi L_d} (2n+1) T^2. \quad (10)$$

Так як тяговий інвертор в режимі рекуперації вмикається майже безінерційно на заданий кут  $\alpha > 90^\circ$ ,  $\alpha = 180 - \beta$ .

Для першої різниці струму  $\omega T = \frac{\pi}{3}$ ,  $\varpi n = 0$  з системи (6) отримуємо наступне:

$$\frac{\Delta i[1]}{T} = \frac{i_d[1] - i_d[0]}{T} = \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \pi - \beta + \frac{\pi}{3} x\right) - \frac{U_{c0}}{L_d} - \frac{k_i I_{1a} T}{2C_\phi L_d} = \frac{1}{L_d} \left(U_{d0} \cos \beta - U_{c0} - \frac{I_{1a} \pi}{6C_\phi \omega}\right). \quad (11)$$

Вважаючи, що  $\Delta i[1] = I_{1am}$  з останнього виразу отримуємо умову, за виконання якої забезпечується максимальний темп рекуперативного гальмування

$$I_{1am} = \frac{U_{d0} \cos \beta - U_{c0}}{6\omega L_d C_\phi + \pi T} \cdot 6T\omega C_\phi. \quad (12)$$

Так як при рекуперації в системі тягового автономного інвертора напруги завдання на зміну частоти визначається сигналом завдання на струм рекуперації та при зміні частоти забезпечується підтримка встановленого закону керування (наприклад закону Костенко), тоді напруга та конденсатори у замкнутій системі регулювання завжди будуть знаходитись у жорсткій відповідності до напруги інвертування. Тоді можна вважати, що  $i_d[n] = k_i I_{1a}$ , а з урахуванням викладеного, маємо струм рекуперації при гальмуванні:

$$i_d[n] = \frac{2C_\phi L_d}{2C_\phi L_d + T^2 n^2} \left(i_d[0] - \frac{2U_m}{\omega L_d} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left(\frac{\omega T}{2} + \varpi n + \alpha_0 + \frac{\pi}{3} x\right) - \frac{U_{c0}}{L_d} Tn\right). \quad (13)$$

Таким чином, у замкнутій системі регулювання струм рекуперації визначається: величиною кута регулювання  $\varpi n$  (крутизною  $\lambda$ ), початковою напругою на конденсаторі та параметрами фільтра.

Можливість підтримки реактивної складової статорного струму тягового асинхронного двигуна на даній частоті шляхом живлення від системи живлення рухомо-

го електротехнічного комплексу (від синхронного генератора через тяговий випрямляч) забезпечує надійне збудження асинхронного двигуна в генераторному режимі та, як наслідок, стабільне гальмування електротехнічного комплексу, яке відбувається шляхом зміни співвідношення між частотою струму статора та ротора двигуна, що дозволяє забезпечити від'ємну величину ковзання. Зміною величини ковзання та струму додаткового живлення двигуна від випрямляча, використовуючи регулювання інвертором, регулюють величину ЕРС асинхронного двигуна та, як наслідок, потужність гальмування на даній швидкості. Однак все це має місце лише на високих швидкостях руху. По мірі зменшення швидкості обертання ротора в процесі гальмування величина ЕРС стає меншою напруги синхронного генератора. При цьому гальмівний резистор буде споживати струм від випрямляча, заданий виразом (4), що є проблемою з огляду на неприпустимість даного процесу. Для запобігання підживлення гальмівного резистора необхідно відключити ланку постійного струму від синхронного генератора шляхом запирання випрямляча. При цьому джерелом реактивної потужності в системі може бути тільки конденсатор накопичувальної системи. Але, в цьому разі повстає проблема конденсаторного збудження тягового двигуна. Величина ємності накопичувальної системи електротехнічного комплексу повинна забезпечувати самозбудження асинхронної машини в режимі рекуперативного гальмування.

Умовою забезпечення стійкого самозбудження тягового двигуна є розміщення вольт-амперної характеристики конденсаторів накопичувальної системи нижче від кривої холостого ходу асинхронної машини. Пояснимо дане міркування за допомогою рис. 2 [1].

На рис. 2 крива  $OACE$  являє собою криву холостого ходу тягової асинхронної машини, а лінія  $OBCE$  є вольт-амперною характеристикою. На кривій  $OACE$  ділянка  $OAC$  відповідає процесу стійкого самозбудження, яке припиняється після точки  $C$ . Надалі машина знаходиться у збудженому стані.

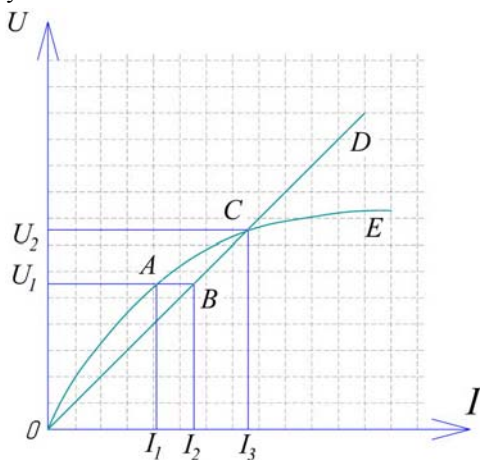


Рисунок 2 – Графічна інтерпретація умови стійкого самозбудження тягового двигуна від накопичувальної системи

Розглянемо довільну точку роботи тягового двигуна –  $A$ , та відповідну робочу точку конденсаторної установки –  $B$ . Струм, який споживає тягова машина при одній і тій самій напрузі є меншим від струму, що його може забезпечувати накопичувальна установка, тобто доки виконується умова

$$I_1 < I_2 \quad (14)$$

в позначеннях, прийнятих на рис. 2, доги забезпечується стійке самозбудження тягового двигуна за рахунок споживання струму від накопичувального елемента. Проте, необхідним для рухомих електротехнічних комплексів є пошук технічних рішень по зменшенню величини ємності конденсатора.

Розглянемо умови збудження асинхронної машини в гальмівному режимі при включенні гальмівного резистору у ланку постійного струму, тобто між випрямлячем та інвертором. В цьому випадку реактивна енергія, необхідна для збереження магнітного потоку тягової машини може бути отримана шляхом обміну енергією між фазами через тиристори, розряду конденсатору фільтра та накопичувальної установки або живлення струмом від синхронного генератора (заданого виразом (9)). Частина реактивної енергії отримується також від конденсаторів вузла комутації, але ця частина у зв'язку з короткістю комутаційного інтервалу та при надто високих частотах струму асинхронної машини невелика. В подальшому вона не враховується.

Живлення струмом від синхронного генератора при гальмівному режимі вкрай не бажане, так як призводить до збільшення витрати палива дизелем та може понизити величину гальмівної потужності, що розвиває тяговий двигун в наслідок поглинання у резисторі частини струму синхронного генератора. Тому доцільно при гальмівному режимі тримати випрямляч в закритому стані шляхом зниження збудження синхронного генератора так, щоб випрямлена напруга останнього, задана виразом (1), була нижче випрямленої напруги асинхронної машини.

При зниженні коефіцієнта потужності асинхронної машини величина реактивної енергії, необхідної для її збудження, збільшується та відповідно збільшується струм розряду конденсатору. Конденсатор фільтра, призначений для згладжування пульсацій напруги (1), що створюються головним чином роботою інвертора. Збільшення ємності більш того, що потребується для цієї мети є небажаним для уникнення збільшення маси та об'єму інвертора. Тому при низьких коефіцієнтах потужності може виявитись доцільним ввімкнення випрямляча та живлення асинхронної машини від синхронного генератора струмом (10) шляхом збільшення його збудження. Це ввімкнення повинно відбуватись автоматично при збільшенні розрядного струму конденсатору фільтра та накопичувальної установки до деякого допустимої межі.

## ВИСНОВКИ

В статті проведено визначення функцій електромагнітних процесів самозбудження асинхронного тягового двигуна при рекуперативному гальмуванні з живленням від джерела обмеженої потужності. Проведене дослідження виконано в загальному вигляді, що дозволяє використовувати його результати для асинхронних тягових електроприводів різних серій. Зокрема, показано, що підтримки реактивної складової статорного струму тягового асинхронного двигуна на даній частоті шляхом живлення від системи живлення рухомого електротехнічного комплексу забезпечує надійне збудження асинхронного двигуна в генераторному режимі та, як наслідок, стабільне гальмування електротехнічного комплексу. Причому, живлення струмом від синхронного генератора при гальмівному режимі вкрай не бажане, так як призводить до збільшення витрати палива дизелем та може понизити величину гальмівної потужності. Запропоновано при гальмівному режимі тримати випрямляч в закритому стані шляхом зниження збудження синхронного генератора так, щоб випрямлена напруга останнього була нижче випрямленої напруги асинхронної машини.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькин Д. И. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью / Родькин Д. И., Мартыненко В. А., Барвинок Д. В., Гераскин А. С. // Вісник КДПУ. – 2002. – С. 174–181.
2. Шидловский А. К. Анализ энергетических показателей источника вторичного электропитания для низковольтных потребителей транспортных средств / Шидловский А. К., Юрченко О. Н., Скиданов В. М., Павлов В. Б. // Техническая электродинамика. – № 4. – 1989. – С. 27–31.
3. Мазуренко Л. И. Расчетно-экспериментальная оптимизация параметров емкостных систем возбуждения и анализ характеристик однофазных асинхрон-

ных генераторов / Мазуренко Л. И., Лесник В. А., Дынник Л. Н., Джура А. В. // Техн. электродинамика. – № 4. – 2007. – С. 57–62.

4. Мазуренко Л. И. Электричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі / Мазуренко Л. И., Попович О. М., Гребеніков В. В., Бібік О. В., Головань І. В., Джура О. В., Шуруб Ю. В., Вербовий А. П., Романенко В. І. // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – Вип 29. – К. : ІЕД НАНУ. – 2011. – С. 62–70.
5. Мазуренко Л. И. Электричні машини змінного струму та машинно-вентильні комплекси на їх основі / Мазуренко Л. И., Попович О. М., Гребеніков В. В., Бібік О. В., Головань І. В., Джура О. В., Шуруб Ю. В., Вербовий А. П., Романенко В. І. // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. – Вип 26. – К. : ІЕД НАНУ. – 2010. – С. 63–71.
6. Расчет предельных и регулировочных характеристик электропередачи ТЭ-120 в режиме торможения. Разработка структурной схемы системы автоматического регулирования тормозного режима. Часть 1 (промежуточный отчет), 16/79, инв. № Б765805. – М. : МЭИ, 1979. – 58 с.
7. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Дмитро Олександрович Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 С.
8. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл / Кулагін Д. О. // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 6. – С. 103–110.
9. Кулагін Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення / Кулагін Д. О. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 49–55.

Стаття надійшла до редакції 16.03.2015  
Після доробки 30.06.2015

Кулагін Д. А.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електропостачання промислових підприємств» Запорозького національного технічного університету, Україна.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ С ПИТАНИЕМ ОТ ИСТОЧНИКА ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

В статье выполнено определение функций электромагнитных процессов самовозбуждения асинхронного тягового двигателя при рекуперативном торможении с питанием от источника ограниченной мощности. Проведенное исследование выполнено в общем виде, что позволяет использовать его результаты для асинхронных тяговых электроприводов различных серий.

**Ключевые слова:** самовозбуждение, переходные процессы, асинхронный двигатель, намагничивание, математическая модель.

Kulagin D. O.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the department «Electrosupply of the industrial enterprises» of Zaporozhye national technical University, Ukraine

### INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF SELF-EXCITATION ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR WITH REGENERATIVE BRAKING POWERED BY LIMITED POWER SOURCES

The article presents the definition of the functions of self-excitation electromagnetic processes of asynchronous traction motor with regenerative braking powered by limited power source. It is shown that the power of current synchronous generator with brake mode is not very desirable, as leading to increased fuel consumption and can reduce the value of the braking power, engine traction which develops as a result of absorption of the resistor current synchronous generator. Therefore, it is advisable in brake mode to keep rectifier closed by lowering the excitation synchronous generator so that the latter is below rectified voltage asynchronous machine. By reducing the power factor of asynchronous machine magnitude of reactive energy required for its excitation increases and increases according capacitor discharge current. Capacitor filter designed to smooth the ripple voltage mainly generates the inverter work. The increase in capacity required for this purpose is desirable to avoid the increase in the weight and volume of the inverter. Therefore, the low power factor may be appropriate to enable the rectifier and power of asynchronous machine of synchronous generator increasing its excitement. This should automatically be happened with increasing of discharge current filter capacitor installation and should be funded to some acceptable limits. The research is carried out in general terms, it can be used for asynchronous traction results in electric various series.

**Keywords:** self-excitation, transients, asynchronous motor, magnetization, mathematical model.

## REFERENCES

1. Rodkin D. I., Martynenko V. A., Barvinok D. V., Geraskin A. S. Energoprotssy v asinhronnom dvigatele s nasyischennoy stalju. *VIsnik KDPU*, 2002, PP. 174–181.
2. Shidlovskiy A. K., Yurchenko O. N., Skidanov V. M., Pavlov V. B. Analiz energeticheskikh pokazateley istochnika vtorychnogo elektropitaniya dlya nizkovoltnykh potrebiteley transportnykh sredstv. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, No 4, 1989, PP. 27–31.
3. Mazurenko L. I., Lesnik V. A., Dyinnik L. N., Dzhura A. V. Raschetno-eksperimentalnaya optimizatsiya parametrov emkostnykh sistem vozbuzhdeniya i analiz harakteristik odnofaznykh asinhronnykh generatorov. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, No 4, 2007, PP. 57–62.
4. Mazurenko L. I., Popovich O. M., GrebenIkov V. V., Biblk O. V., Golovan I. V., Dzhura O. V., Shurub Yu. V., Verboviy A. P., Romanenko V. I. ElektrichnI mashini zmInnogo strumu ta elektromehanIchnI sistemi na Yih osnovI. *PratsI Institutu elektrodinamIki NatsIonalnoYi akademIYi nauk UkraYini: Zb. nauk. Pr, Vip 29*, Kiev, IED NANU, 2011, PP. 62–70.
5. Mazurenko L. I., Popovich O. M., GrebenIkov V. V., Biblk O. V., Golovan I. V., Dzhura O. V., Shurub Yu. V., Verboviy A. P., Romanenko V. I. ElektrichnI mashini zmInnogo strumu ta mashinno-ventilnI kompleksi na Yih osnovI. *PratsI Institutu elektrodinamIki NatsIonalnoYi akademIYi nauk UkraYini: Zb. nauk. Pr, Vip 26*, Kiev, IED NANU, 2010, PP. 63–71.
6. Raschet predelnykh i regulirovochnykh haratkrystik elektroperedachi TE-120 v rezhime tormozheniya. Razrabotka strukturnoy shemyi sistemyi avtomaticheskogo regulirovaniya tormoznogo rezhima. Chast 1 (promezhutochnyy otchet), 16/79, inv. No B765805, Moscow, MEI, 1979, 58 s.
7. Kulagin D. O. Proektuvannya sistem keruvannya tyagovimi elektroperedachami motorvagonnih poYizdIv: monografyya. Berdyansk, FO-PTkachuk O. V., 2014, 154 s.
8. Kulagin D. O. Matematichna model tyagovogo asinhronnogo dviguna z urahuvannyam nasichennya magnItnih kIl. *NaukoviyVIsnik NGU*, 2014, No 6, s. 103–110.
9. Kulagin D. O. Matematichna model tyagovogo asinhronnogo dviguna z urahuvannyam nasichennya. *TehnIchna elektrodinamIka*, 2014, No 6, PP. 49–55.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

*Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы, сводятся к решению системы нелинейных уравнений итерационным методом. Условия сходимости метода простых итераций в классической постановке обычно не выполняются при решении практических задач. Предложена модернизация метода простых итераций с одним весом и двумя весами. Подбор весовых коэффициентов позволяет значительно расширить область сходимости метода простых итераций. Показано, что использование метода простых итераций с двумя весами позволяет более существенно расширить область сходимости метода.*

**Ключевые слова:** итерационный процесс, метод простых итераций, нелинейные уравнения.

При моделировании электромагнитных процессов с помощью нелинейных магнитоэлектрических схем замещения в программном комплексе Colo [1] на каждом шаге интегрирования в подпрограмме Newton вычисляются нелинейные магнитные сопротивления. Вычисления производятся с помощью метода простой итерации. При использовании магнитоэлектрической цепи каждое нелинейное сопротивление на каждом шаге интегрирования заменяется либо парой элементов  $R_n$  и  $E_n$ , дифференциальным сопротивлением  $R_d$  либо дифференциальной емкостью  $C_m$  [2]. Для их вычисления на каждом шаге итерации используется характеристика намагничивания магнитопровода. При этом сходимость итерационного процесса в значительной степени зависит от того, как близко находится начальное приближение к истинному решению. В ряде случаев сходимость итерационного процесса вообще отсутствует, особенно при использовании стали с крутоизменяемой характеристикой намагничивания.

Целью данного исследования является модернизация метода простых итераций для улучшения сходимости итерационных процессов при решении системы нелинейных уравнений, описывающей электромагнитные процессы на произвольном шаге интегрирования.

Рассмотрим вначале одно нелинейное уравнение, приведенное к виду:

$$x = \varphi(x), \quad (1)$$

где  $x$  – некоторая переменная (ток, магнитный поток);  $\varphi$  – некоторая нелинейная функция.

Для решения этого уравнения методом простых итераций задают начальное приближение  $x_0$  и вычисляют дальнейшие приближения по формулам [3]:

$$x_{k+1} = \varphi(x_k), \quad k=0, 1, 2 \quad (2)$$

Если

$$|\varphi'(x)| > 1 \quad (3)$$

в некоторой окрестности истинного решения  $\bar{x}$ , то итерации могут не сходиться к истинному решению [3]. При моделировании переходных процессов в сложных нелинейных магнитоэлектрических цепях условие (3) как правило, выполняется и итерационный процесс расходится.

### Уточненный метод простых итераций с одним весом.

Предложен модифицированный алгоритм метода простых итераций, который имеет вид:

$$x_{k+1} = (1-W)\varphi(x_k) + Wx_k, \quad (4)$$

где  $W$  – некоторый весовой коэффициент.

Исследуем область сходимости модифицированного метода простых итераций в зависимости от значений  $W$  и производной  $j'(x)$ . Введем коэффициент конвергенции:

$$C = \frac{x_{k+1} - \bar{x}}{x_k - \bar{x}}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  – истинное решение.

Чтобы итерационный процесс сходил к истинному, чтобы коэффициент конвергенции по абсолютной величине был меньше единицы:  $|C| < 1$ , что означает, что отклонение  $k+1$  приближения от истинного решения  $\bar{x}$  меньше, чем отклонение  $k$ -го приближения.

Запишем отклонение  $k+1$  приближения:

$$x_{k+1} - \bar{x} = (1-W)[\varphi(x_k) - \varphi(\bar{x})] + Wx_k - W\bar{x}. \quad (6)$$

Согласно теореме о среднем

$$[\varphi(x_k) - \varphi(\bar{x})] = (x_k - \bar{x})\varphi'(\xi), \quad (7)$$

где  $\xi$  – точка между  $x_k$  и  $\bar{x}$ .

Если  $x_k$  и  $\bar{x}$  находятся близко, то  $\varphi'(x)$  изменяется незначительно на интервале  $[x_k, \bar{x}]$  и можно принять  $\varphi'(x) = d$ .

С учетом выражений (6) и (7) коэффициент конвергенции принимает вид:

$$C = (1-W)d + W, \quad (8)$$

а условие сходимости принимает вид:

$$|(1-W)d + W| < 1. \quad (9)$$

Условие (9) можно разбить на два условия:

$$0 < (1-W)d + W < 1; \quad (10')$$

$$0 < -(1-W)d - W < 1. \quad (10'')$$

Условие (10'') рассмотрим при различных значениях  $d$ .

При  $d < 1$  условие (10') приводит к следующему виду:

$$\frac{-d}{1-d} < W < 1. \quad (11)$$

При  $d > 1$  условие (10') приводит к виду:

$$1 < W < \frac{-d}{1-d}. \quad (12)$$

Условие (10'') преобразуем к виду:

$$-(1+d) < W(1-d) < -d$$

и рассмотрим при различных знаках  $d$ .

При  $d < 1$  условие (10'') приводит к следующему виду:

$$\frac{-(1+d)}{1-d} < W < \frac{-d}{1-d}. \quad (13)$$

При  $d > 1$  условие (10'') приводит к другому виду:

$$\frac{-d}{1-d} < W < \frac{-(1+d)}{1-d}. \quad (14)$$

Определим область сходимости:

$$\frac{1+d}{d-1} < W < 1 \text{ при } d < 1; \quad (15)$$

$$1 < W < \frac{1+d}{d-1} \text{ при } d > 1. \quad (16)$$

Если в условии (8) положить  $C = 0$ , то получим оптимальное значение веса, соответствующее наискорейшей сходимости:

$$W_{opt} = \frac{d}{d-1}. \quad (17)$$

Однако применение условия (17) требует вычисления нового значения производной на каждом шаге итерации, что приводит к тому, что такой модифицированный метод простых итераций становится модификацией метода Ньютона.

Условия сходимости (15, 16) можно преобразовать, чтобы получить область изменений  $d$  при заданном значении  $W$ :

$$1 < d < \frac{1+W}{W-1} \text{ при } W > 1; \quad (18)$$

$$\frac{1+W}{W-1} < d < 1 \text{ при } W < 1. \quad (19)$$

Условия (18, 19) позволяют расширить область сходимости метода простых итераций. Однако работа со сложными магнитоэлектрическими цепями приводит к большим системам нелинейных уравнений. При одном и том же весовом коэффициенте условие сходимости должно выполняться одновременно для всех уравнений, поэтому данный метод имеет ограниченное применение.

### Уточненный метод простых итераций с двумя весами.

Чтобы расширить диапазон сходимости итерационного процесса, предложена еще одна модификация метода простых итераций:

$$x_{k+1} = (1-W)\varphi(x_k) + W_1x_k + W_2x_{k-1}, \quad (20)$$

где  $W=W_1+W_2$ ;  $W_1, W_2$  – весовые коэффициенты.

Значения весовых коэффициентов определяют область сходимости итерационного процесса.

Запишем отклонение  $k+1$  приближения от истинного решения:

$$x_{k+1} - \bar{x} = (1-W)[\varphi(x_k) - \varphi(\bar{x})] - W\bar{x} + W_1x_k + W_2x_{k-1} \quad (21)$$

Применив теорему о среднем, из выражения (21) получим:

$$x_{k+1} - \bar{x} = (1-W)[(x_k - \bar{x})\varphi'(\xi)] - W\bar{x} + W_1x_k + W_2x_{k-1}$$

и при фиксированном значении  $\varphi'(x) = d$  коэффициент конвергенции на  $k+1$  шаге итерации примет вид:

$$C_{k+1} = \frac{x_{k+1} - \bar{x}}{x_k - \bar{x}} = (1-W)d + W_1 + \frac{W_2}{C_k}. \quad (22)$$

Условие сходимости запишем как:

$$\left| (1-W)d + W_1 + \frac{W_2}{C_k} \right| < 1 \quad (23)$$

Условие (23) можно разбить на два условия:

$$0 < (1-W)d + W_1 + \frac{W_2}{C_k} < 1; \quad (24')$$

$$0 < -(1-W)d - W_1 - \frac{W_2}{C_k} < 1. \quad (24'')$$

Условие (24') приводит к двум неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} -(1-W)d < W_1 + \frac{W_2}{C_k} \\ W_1 + \frac{W_2}{C_k} < 1 - (1-W)d \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Рассмотрим (25) при различных знаках  $W$ . При  $W < 1$  условие (25) приводит к следующему неравенству:

$$-\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k}}{1-W} < d < -\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k} - 1}{1-W}. \quad (26)$$

При  $W > 1$  условие (25) приводит к следующему неравенству:

$$-\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k} - 1}{1-W} < d < -\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k}}{1-W}. \quad (27)$$

Условие (24'') приводит к двум неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} (1-W)d < -W_1 - \frac{W_2}{C_k} \\ -W_1 - \frac{W_2}{C_k} - 1 < (1-W)d \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

При  $W < 1$

$$\frac{-W_1 - \frac{W_2}{C_k} - 1}{1 - W} < d < -\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k}}{1 - W}; \quad (29)$$

при  $W > 1$

$$\frac{-W_1 - \frac{W_2}{C_k}}{1 - W} < d < -\frac{W_1 + \frac{W_2}{C_k} + 1}{1 - W}. \quad (30)$$

Если считать, что на шаге  $k$  сходимости не было  $C_k=0$ , то для шага  $k+1$  условия сходимости имеют вид:

$$\begin{aligned} -\frac{W+1}{1-W} < d < 1 \quad \text{при } W < 1; \\ 1 < d < -\frac{W+1}{1-W} \quad \text{при } W > 1. \end{aligned} \quad (31)$$

Рассмотрим пример. Положим:

$$\varphi(I) = E + d \cdot I. \quad (32)$$

Решение уравнения (32) методом простых итераций возможно только при  $|d| < 1$ .

Использование модифицированного метода простых итераций с одним весом позволяет решать уравнение (32) и при  $|d| > 1$ .

Пусть  $d=10$ . Тогда согласно (16) сходимость должна выполняться при выборе веса в диапазоне  $1 < W < 11/9=1,222$ . Положим  $W=1,12$ , то есть в диапазоне сходимости. На рис. 1 представлен график изменения значений  $I_k$  от номера  $k$  итераций. Из рис. 1 видно, что итерационный процесс сходится, хотя весьма медленно. Если задать оптимальное значение веса согласно (17)  $W=10/9$ , то итерационный процесс сходится в течение двух циклов итераций, что показано на рис. 2.

Рассмотрим использование модифицированного метода простых итераций с двумя весами.

Пусть в уравнении (32)  $d=15$ . Положим  $W_1=1,3$ ;  $W_2=-0,2$ . Тогда согласно (30) сходимость выполняется, если  $1 < d < 21$ , то есть при  $d=15$  сходимость выполняется, что видно из рис. 3.

Если задать  $d=22$ , то сходимости не будет, что показывает график рис. 4.

### ВЫВОДЫ

Выбор весовых коэффициентов согласно (19, 30) позволяет существенно расширить область сходимости метода простых итераций. Это позволяет существенно выполнять численное интегрирование больших нелинейных систем уравнений состояния магнитоэлектрических схем замещения, в процессе которого на каждом шаге интегрирования итерационно вычисляются значения нелинейных магнитных сопротивлений.

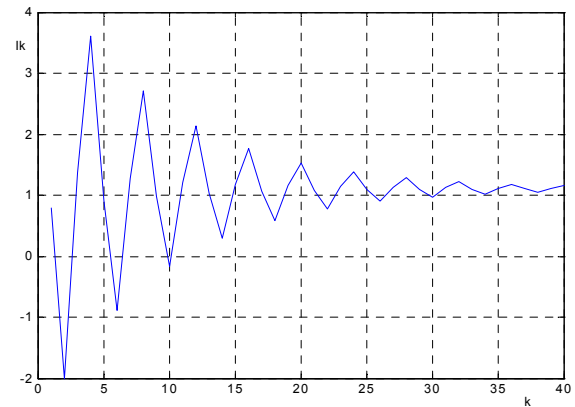


Рисунок 1 – График изменения вычисленных значений  $I_k$  от номера  $k$  итераций. Медленная сходимость итерационного процесса

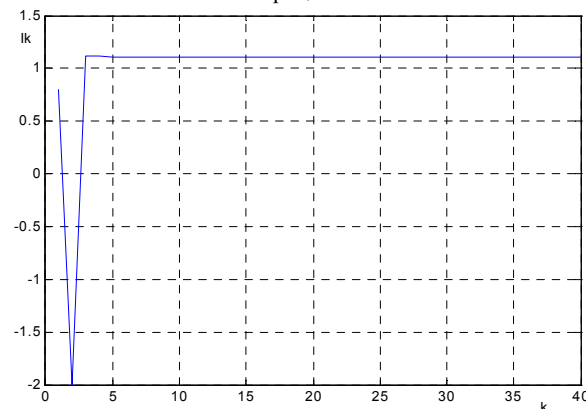


Рисунок 2 – График изменения вычисленных значений  $I_k$  от номера  $k$  итераций. Быстрая сходимость итерационного процесса при оптимальном весе

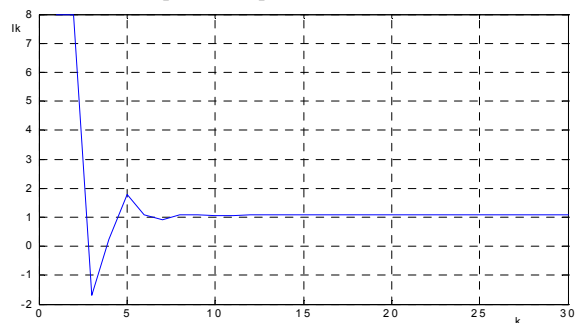


Рисунок 3 – График изменения вычисленных значений  $I_k$  от номера  $k$  итераций

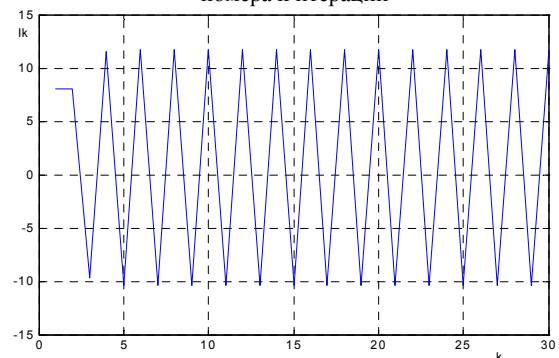


Рисунок 4 – График изменения вычисленных значений  $I_k$  от номера  $k$  итераций. Расходимость итерационного процесса



**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Тиховод С. М. Модифікація магнітоелектричних схем заміщення електромагнітних пристроїв для аналізу переходних процесів / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика . – 2015. – №2 . – С. 59–68.
2. Тиховод С. М. Модифікація магнітоелектричних схем заміщення електромагнітних пристроїв для

- анализа переходных процессов / С. М. Тиховод // Электричество . – 2014. – №2 . – С. 53–60.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512с.

*Статья поступила в редакцию 30.06.2015  
После доработки 8.09.2015*

Тиховод С. М.

Д-р техн. наук, Запорожский национальный технический университет, Украина

**УДОСКОНАЛЕННЯ ІТЕРАЦІЙНИХ МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ НЕЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ СТАНУ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАСТУПНИХ СХЕМ.**

*Числові методи інтегрування диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси, зводяться до розв'язання системи нелінійних рівнянь ітераційним методом. Умови збіжності методу простих ітерацій в класичній постановці зазвичай не виконуються при вирішенні практичних завдань. Запропонована модернізація методу простих ітерацій з одною вагою і двома вагами. Підбір вагових коефіцієнтів дозволяє значно розширити область збіжності методу простих ітерацій. Показано, що використання методу простих ітерацій з двома вагами дозволяє істотно розширити область збіжності методу.*

**Ключові слова:** ітераційний процес, метод простих ітерацій, нелінійні рівняння.

Tykhovod S. M.

Doctor of science, Zaporozhye national technical university, Ukraine

**IMPROVEMENT OF ITERATIVE METHODS OF THE NONLINEAR SYSTEMS SOLUTION OF STATE EQUATIONS OF MAGNETOELECTRIC EQUIVALENT SCHEMES**

*The numeral methods of integration of differential equations describing electromagnetic processes are reduced to solution of the system of nonlinear equations by an iterative method. The method of simple iterations for the classic presentation, i.e.,  $k=0, 1, 2, \dots$  is converged if, that usually is not executed at the solution of practical tasks. In capacity of convergence parameter of iterative process the factor of convergence  $C$  as ratio of deviation of approached solution from the true solution, obtained on the current step of iteration, to the corresponding deviation, got on the previous step of iteration, is put into operation. For convergence of iterative process it is necessary, that absolute value of convergence factor would be less than unit. It is offered modernization of simple iterations method with one and two weights for convergence at the condition. The selection of weight coefficients allows considerably extending an area of simple iterations method. It is shown that the use of offered method with two weights is more effective than one.*

**Keywords:** iterative process, method of simple iterations, nonlinear equations.

**REFERENCES**

1. Tihovod S. M. Modifikatsiya magnitoelektricheskikh shem zamesheniya elektromagnitnykh ustroystv dlya analiza perehodnykh protsessov. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2015, No 2. S. 59–68.
2. Tihovod S. M. Modifikatsiya magnitoelektricheskikh shem zamesheniya elektromagnitnykh ustroystv dlya analiza perehodnykh protsessov. *Elektrichestvo*, 2014, No 2, S. 53–60.
3. Kalitkin N. N. Chislennyye metody. Moscow, Nauka, 1978, 512 s.

## II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.13

Шкрабець Ф. П.<sup>1</sup>, Остапчук О. В.<sup>2</sup>, Кожевников А. В.<sup>3</sup>, Акулов А. В.<sup>4</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна, E-mail: ShcrabetsF@nmu.org.ua<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна<sup>4</sup>Асистент кафедри «Відновлюваних джерел енергії», Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ, Україна

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОГО РІВНЯ НАПРУГИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РОБОЧИХ ГОРИЗОНТІВ ГЛИБОКИХ ШАХТ

Виконано аналіз показників, що впливають на економічну доцільність застосування класу напруги 35 кВ для глибоких енергоємних шахт при їх реконструкції. Розроблено методу підрахунку економічної ефективності підземної системи електропостачання, вплив електроприймачів на економічність експлуатації, а також відзначена низька ефективність використання класу напруги 10 кВ для живлення глибоких горизонтів шахт.

**Ключові слова:** шахта, підземна система електропостачання капітальні та експлуатаційні витрати, клас напруги.

#### ВСТУП

Розвиток економічного потенціалу України нерозривно пов'язаний з ростом об'єму промислового виробництва, для якого необхідна наявність відповідної сировинної бази.

Вітчизняна гірничодобувна та вугільна промисловість завжди займали лідируючі позиції у формуванні ВВП країни. Останнім часом значне поглиблення існуючих гірничих виробок та постійне збільшення тарифів на електроенергію призводять до підвищення вартості кінцевого продукту і, як наслідок, зниження конкурентної спроможності та рентабельності роботи вітчизняних гірничих підприємств. Зазначені обставини примушують керівництво таких об'єктів застосовувати передовий закордонний досвід у технології видобутку корисних копалин. Проте на сьогоднішній день не існує єдиного підходу до перспектив розвитку гірничих підприємств (в першу чергу значної глибини виробок та енергоємності), як на етапі проектування так і реконструкції існуючого виробництва. Вагомим параметром, що чинить вплив на продуктивність та рентабельність гірничого підприємства є робота системи електропостачання підприємства (СЕП). Від правильного вибору та техніко-економічного порівняння запропонованих варіантів СЕП залежить надійність електропостачання, відповідна якість електроенергії та безпека обслуговуючого персоналу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для забезпечення вказаних факторів необхідно визначити оптимальний клас напруги підземної розподільної та дільничної мережі який визначається за формулами [1]:

*Німеччина.* За формулою Вейкерта, раціональний рівень напруги (кВ)

$$U = 3\sqrt{S} + 0,5l,$$

де  $S$  – потужність, що передається, МВА;  $l$  – відстань, км.

*США.* Використовується формула Стілла

$$U = 4,34\sqrt{l+16P},$$

де  $P$  – потужність, що передається, МВт;  $l$  – відстань, км.

Відповідний вираз був перетворений С. Н. Нікогосовим та набув широкого розповсюдження у вітчизняній практиці у вигляді

$$U = 16\sqrt[4]{Pl}.$$

*Швеція.* Використовується відповідна формула

$$U = 17\sqrt{\frac{l}{16} + P}.$$

Наведені вирази дозволяють досить наближено визначити значення оптимальної напруги, спираючись на дані потужності та довжини. Але також існує ряд інших факторів, що чинять суттєвий вплив на роботу гірничих підприємств. Крім того необхідно враховувати для якої ділянки СЕП будуть використанні відповідні вирази.

Питання, пов'язані з підвищенням існуючого рівня напруги дільничних мереж до 1120 В і навіть до 3000 В неодноразово розглядалися, як у роботах вітчизняних дослідників так і за кордоном. Відносно ж рівня напруги розподільної мережі у роботах [2–3] відмічена необхідність застосування рівня напруги 10–20 кВ для високовольтних мереж шахт, які будуються. Також існує точка зору переведення глибоких горизонтів енергоємних шахт на часткове використання класу напруги 35 кВ (стовбурні кабелі) за схемою «глибокого вводу» [4]. Проте, деякі дослідники [5], пропонують не змінювати існуючу ситуацію, через обмеженість номенклатури електрообладнання у відповідному виконанні напругою 10-35 кВ. Така велика кількість пропозицій склалася у першу

чергу через складність точної оцінки ряду факторів, що чинять вплив на правильність методики розрахунку техніко-економічних показників параметрів СЕП.

**Метою роботи** є техніко-економічне обґрунтування та розробка методики визначення оптимального рівня напруги високовольтної розподільної мережі глибоких енергоємних шахт.

**Матеріали досліджень.** Вибір оптимального рівня напруги розподільної мережі здійснюється у результаті техніко-економічного порівняння деяких варіантів. При виконанні відповідних досліджень, що направлені на оцінку факторів, які чинять вплив на вибір рівня напруги, необхідно вибрати шахту з усередненими показниками продуктивності, глибини виробок корисних копалин, водорясності тощо. При виконанні аналізу необхідно враховувати, що у якості робочої напруги доцільно використовувати наступний ряд 6, 10 та 35(110) кВ. Використання класу напруги 20 кВ, не є доцільним через відсутність необхідного обладнання вітчизняного виробництва (в першу чергу двигунів та трансформаторів).

Оцінка впливу «технічних факторів» до яких відноситься: якість напруги у споживачів підземної мережі, надійність схеми електропостачання, аналіз пропускної здатності відповідних розподільних мереж, були досить докладно розглянуті у роботі [6], тому аналіз необхідно виконати за економічними показниками, а саме: вартість основного обладнання у кожному з варіантів, вартість електричної енергії за класами напруги та її рівень втрат у елементах системи.

В умовах фінансової невизначеності досить складно виконувати планування тих чи інших технологічних процесів. Тому на етапі техніко-економічного обґрунтування для визначення найбільш оптимального класу напруги для підземної розподільної мережі доцільно використовувати методику визначення пропускної здатності діючих кабельних ліній. При зниженні показників якості електричної енергії більш за норму, робиться висновок про підвищення класу робочої напруги. Як уже було зазначено вище, використання класу напруги 10 кВ у якості основного для нових шахт отримало значну підтримку у 80-х роках минулого століття. Проте за останні роки ситуація змінилася в першу чергу через певні досягнення у виготовленні обладнання напругою 35 кВ, тому в певних випадках доцільно використовувати цей клас напруги.

В загальному випадку порівняльний аналіз вартості побудови та експлуатації розподільної мережі для декількох варіантів, виконується за формулою:

$$C_0 = K_{II} + B ;$$

де  $K_{II}$  – капіталовкладення, тис. грн.;  $B$  – витрати за період експлуатації.

Перша складова має на увазі витрати, що спрямовані на закупівлю основного електрообладнання (трансформатори, двигуни, кабельні лінії тощо), друга складова – об'єм та вартість електричних втрат у цих елементах.

Перша складова визначається за рекомендаціями [7], де вказано також укрупненні показники вартості обладнання. Для спорудження кабельних ліній, тис. грн./рік:

$$K_{KII_{кл}} = \left[ (E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i} L_i \right],$$

де  $E_H$  – норма дисконту, що дорівнює базовій процентній ставці НБУ (на 30.04.2015  $E_H = 30\%$ );  $P_a$  – відрахування на амортизацію (для кабельних ліній із зшитого поліетилену  $P_a = 5\%$ );  $L$  – довжина ліній, м;  $K_{0i}$  – капітальні витрати на спорудження 1 км кабельної лінії відповідної напруги, тис. грн.

З аналізу низки схем електропостачання існуючих підприємств можна зробити висновок про наявність на підстанції підприємства класу напруги 35 кВ та відсутності 10 кВ, тому при підвищенні напруги необхідно спорудження трансформаторної підстанції (модульного типу), як у першому, так і у другому варіанті. При застосуванні класу напруги 10 кВ, підстанція матиме загальнопромислове виконання, що сприятиме зниженню її вартості, проте для її розміщення необхідна певна територія. При використанні напруги 35 кВ – підстанція буде розташована в шахті, матиме спеціальне виконання, але за рахунок певних технічних рішень можливе зменшення вартості конструкції, через відмову від ввідних комір. Таким чином капітальні затрати на спорудженні підстанції у першому та другому випадках будуть приблизно однаковими та визначатимуться за формулою:

$$K_{KII_{mn}} = n_{mn} \left[ (E_H + P_a) K_{mn} \right],$$

де  $n_{mn}$  – кількість трансформаторних підстанцій відповідної напруги;  $K_{mn}$  – капітальні витрати на спорудження підстанції відповідної напруги, тис. грн.

Орієнтовна вартість втрат енергії у трансформаторах (грн./рік), визначається за формулою:

$$B_{TP.E.} = \left( \Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau \right) \cdot C ,$$

де  $\Delta P_{XX}$ ,  $\Delta P_{K3}$  – відповідно потужність неробочого ходу та короткого замикання трансформаторів, кВт;  $T_0$  – час експлуатації трансформатора впродовж року  $T_0 = 8760$ , год./рік;  $\tau$  – річний час максимальних втрат, год./рік;  $K_3$  – коефіцієнт завантаження трансформатора;  $C$  – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт\*год.

Втрати неробочого ходу та короткого замикання з достатньою точністю можна визначити використовуючи формули

$$\Delta P_{XX} = 0,4 + 0,16U_H + 213 \cdot 10^{-6} S_H ;$$

$$\Delta P_{K3} = 24 + \left( 585 \cdot 10^{-5} + 10^{-5} U_H \right) S_H ,$$

де  $S_n$  – номінальна потужність трансформатора, кВА;  
 $U_n$  – номінальна напруга трансформатора, кВ.

До високовольтних споживачів електричної енергії слід віднести трансформаторні підстанції та електричні приводи насосів, компресорів, підйомних установок тощо. Так як клас напруги 35 кВ застосовується тільки для стовбурних кабельних ліній, то подальше порівняння відбуватиметься для обладнання напругою 6 та 10 кВ.

В даний час на шахтах трифазні двигуни потужністю 200–250 кВт і вище обираються для класу напруги 6 кВ. Єдина серія трифазних двигунів передбачає їх виготовлення з номінальною напругою 10 кВ, починаючи з потужності 500 кВт. Оскільки при використанні напруги 660 В, двигуни можуть виготовлятися потужністю до 600–700 кВт, то в більшості випадків можна буде відмовитися від проміжної напруги 6 кВ, яку доводиться вводити в схеми електропостачання з напругою джерела живлення 10,5 кВ. Експлуатаційна вартість втрат високовольтних двигунів, грн./рік:

$$B_{ДВ} = (1 - \eta_{де}) \cdot W T_{макс} C,$$

де  $W$  – завантаження двигунів, кВт;  $T_{макс}$  – річне число використання максимуму навантаження, год./рік;  $\eta_{де}$  – коефіцієнт корисної дії двигунів, в. о.;  $C$  – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт\*год.

Отже, можна зробити висновок, що вартість втрат залежить в основному від показника ККД двигуна. Вартість електродвигунів з номінальною напругою 10 кВ на 20 % вища за вартість електродвигунів з номінальною напругою 6 кВ, ККД електродвигунів напругою 10 кВ в середньому на 1% менший ніж двигунів на 6 кВ. Стандартний ряд потужностей приводів на 10 кВ істотно менше ніж на 6 кВ. Внаслідок переведення двигунів з номінальною напругою 6 кВ двигуни потужністю до 300–350 кВт повинні бути замінені або (при нагоді) перемотані для роботи з номінальною напругою 380–660 В, а для живлення більш потужних двигунів потрібно встановити трансформатори 10/6 кВ.

Слід зазначити, що переведення мереж з 6 на 10 кВ полегшується тим, що трансформатори потужністю 630 кВА і вище з номінальною напругою 6 і 10 кВ виконуються так, що для переведення на напругу 10 кВ не потрібна заміна обмоток вищої напруги. Отже, переведення підземних розподільних мереж на напругу 10 кВ з погляду забезпечення живленням дільничних споживачів напругою до 1000 В практично не пов'язане з додатковими витратами, проте і не пов'язане з підвищенням ефективності саме цих ділянок системи електропостачання. Вказані заходи при переведенні на клас напруги 10 кВ пов'язані з додатковими витратами на придбання, монтаж і ремонт додаткових електроустановок і обладнання, у кожному конкретному випадку питання повинно роз-

в'язуватися шляхом техніко-економічних розрахунків з урахуванням місцевих умов і термінів отримання додаткового електрообладнання.

Останнім параметром підземної мережі є кабельні лінії, при їх виборі слід зауважити, що кабелі напругою 10 кВ дещо дешевші, але кабелі напругою 35 кВ потребують меншої кількості та перерізу жил.

Вартість втрат електричної енергії кабельних ліній, грн./рік:

$$B_{КЛ} = \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3},$$

де  $S$  – розрахункове навантаження, кВА;  $U$  – робоча напруга, кВ;  $L$  – довжина ліній, м;  $F$  – переріз жили кабелю, мм<sup>2</sup>;  $G$  – питома провідність жили кабелю, м/Ом\*мм<sup>2</sup>;  $k$  – кількість струмопровідних жил;  $C$  – вартість електроенергії за класами напруги, грн./кВт\*год. (для 1 класу (35 кВ) – 1,03 грн./кВт\*год., для 2 класу (6-10 кВ) – 1,25 грн./кВт\*год. без ПДВ) [8];  $\tau$  – річний час максимальних втрат, год./рік.

Для типових графіків навантаження час найбільших втрат:

$$\tau = (0,124 + T^{-4})^2 \cdot 8760,$$

де  $T$  – час використання максимального навантаження,  $T=5000$  год. [9].

З урахуванням вказаних припущень, вирази для визначення вартості на побудову та експлуатацію системи електропостачання відповідного класу напруги, матимуть вид: для класу напруги 6 кВ

$$C_{6\text{ кВ}} = \left[ (E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^6 L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right];$$

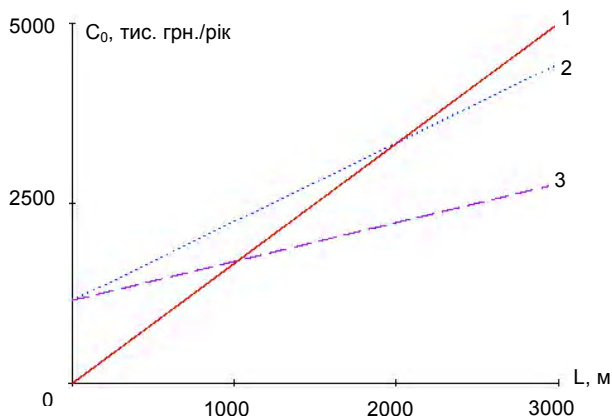
для класу напруги 10 кВ

$$C_{10\text{ кВ}} = \left[ (E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^{10} L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right] + n_{mn} \left[ (E_H + P_a) K_{mn} + (\Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau) \cdot C \right];$$

для класу напруги 35 кВ

$$C_{35\text{ кВ}} = \left[ (E_H + P_a) \sum_1^n K_{0i}^{35} L_i + \frac{S^2 L}{U^2 G k F} \tau C \cdot 10^{-3} \right] + n_{mn} \left[ (E_H + P_a) K_{mn} + (\Delta P_{XX} T_0 + \Delta P_{K3} K_3^2 \tau) \cdot C \right].$$

За наведеними виразами було виконано розрахунок вартості передачі електричної енергії споживачам відповідного горизонту (рис. 1).



**Рисунок 1** – Вартість побудови та експлуатації системи передачі електричної енергії при відповідному класі робочої напруги: 1 – клас напруги 6 кВ; 2 – клас напруги 10 кВ; 3 – клас напруги 35 кВ.

З графіка можна зробити висновок, що доцільність використання класу напруги 35 кВ виникає при глибині біля 1000 м та глибше, в залежності від рівня потужності, а доцільність використання класу напруги 10 кВ зовсім сумнівна, через низький ефект.

## ВИСНОВКИ

1. Вибір доцільного класу робочої напруги для передачі електричної енергії на відповідну глибину необхідно виконувати за техніко-економічними показниками. В цілому для шахти, переведення системи внутрішнього підземного електропостачання на напругу 10 кВ з позиції заміни приводів шахтних машин і установок є недоцільною.

2. Клас напруги 10 кВ недоцільно використовувати в умовах глибоких та енергоємних шахт при реконструкції системи електропостачання та переведенні на більш високий рівень напруги.

3. При реконструкції підземних систем електропостачання діючих підприємств в умовах постійного збільшення глибини виробок та навантаження доцільно стовбурні мережі довжиною більше 1000 м виконувати класом напруги 35 кВ, не змінюючи напруги розподільної мережі (6 кВ).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров; Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Энергия, 1972. – 416 с. ил.
2. Marinovic N. Electrotechnology in Mining / N. Marinovic; Rudarska elektrotehnika. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1990. – 613 p.
3. Шишкин Н. Ф. Основне направления электрификации современных шахт / Н. Ф. Шишкин, В. Ф. Антонов // М.: Наука, 1981. – 116 с.
4. Шкрабець Ф. П. Електропостачання глибоких і енергоємних рудних та вугільних шахт: монографія / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук; Мін-во освіти та науки України; Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2014. – 160 с.
5. Пивняк Г. Г. Перспективы повышения номинальных напряжений электрической сети в системе электроснабжения угольных шахт. / Г. Г. Пивняк, Ю. Т. Разумный, А. В. Рухлов // Энергосбережение, Донецк, – 2008. – № 3. – С. 9–11.
6. Шкрабець Ф. П. Технічні аспекти виконання систем електропостачання глибоких енергоємних шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 1 (27), 2014. – С. 162–176.
7. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику. Энергосистемы и электрические сети: ГКД 340.000.002-97: Утверждены приказом Минэнерго Украины от 20.01.97 № 1ПС и введены в действие с 01.01.98. – Киев, 1997. – 54 с.
8. Постанова НКРЕКП України від 25.11.2014 № 380.
9. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик. – М.: Минтопэнерго РФ, 1993. – 115 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2015

Після доробки 10.06.2015

Шкрабець Ф. П.<sup>1</sup>, Остапчук А. В.<sup>2</sup>, Кожевников А. В.<sup>3</sup>, Акулов А. В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

<sup>4</sup>Ассистент кафедры «Возобновляемых источников энергии», Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАБОЧИХ ГОРИЗОНТОВ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Выполнен анализ показателей, влияющих на экономическую целесообразность применения класса напряжения 35 кВ для глубоких энергоёмких шахт при их реконструкции. Разработана методика подсчета экономической эффективности подземной системы электроснабжения, влияние электроприемников на экономич-

ность эксплуатации, а также отмечена низкая эффективность использования класса напряжения 10 кВ для питания глубоких горизонтов шахт.

**Ключевые слова:** шахта, подземная система электроснабжения капитальные и эксплуатационные затраты, класс напряжения.

Shkrabets F. P.<sup>1</sup>, Ostapchuk O. V.<sup>2</sup>, Kozhevnikov A. V.<sup>3</sup>, Akulov A. V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Head of the department of renewable energy sources, State Higher Educational Institution «National Mining University», Doctor of Technical Sciences, Professor

<sup>2</sup>Assistant professor of renewable energy sources department, State Higher Educational Institution «National Mining University», Ph.D.

<sup>3</sup>Assistant professor of Automation and Computer Systems department, State Higher Educational Institution «National Mining University», Ph.D

<sup>4</sup>Assistant of renewable energy sources department, State Higher Educational Institution «National Mining University»

**TECHNICAL AND ECONOMIC EVALUATION OF OPTIMAL VOLTAGE LEVEL FOR THE POWER SUPPLY OF DEEP MINE OPERATING HORIZONS**

*The most perspective option for possible deep mine power supply is the one with the deep input of 35 kV voltage by installing of underground 35kV/6 kV substation. This option is caused by the expected level of electrical loads, provided by mine development, the power consumers' deep layout (considering the distance from the source to the shaft on the surface and from the shaft to the underground substation chamber) and primary and the most responsible power consumers (blind shaft lifting devices, drives of water pumping facilities) near-shaft concentration. Furthermore, this option provides further mine development and excludes the impact (and connection in an ordinary operation mode) of existing underground mine power supply system. This option is the most appropriate in terms of economic efficiency in the deep mines reconstruction (effectiveness observed at a depth of 1000 m), also the 6 kV voltage class implementation inexpedience for the shown conditions is noticed. The economic operation efficiency of the main electric equipment types of 6 and 10 kV voltage classes is determined, the impact indexes on their work efficiency are noted.*

**Key words:** mine, underground power supply system, capital and operating costs, voltage class.

REFERENCES

1. Fedorov A. A. Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Izd. 2-epererab. idop. Moscow, Energiya, 1972, 416 s.
2. Marinovic N. Electrotechnology in Mining. Rudarska elektrotehnika, Amsterdam. Elsevier Science Publishers B.V., 1990, 613 p.
3. Shishkin N. F. Osnovnyie napravleniya elektrifikatsii sovremennykh shah. Moscow, Nauka, 1981, 116 s.
4. Shkrabets F. P., Ostapchuk O.V. Elektropostachannya glibokikh I energoEmnih rudnih ta vuglnih shaht: monograflya. MIn-voosvIti ta naukiUkraYini; Nats. gIrn. un-t, NGU, 2014, 160 s.
5. Pivnyak G. G., Razumnyiy Yu. T., Ruhlov A.V. Perspektivy povyisheniya nominalnykh napryazheniy elektricheskoy seti v sisteme elektrosnabzheniya ugolnykh shaht. Energoberezhnie, Donetsk, 2008, No 3, S. 9–11.
6. Shkrabets F. P., Ostapchuk O. V. Tehnichni aspekti vikonannya system elektropostachannya glibokikh energoEmnih shaht. *NaukovI pratsI Donetskogo natsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu. SerIya: «Glrnicho-elektromehanIchna»*. Vipusk 1 (27), 2014, S. 162–176.
7. Metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti kapitalnykh vlozheniy v energetiku. Energosistemyi I elektricheskieset: GKD 340.000.002-97: Utverzhdennyi prikazom Minenergo Ukrainyi ot 20.01.97 #1PS I vvvedenyi v deystvie s 01.01.98, Kiev, 1997, 54 s.
8. Postanova NKREKP UkraYinivId 25.11.2014 #380.
9. Instruktsiya po proektirovaniyu elektroustanovok ugolnykh shaht, razrezov, obogatitelnykh I briketnykh fabric, Moscow, Mintopenergo RF, 1993, 115 s.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПУСКА ГИДРОАГРЕГАТА ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В НАСОСНОМ РЕЖИМЕ

*Выполнен анализ существующих способов пуска гидроагрегатов в насосном режиме на гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС). Усовершенствован частотный способ пуска гидроагрегата в насосном режиме от соседнего гидроагрегата, работающего в генераторном режиме. Разработана математическая модель усовершенствованного способа данного пуска гидроагрегата. На основе указанной математической модели создана имитационная компьютерная модель, посредством которой исследованы электромагнитные и механические процессы частотного пуска применительно к гидроагрегатам, установленным на Киевской ГАЭС.*

**Ключевые слова:** гидроагрегат, пуск, насосный режим, система автоматического управления, моделирование электромеханических процессов.

В последние годы в Украине и во всем мире уделяется большое внимание строительству новых гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) или вводу дополнительных мощностей на действующих из них. Это обусловлено острой потребностью энергосистем всех стран в компенсации пиковых значений потребляемых и генерируемых электрических мощностей, которая осуществляется посредством ГАЭС. Однако до настоящего времени остаются недостаточно исследованными и несовершенными режимы плавного пуска гидроагрегатов ГАЭС в насосном режиме.

При этом на практике на ныне действующих отечественных и зарубежных ГАЭС используются разнообразные способы пуска гидроагрегатов (ГА) в насосном режиме, но всем известным способам присущи свои достоинства и недостатки. В частности, при наиболее технически простом способе прямого асинхронного пуска (без возбуждения) возникают огромные пусковые токи, приводящие к преждевременному износу ГА и ухудшению качества напряжения энергосистемы [1, 2]. При использовании реакторного или трансформаторного способов асинхронного пуска удается примерно в два раза уменьшить пусковые токи ГА и продлить за счет этого сроки их эксплуатации, но при этом увеличивается продолжительность пуска ГА и одновременно требуется установка дополнительного пускового электрооборудования (реакторов, шунтирующих выключателей, автотрансформаторов) [3].

При способе пуска ГА с использованием дополнительного разгонного двигателя в качестве последнего обычно применяется асинхронный двигатель с фазным ротором, соединенный своим валом с валом ГА. При этом разгонный двигатель пускается от сети с применением реостата или выпрямителя, подсоединяемых в цепь обмотки ротора [4]. Мощность разгонного двигателя обычно не превышает 10% от установленной мощности пускаемого ГА [4]. Наряду с технической эффективнос-

тью способа пуска ГА с использованием дополнительного разгонного двигателя, этому способу присущ недостаток, связанный с необходимостью установки дополнительной (разгонной) электрической машины, которая требуется только для осуществления пуска ГА в насосном режиме (а всё остальное время в ней нет необходимости). В некоторых случаях в качестве разгонного двигателя может быть использован электромашинный возбудитель или дополнительный синхронный генератор, установленный на валу гидроагрегата [4].

В последнее время для пуска ГА в насосном режиме всё чаще стал применяться частотный способ управления, который на практике осуществляется в двух видах: от статического преобразователя частоты (СПЧ) или от соседнего гидрогенератора, установленного на данной ГАЭС. Первый из упомянутых вид реализации частотного пуска позволяет обеспечить минимальные пусковые токи, увеличить сроки службы ГА в эксплуатации и минимизировать влияние пускового режима гидроагрегата на качество сетевого напряжения. Однако этому способу присущ такой существенный недостаток, как высокая стоимость СПЧ (который функционирует фактически только при пуске ГА в насосном режиме).

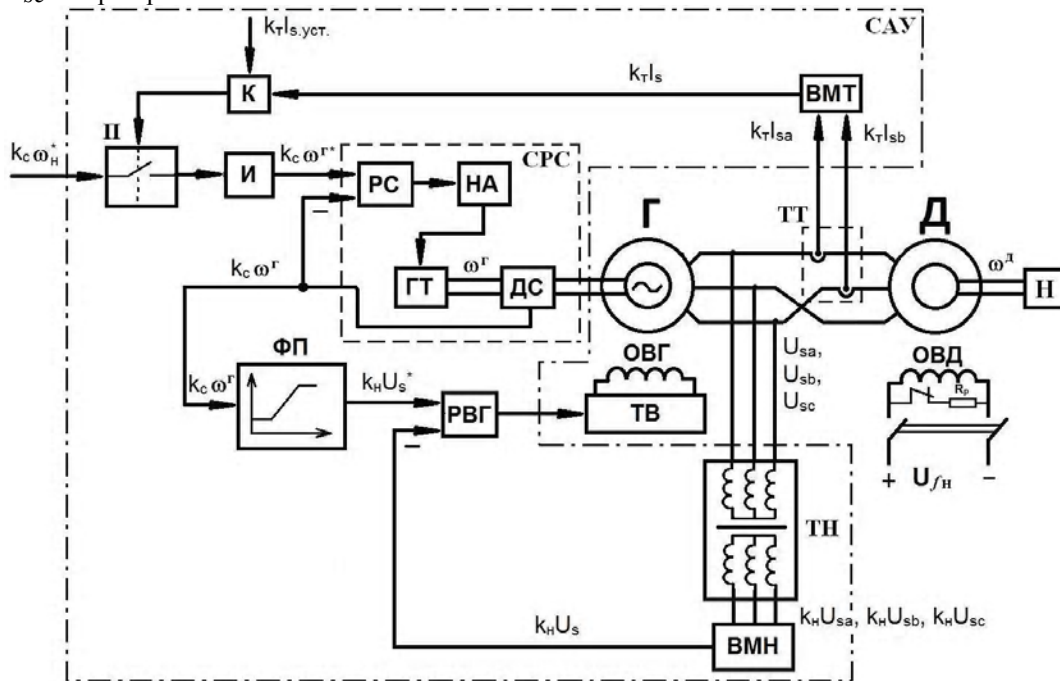
При втором (более дешевом) виде реализации частотного управления ГА при пуске не требуется применение СПЧ, так как его функцию выполняет один из соседних гидроагрегатов ГАЭС, работающий в генераторном режиме с переменными частотой и амплитудой статорных напряжений. Этот вид частотного пуска за рубежом называют «back-to-back», что в переводе с английского языка означает «спина к спине» [4–6]. Несмотря на то, что использование последнего способа реализации частотного управления в последние годы расширяется, широкое его применение сдерживается происходящими при этом способе заметными бросками пускового тока и колебаниями электромагнитного момента ГА, которые на практике приводят к преждевременному износу последнего и ухудшают качество напряжения энергосистемы [5, 7].

Цель предлагаемой статьи – совершенствование частотного пуска гидроагрегата в насосном режиме способом от соседнего ГА и исследование методом компьютерного моделирования полученных при этом электро-механических процессов.

На рис. 1 приведена функциональная схема частотного пуска синхронного двигателя Д в насосном режиме от синхронного генератора Г соседнего гидроагрегата. В данной схеме фазные статорные обмотки синхронных машин (СМ), работающих в режиме генератора Г и двигателя Д, соединены между собой. При пуске посредством системы автоматического управления (САУ) плавно открывается направляющий аппарат НА, постепенно увеличивая расход воды через гидротурбину ГТ и обеспечивая этим плавное (близкое к линейному закону) изменение ее скорости  $\omega^Г$  (а также механически связанного с ней генератора Г) от нуля до номинального (синхронного) значения  $\omega^Н$ . С помощью пропорционально-интегрального-дифференциального регулятора возбуждения генератора РВГ (воздействующего через тиристорный возбудитель ТВ на обмотку возбуждения генератора ОВГ) осуществляется примерно прямо пропорционально скорости  $\omega^Г$  генератора Г изменение частоты фазных статорных напряжений  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$  генератора Г.

На первом этапе предложено (в отличие от известных схем реализации частотного управления от соседнего ГА) в схеме на рис. 1: во-первых, начальное (перед пуском в течение 20 с на частоте, равной 1,5 Гц) насыщение магнитным потоком двигателя Д, что достигается путем задания от функционального преобразователя ФП минимального ограничения амплитуды фазного напряжения генератора Г (на уровне 3% от его номинального напряжения). Во-вторых, – предложена автоматическая корректировка изменения скорости генератора Г (достигаемая с помощью компаратора К, прерывателя П и интегратора И), за счет которой обеспечивается ограничение пусковых статорных токов генератора Г и двигателя Д (на уровне  $I_s$ , уст, не превышающем двукратного от номинального значения токов для этих СМ) и одновременно бросков указанных токов и электромагнитного момента двигателя Д в режиме пуска.

При этом мгновенные значения модулей  $U_s$  и  $I_s$  статорных напряжений и токов  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  синхронных машин Г и Д предложено определять посредством вычислителей модуля напряжения ВМН и модуля тока ВМТ из соотношений [8, 9]:



**Рисунок 1** – Функциональная схема системы автоматического управления частотным пуском синхронного двигателя от соседнего гидроагрегата ГАЭС

(Г – синхронный генератор; Д – синхронный двигатель; ГТ – гидротурбина; Н – насос; НА – направляющий аппарат; ОВГ – обмотка возбуждения генератора; ТВ – тиристорный возбудитель; ОВД – обмотка возбуждения двигателя; ТН – измерительный трансформатор напряжения; ТТ – измерительные трансформаторы тока; ВМН – вычислитель модуля напряжения; ВМТ – вычислитель модуля тока; СРС – система регулирования скорости; РС – регулятор скорости; РВГ – регулятор возбуждения генератора; К – компаратор; П – прерыватель; И – интегратор; ДС – датчик скорости; ФП – функциональный преобразователь;  $R_p$  – разрядный резистор;  $k_T, k_n, k_c$  – передаточные коэффициенты датчиков тока, напряжения и скорости соответственно)



$$\left. \begin{aligned} U_s &= [(U_{sa})^2 + (U_{sb} - U_{sc})^2 / 3]^{1/2}, \\ I_s &= [(I_{sa})^2 + (I_{sa} + 2I_{sb})^2 / 3]^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

в результате чего повышаются быстродействие и точность этих измерений.

На *втором этапе* разработана математическая модель электротехнического комплекса с САУ, показанной схемой на рис. 1. Заданы общепринятые исходные допущения при математическом описании трехфазных СМ [8]:

- фазные статорные обмотки симметричны и одинаковы;
- пространственное распределение магнитных полей фазных статорных обмоток – синусоидальное;
- не учитываются электромагнитные потери в стали, вызванные перемагничиванием сердечника и вихревыми токами;
- воздушный зазор между статором и ротором полагается равномерным;
- не учитывается нелинейность кривой намагничивания машины.

Указанные допущения соответствуют математической модели СМ, которая выполнена во вращающейся ортогональной системе «d–q» с использованием общепринятой системы относительных единиц [10]. Принимая во внимание идентичность параметров синхронных машин Г и Д и исходя из равенства соответствующих

проекций статорных напряжений этих машин (при пренебрежении малыми падениями напряжений на кабелях, соединяющих их статорные обмотки):

$$\left. \begin{aligned} u_d^\Gamma &= u_d^\Delta = u_d, \\ u_q^\Gamma &= u_q^\Delta = u_q \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

разработаем математическую модель для электротехнического комплекса с САУ, показанную на рис. 1.

Данная общая модель содержит три составные части: модели синхронного генератора Г, синхронного двигателя Д и системы автоматического управления (система регулирования скорости СРС, функциональный преобразователь ФП, регулятор возбуждения генератора РВГ и ранее упомянутая система автоматической корректировки изменения скорости генератора).

С учетом [10] разработаны математические модели: система (3) – для синхронного генератора (с тиристорным возбудителем ТВ); система (4) – для синхронного двигателя Д. В зависимостях (3) и (4) используются следующие обозначения:  $\omega$  – частота вращения ротора машины;  $\mu$  – электромагнитный момент машины;  $\mu_c$  – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя (который задавался при пуске насоса с закрытой задвижкой равным нулю);  $J$  – момент инерции гидроагрегата, приведенный к валу двигателя;  $s$  – скольжение;  $\Theta_{окс}^*$  – аргумент (угол поворота относительно непод-

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d}{dt} \Psi_d^\Gamma + (1 + s^\Gamma) \Psi_q^\Gamma + i_d R_s; \\ u_q &= \frac{d}{dt} \Psi_q^\Gamma - (1 + s^\Gamma) \Psi_d^\Gamma + i_q R_s; \\ u_f^\Gamma &= \frac{d}{dt} \Psi_f^\Gamma + i_f^\Gamma R_f; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta d}^\Gamma + i_{\Delta d}^\Gamma R_{\Delta d}; \\ \Psi_d^\Gamma &= i_d x_d + i_f^\Gamma x_{ad} + i_{\Delta d}^\Gamma x_{ad}; \\ \Psi_q^\Gamma &= i_q x_q + i_{\Delta q}^\Gamma x_{aq}; \\ \Psi_f^\Gamma &= i_d x_{ad} + i_f^\Gamma x_f + i_{\Delta q}^\Gamma x_{ad}; \\ \Psi_{\Delta d}^\Gamma &= i_d x_{ad} + i_f^\Gamma x_{ad} + i_{\Delta d}^\Gamma x_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta q}^\Gamma &= i_q x_{aq} + i_{\Delta q}^\Gamma x_{aq}; \\ \mu^\Gamma &= \Psi_d^\Gamma i_q - \Psi_q^\Gamma i_d; \\ \omega^\Gamma &= 1 + s^\Gamma; \\ \Theta_{окс}^* &= \int_0^t \omega^\Gamma dt - 2\pi \left[ \left( \int_0^t \omega^\Gamma dt \right) / 2\pi \right]^*; \\ u_f^\Gamma + T_\sigma \cdot \frac{du_f^\Gamma}{dt} &= k_\sigma u_{РВГ} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d}{dt} \Psi_d^\Delta + (1 + s^\Delta) \Psi_q^\Delta + i_d R_s; \\ u_q &= \frac{d}{dt} \Psi_q^\Delta - (1 + s^\Delta) \Psi_d^\Delta + i_q R_s; \\ u_f^\Delta &= \frac{d}{dt} \Psi_f^\Delta + i_f^\Delta R_f; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta d}^\Delta + i_{\Delta d}^\Delta R_{\Delta d}; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta q}^\Delta + i_{\Delta q}^\Delta R_{\Delta q}; \\ \Psi_d^\Delta &= i_d x_d + i_f^\Delta x_{ad} + i_{\Delta d}^\Delta x_{ad}; \\ \Psi_q^\Delta &= i_q x_q + i_{\Delta q}^\Delta x_{aq}; \\ \Psi_f^\Delta &= i_d x_{ad} + i_f^\Delta x_f + i_{\Delta q}^\Delta x_{ad}; \\ \Psi_{\Delta d}^\Delta &= i_d x_{ad} + i_f^\Delta x_{ad} + i_{\Delta d}^\Delta x_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta q}^\Delta &= i_q x_{aq} + i_{\Delta q}^\Delta x_{aq}; \\ \mu &= \Psi_d^\Delta i_q - \Psi_q^\Delta i_d; \\ \mu - \mu_c &= J \frac{d\omega^\Delta}{dt}; \\ \omega^\Delta &= 1 + s^\Delta; \\ u_f &= u_{f\Delta} = const \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

вижной геометрической оси обмотки фазы А статора) вращающейся ортогональной координатной системы (ОКС) «d-q», совмещенной действительной осью «d» с осью магнитного поля статора СМ; [ ]\* – математическая операция выделения наибольшей целой части числа;  $u_d, u_q$  и  $i_d, i_q$  – проекции обобщенных векторов статорного соответственно напряжения и тока на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $\Psi_d, \Psi_q$  – проекции обобщенного вектора потокосцепления статора на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $\Psi_f$  – потокосцепление обмотки возбуждения;  $\Psi_{dd}, \Psi_{dq}$  – проекции обобщенного вектора потокосцепления демпферных обмоток на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $R_s$  – активное сопротивление фазной статорной обмотки;  $R_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;  $R_{dd}, R_{dq}$  – активные сопротивления демпферных обмоток по осям «d» и «q»;  $X_d, X_q$  – полные индуктивные сопротивления по осям «d» и «q»;  $x_{ad}, x_{aq}$  – сопротивления взаимной индукции по осям «d» и «q»;  $u_{pвг}$  – выходной сигнал регулятора возбуждения генератора РВГ;  $k_c$  и  $T_c$  – передаточный коэффициент и постоянная времени тиристорного возбудителя ТВ (принятые равными 0,06 и 0,01 с соответственно);  $u_{фн}$  – номинальное напряжение возбуждения. При этом в системах (3) и (4) одноименные величины синхронной машины, относящиеся к режиму двигателя и генератора, обозначаются индексом (сверху): «д» или «г» соответственно.

Приведем разработанную математическую модель САУ:

$$\left. \begin{aligned} \omega^{\Gamma*} &= \omega^{\Gamma} + T_c \frac{d\omega^{\Gamma}}{dt}, \\ u_{pвг} &= k_H \left[ k_1 (U_s^* - U_s) + k_2 \frac{d(U_s^* - U_s)}{dt} + k_3 \int (U_s^* - U_s) dt \right], \\ k_H U_s^* &= K \cdot k_c \omega^*, \text{ где} \\ K &= k_H U_{сн} / k_c \omega_H, \\ k_H U_{сн} &\leq k_H U_s^* \leq k_H U_{сн} \end{aligned} \right\} (5)$$

где из приведенных зависимостей: первая описывает систему регулирования скорости СРС [11], вторая – регулятор возбуждения генератора РВГ, а третья, четвертая и пятая – функциональный преобразователь ФП. В схеме САУ на рис. 1 при превышении на входе компаратора К фактическим значением модуля тока  $k_T I_s$  значения уставки  $k_T I_{с.уст}$  контакт прерывателя П размыкается и вход интегратора И отключается от входного сигнала (в результате чего выходной сигнал интегратора И становится неизменным). Когда же:  $k_T I_s \leq k_T I_{с.уст}$ , то указанный контакт прерывателя П замыкается и на выходе интегратора И продолжается возрастание при пуске выходного сигнала, приводящее к увеличению скорости  $\omega^{\Gamma}$  генератора Г и одновременно – к пропорциональному росту модуля его статорного напряжения  $U_s$ .

В зависимостях (5) используются следующие обозначения:  $\omega^{\Gamma*}$  – заданное значение скорости генератора Г;

$k_c$  и  $T_c$  – передаточный коэффициент и постоянная времени (принятая равной 1,6 с) системы регулирования скорости СРС [11];  $k_1, k_2$  и  $k_3$  – коэффициенты для пропорциональной, дифференциальной и интегральной части регулятора возбуждения генератора РВГ;  $U_{с.мин}$  и  $U_{сн}$  – соответственно минимальное и номинальное значения модуля статорного напряжения.

Для перевода из относительной в абсолютную систему единиц фазных статорных напряжений  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$  и токов  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ , модуля статорного потокосцепления  $\Psi$  и электромагнитного момента  $M$  двигателя применялись следующие зависимости [9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= U_{\sigma} \cdot [u_d^2 + u_q^2]^{1/2}, \\ \Delta\varphi_u &= (\sin u_d) \cdot \arcsin \left[ \frac{u_q}{(u_d^2 + u_q^2)^{1/2}} \right] + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign } u_d), \\ U_{sa} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u), \\ U_{sb} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u - 2\pi/3), \\ U_{sc} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u + 2\pi/3), \\ I_s &= I_{\sigma} \cdot [i_d^2 + i_q^2]^{1/2}, \\ \Delta\varphi_I &= (\sin i_d) \cdot \arcsin \left[ \frac{i_q}{(i_d^2 + i_q^2)^{1/2}} \right] + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign } i_d), \\ I_{sa} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I), \\ I_{sb} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I - 2\pi/3), \\ I_{sc} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I + 2\pi/3), \\ \Psi &= \Psi_{\sigma} \cdot [(\Psi_d^d)^2 + (\Psi_q^d)^2]^{1/2}, \\ M &= M_{\sigma} \cdot \mu \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $U_{\sigma}, I_{\sigma}, \Psi_{\sigma}$  и  $M_{\sigma}$  – базисные значения для статорных напряжения, тока, потокосцепления и электромагнитного момента синхронной машины.

На *третьем этапе* с использованием зависимостей (1) – (6) и применением метода Рунге-Кутты была разработана имитационная (компьютерная) модель электро-технического комплекса с САУ из рис. 1, а затем на этой модели проведены исследования электромагнитных и механических процессов пуска двигателя Д.

При моделировании выбраны параметры явнополюсных синхронных машин, входящих в состав гидрогенераторов-двигателей типа СВО-733/130-36, установленных на Киевской ГАЭС (их основные технические характеристики приведены в табл. 1). Результаты моделирования электромагнитных и механических процессов частотного пуска гидроагрегата (способом от соседнего гидроагрегата согласно схеме на рис. 1) в насосном режиме представлены на рис. 2. На данных временных диаграммах показаны изменения: скорости  $\omega^{\Gamma}$ , модуля статорного потокосцепления  $\Psi$ , фазных статорных тока  $I_{sa}$  и напряжения  $U_{sa}$ . При этом следующим временным

участкам соответствует: (0 – 20) с – режим начального магнитного насыщения двигателя; (20–70) с – режим разгона двигателя на холостом ходу (при закрытой задвижке насоса Н) до синхронной скорости. Полученные электромеханические процессы свидетельствуют о плав-

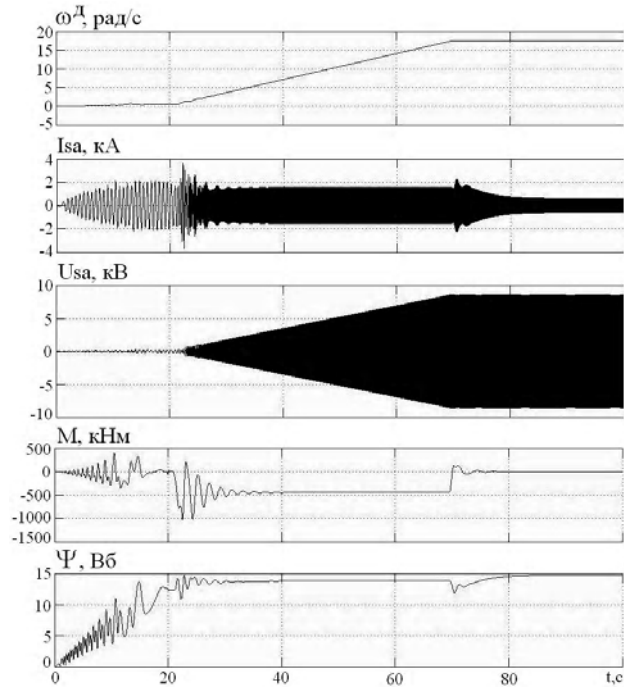


Рисунок 2 – Результаты моделирования пуска синхронной машины в насосном режиме способом частотного пуска от соседнего гидроагрегата

ном характере изменения скорости при пуске в основной части скоростного диапазона и наличии лишь небольших колебаний (бросков) фазного статорного тока и электромагнитного момента двигателя при начале пуска (не превышающих значений соответственно 3,8 кА и 1000 кНм).

Для сравнения на рис. 3 приведены результаты моделирования электромагнитных и механических процессов того же гидроагрегата при прямом асинхронном (без возбуждения) пуске в насосном режиме (именно этот способ пуска в настоящее время используется на Киевской ГАЭС). В этом режиме наблюдаются увеличенные значения статорных фазных токов и электромагнитного момента двигателя (достигающих значений соответственно 15 кА и 6600 кНм).

### ВЫВОДЫ

1. Разработанные математическая и имитационная модели позволяют рассчитывать электромагнитные и механические процессы частотного пуска гидроагрегата в насосном режиме, получающего питание от соседнего гидроагрегата.

2. Результаты моделирования указанного режима подтверждают достигнутое (путем начального магнитного насыщения синхронного двигателя и автоматической коррекции его темпа разгона) отсутствие увеличенных бросков статорных токов и электромагнитного момента в пусковом режиме (в отличие от прямого пуска). Качество полученных при этом электромеханических процессов приближается к стандартным процессам частотного пуска от статического преобразователя частоты.

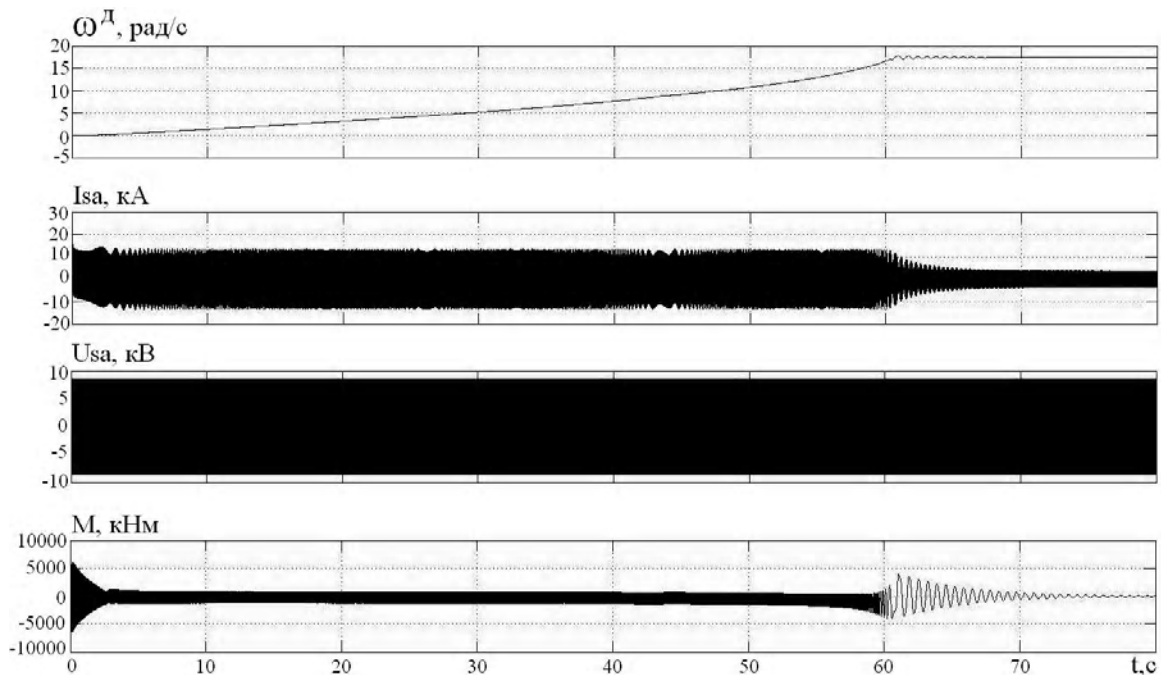


Рисунок 3 – Результаты моделирования прямого асинхронного (без возбуждения) пуска синхронной машины в насосном режиме

Таблица 1 – Параметры генератора-двигателя типа СВО-733/130-36

Основные технические характеристики синхронной машины	Численные значения	
	Генераторный режим	Режим двигателя
Номинальная мощность СМ: полная, кВ·А активная, кВт	45600 33400	45600 40000
Номинальное напряжение, В	10500±5%	10000±10%
Номинальный ток статора, А	2510	2635
Номинальный коэффициент мощности, cos φ	0,733	0,9
Частота тока, Гц	50	50
Номинальная частота вращения, об/мин.	166,7	166,7
Число пар полюсов	18	
Маховый момент ротора гидроагрегата, т·м <sup>2</sup>	5100	
Ток возбуждения на холостом ходу, А	597	547
Номинальный ток возбуждения, А	1220	1000
Номинальное напряжение возбуждения, В	212	174
Сопротивление фазы обмотки статора при постоянном токе и температуре плюс 15°С, Ом	0,00575	
Сопротивление фазы обмотки возбуждения при постоянном токе и температуре плюс 15°С, Ом	0,118	
Индуктивности, мГн: – синхронная по продольной оси ( $L_d$ ) – синхронная по поперечной оси ( $L_q$ ) – обмотки возбуждения ( $L_f$ )  – демпферной обмотки по продольной оси ( $L_{dd}$ ) – демпферной обмотки по поперечной оси ( $L_{dq}$ ) – взаимоиндуктивности по продольной оси ( $L_{ad}$ ) – взаимоиндуктивности по поперечной оси ( $L_{aq}$ )	8,770 7,438 8,489  7,5898 6,8035 7,0990 5,767	
Отношение максимального синхронного момента к номинальному синхронному		2,9

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Muraffer G. Asynchronanlauf einer grossen 230 MW Synchro-maschine im Pumpspeicherwerk Vianden II / G. Muraffer // Brown Boveri Mitt. – 1974. – №7. – PP. 10–15.
- Lehuen C., Asynchronous starting of motor-generators of pumped storage stations / C. Lehuen, G. Ruelle, D. Simonnot // CIGRE. – 1972. – PP. 7–12.
- Электрическая часть электростанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Усова С.В. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616с.
- Синюгин В. Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике / В. Ю. Синюгин, В. И. Магрук, В. Г. Родионов. – М. : ЭНАС, 2008. – 352 с.
- Xiao S., The coordination of Back-to-back starting and protections for pumped storage units / S. Xiao // North China Electric Power University, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, Beijing, China; Liu Jianhui, Kang Xiaojuan. – 2012. – PP. 1–4.
- Ma W. Discussion on the Control of Reversible Pumped-storage Unit Starting in Back-to-back Mode / W. Ma, X. Zhang // Hydropower Automation and Dam Monitoring. – Vol. 33. – Oct. 2009. – PP. 33–37.
- Karaagac U. Modeling and Simulation of the Starup of Pumped Storage Power Plant Unit / U. Karaagac, J. Mahseredjian, S. Denetiere // Ecole Polytechnique de Montreal. International Conference on Power Systems Transients (IPST 2009) in Kyoto, Japan, June 3 – 6. – 2009. – PP. 1–7.
- Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац // Пер. с нем. яз. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
- Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Днепропетровск : НГУ, 2006. – 470 с.
- Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии / И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
- Волков А. В. Исследование режима пуска гидротурбины / А. В. Волков, В. В. Литвинов, В. А. Волков, К. Н. Морозова // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 2 (62). – 2013. – С. 123–134.

Статья поступила в редакцию 09.04.2015  
После доработки 20.04.2015

Волков В. О.<sup>1</sup>, Довбищук Д. В.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>К.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Україна, E-mail: green\_stone@ukr.net

<sup>2</sup>Магістр, інженер, Запорізький кабельний завод

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПУСКУ ГІДРОАГРЕГАТУ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В НАСОСНОМУ РЕЖИМІ**

*Виконано аналіз існуючих способів пуску гідроагрегатів в насосному режимі на гідроакумлюючих електростанціях (ГАЕС). Удосконалено частотний спосіб пуску гідроагрегату в насосному режимі від сусіднього гідроагрегату, що працює в генераторному режимі. Розроблено математичну модель удосконаленого способу даного пуску гідроагрегату. На основі зазначеної математичної моделі створена імітаційна комп'ютерна модель, за допомогою якої досліджені електромагнітні та механічні процеси частотного пуску стосовно до гідроагрегатів, які встановлені на Київській ГАЕС.*

**Ключові слова:** гідроагрегат, пуск, насосний режим, система автоматичного керування, моделювання електромеханічних процесів.

Volkov V. A.<sup>1</sup>, Dovbischuk D. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., assistant professor of hydropower, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Ukraine, E-mail: green\_stone@ukr.net

<sup>2</sup>Past master, engineer Zaporozhye cable factory

**IMPROVEMENT OF FREQUENCY START OF HYDROELECTRIC PUMPED STORAGE POWER PLANT IN THE PUMPING MODE.**

*The analysis of the existing methods of the hydraulic units start in pump mode at pumped storage power plants (PSP) is done. The introduction of the initial magnetic saturation of the synchronous motor and the implementation of automatic correction of the change rate of its frequency and the synchronous generator voltage improve frequency of starting method in hydro pump mode from a nearby hydroelectric unit operating in generator mode.*

*The general mathematical model of the improved method for starting the hydraulic unit makes possible the rotation of a conventional system of relative units in projections of generalized synchronous machine vectors on the orthogonal coordinate system axis focused on its magnetic field of the rotor. This general mathematical model contains mathematical model of synchronous generator, synchronous motor and control unit.*

*On the basis of this mathematical model the simulation (computer) model of the improved method for frequency start at hydro pump mode from a nearby hydroelectric unit is created. Through this simulation model the electromagnetic and mechanical processes of the method being applied to start hydraulic units installed on the PSP Kiev in Ukraine are investigated and evaluated.*

**Keywords:** hydroelectric, start-up, the pump mode, automatic control system, modeling of electromechanical processes.

**REFERENCES**

- Muraffer G. Asynchronanlauf einer grossen 230 MW Synchro-maschine im Pumpspeicherwerk Vianden II. Brown Boveri Mitt, 1974, No 7, pp. 10–15.
- Lehuen C., Ruelle G., Simonnot D. Asynchronous starting of motor-generators of pumped storage stations, CIGRE, 1972, pp. 7–12.
- Elektricheskaya chast electrostanciy: Uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop./Pod.red. Usova S.V. – L.: Energoatomizdat, 1987. – PP. 616.
- Sinugin V.U. Gidroakkumulruyuschie elektrostancii v sovremennoy electroenergetike / V.U. Sinugin, V. I. Magruk, V.G. Rodionov. – M.: ENAS, 2008. – PP. 352.
- Xiao S., The coordination of Back-to-back starting and protections for pumped storage units / S. Xiao // North China Electric Power University, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, Beijing, China; Liu Jianhui, Kang Xiaojuan, 2012, pp. 1–4.
- Ma W. Discussion on the Control of Reversible Pumped-storage Unit Starting in Back-to-back Mode / W. Ma, X. Zhang // Hydropower Automation and Dam Monitoring, Vol. 33, Oct. 2009, pp. 33–37.
- Karaagac U., Mahseredjian J., Denetiere S. Modeling and Simulation of the Starup of Pumped Storage Power Plant Unit. Ecole Polytechnique de Montreal. International Conference on Power Systems Transients (IPST 2009) in Kyoto, Japan, June 3–6, 2009, pp. 1–7.
- Kovach K. P., Rac I. P. Perehodnie processi v mashinah peremennogo toka. Per. s nem. Yaz, Moscow, Gosenergoizdat, 1963, pp. 744.
- Pivnyak G. G., Volkov A. V. Sovremennye chastotno-regularuemie asinhronnie elektroprivodi s shirotno-impulsnoy modulyaciyey. Dnepropetrovsk: NGU, 2006, pp. 470.
- Kopilov I. P. Electromechanicheskie preobrazovateli energii. Moscow, Energiya, 1973, pp. 400.
- Volkov A. V., Litviniv V. V., Volkov V. A., Morozova K. N. Issledovanie regima puska gidroturbini. Visnik Nacionalnogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannya, Vip. 2 (62), 2013, pp. 123–134.

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, інженер цеху комп'ютерних технологій, релейного захисту і зв'язку Дніпровської ГЕС, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Магістрант кафедри гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

*Удосконалено метод дерева відмов для оцінювання імовірності відмови схеми релейного захисту на інтервалі часу шляхом використання статистичних функцій розподілу імовірності відмов елементів схеми релейного захисту. Удосконалений метод дозволяє проводити оцінку надійності схем релейного захисту з урахуванням характеристик окремих типів обладнання. Проведено порівняльний аналіз надійності схем релейного захисту на електромеханічній та мікропроцесорній елементній базі.*

**Ключові слова:** надійність, релейний захист, імовірність, відмова, технічний стан, дерево відмов.

### ВСТУП

Сучасний стан електроенергетичної системи (ЕЕС) України та її окремих підсистем характеризується напруженим режимом роботи через значне зношення силового, комутаційного та вторинного обладнання. В таких умовах особливу важливість має достовірне оцінювання надійності роботи ЕЕС з метою визначення слабких підсистем та прийняття рішень щодо їхньої модернізації. Для проведення кількісного оцінювання надійності роботи ЕЕС необхідні показники, які б враховували [1]:

- технічний стан силового, вторинного та комутаційного обладнання;
- імовірність відмови обладнання, можливі сценарії розвитку аварії та наслідки;
- стохастичний характер режиму ЕЕС.

Світові тенденції забезпечення надійної роботи ЕЕС свідчать про поступовий перехід до концепції інтелектуальних мереж «smart grid» та застосування ризик-менеджменту при прийнятті рішень. Застосування стратегії ризик-менеджменту при керуванні ЕЕС вимагає визначення ризику як інтегрального показника функціонування, який дає можливість найбільш повно та достовірно характеризувати стан ЕЕС [2]. Для організації ефективного управління ЕЕС необхідний комплексний підхід, який би враховував випадковість відмов елементів ЕЕС, стохастичний характер її режиму, можливий сценарій розвитку аварії та наслідки в технічному, економічному чи матеріальному еквіваленті.

Згідно зі статистичними даними [3, 4] 23–28% важких аварій є наслідком неправильних дій релейного захисту (РЗ) та протиаварійної автоматики. В 50–70% випадків вони призводять до розвитку аварійних ситуацій в тяжкі системні аварії [5]. Таким чином, для оцінювання ризику виникнення аварії в ЕЕС з урахуванням всіх сценаріїв її розвитку необхідно мати адекватні моделі для визначення технічного стану пристроїв та схем вторинної комутації, в першу чергу РЗ. Особливо актуальною ця задача є для схем РЗ, в яких використовуються мікропроцесорні пристрої релейного захисту (МІРЗ), які, згідно зі статистикою [5, 6], мають нижчу експлуатаційну надійність за схеми з електромеханічними реле.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для кількісного оцінювання надійності пристроїв РЗ необхідно визначити найбільш доцільний та інформативний показник, який би враховував такі фактори:

- більше 99% всього часу експлуатації схеми РЗ знаходяться в режимі «очікування», наслідком чого є можливість виникнення в них так званих «прихованих відмов», які проявляються лише під час автоматичної ліквідації аварійного режиму у вигляді невиконання пристроєм РЗ своїх функцій;
- різноманітність видів відмов пристроїв та схем РЗ (відмови у спрацьованні, хибні спрацьовання, надлишкові спрацьовання);
- складність пристроїв та схем РЗ.

Аналіз існуючих показників надійності, які застосовуються для пристроїв РЗ, показав, що найбільш повно враховує зазначені вище фактори імовірність відмови у спрацьованні пристрою РЗ на інтервалі часу  $Q(\Delta t)$ , або, іншими словами, імовірність знаходження пристрою або схеми РЗ в непрацездатному стані при виникненні на інтервалі часу аварійної ситуації, яку має ліквідувати розглядуваний пристрій РЗ.

Для кількісної оцінки імовірності відмови схеми РЗ на інтервалі часу  $Q(\Delta t)$  необхідно визначитись з методом оцінювання надійності. Існує ряд методів визначення надійності пристроїв та схем РЗ [7], кожний з яких має переваги та недоліки з точки зору того, які саме показники необхідно визначити. Так, наприклад, логіко-імовірнісний метод [8] дозволяє проводити розрахунок доволі складних систем, та враховувати у розрахунках велику кількість параметрів. Недоліком цього методу є те, що він обмежує кількість станів об'єкту до двох: працездатного та непрацездатного, що не відповідає реальним умовам функціонування РЗ, непрацездатний стан може бути виражений явно або приховано, а явні відмови, в свою чергу, класифікуються як відмови у спрацьованні, хибні та зайві спрацьовання.

Широкого застосування при оцінці надійності пристроїв РЗ набув метод ланцюгів Маркова [9]. Цей метод можна використовувати як у випадку обмеженого, так і

у випадку необмеженого відновлення при будь-якому часі між перевірками справності комплектів РЗ. Однак, у зв'язку з досить високою складністю, його, зазвичай, застосовують тоді, коли припущення, що використовуються в інших методах, стають неприйнятними.

Підхід до оцінки надійності пристроїв РЗ на основі методу дерева відмов [6, 7], дозволяє врахувати особливості функціонування цих пристроїв і отримати якісні та кількісні показники надійності, визначити ненадійні елементи і запропонувати більш надійні варіанти виконання цих пристроїв.

В роботі ставиться задача удосконалити метод оцінювання імовірності відмови пристрою РЗ на інтервалі часу шляхом врахування статистичних характеристик обладнання в цілому та індивідуальних характеристик окремих одиниць обладнання.

## 2. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РЗ

Для кількісного визначення імовірності  $Q(\Delta t)$  найбільше підходить метод дерева відмов [7], який дозволяє визначити шукану величину  $Q(\Delta t)$  як функцію від показників надійності елементів, що складають схему РЗ як на електромеханічній так і на мікропроцесорній базі. Також цей метод є адаптивним для використання в імовірнісно-статистичних алгоритмах оцінювання ризику виникнення аварії в ЕЕС та її підсистемах [2].

Формування дерева відмов починається з формулювання кінцевої події про відмову системи. Для побудови дерева відмов використовується метод мінімальних перетинів або метод розкладання по елементам [9]. Суть обох цих методів полягає в тому, що при описі умов непрацездатності системи слід використовувати тільки такі поєднання несправностей, з яких не можна виключити жоден елемент без того, щоб система стала працездатною. За результатом побудови дерева відмов складається послідовний ланцюг з мінімальних перетинів (ланок), які представляють собою паралельне з'єднання елементів захисту, одночасна відмова яких робить захист непрацездатним.

Для визначення імовірності знаходження схеми РЗ в непрацездатному стані на інтервалі часу  $\Delta t = t_2 - t_1$  необхідно визначити імовірності відмови захисту в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$ . Вони визначаються за ланцюгом відмов пристрою РЗ:

$$Q(t) = 1 - P_1(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_m(t), \quad (1)$$

де  $P_i(t)$  – імовірність безвідмовної роботи в момент часу  $t$   $i$ -ї ланки ланцюга відмов об'єкта. Оскільки ланки у ланцюгу з'єднані послідовно, імовірність безвідмовної роботи ланцюга визначається як добуток імовірностей безвідмовної роботи всіх ланок.

В свою чергу, імовірність безвідмовної роботи кожної ланки  $P_i(t)$  визначається як сума імовірностей сумісних подій, так як кожна ланка представляє собою паралельне з'єднання елементів РЗ, одночасна відмова яких

призводить до непрацездатності всього захисту. В загальному випадку для  $i$ -ї ланки з  $n$  паралельних елементів імовірність безвідмовної роботи складає [7]:

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^n P_{W_j}(t) - \sum_{j,k=1, j \neq k}^n P_{W_j}(t) \cdot P_{W_k}(t) + \sum_{j,k,l=1, j \neq k \neq l}^n P_{W_j}(t) \cdot P_{W_k}(t) \cdot P_{W_l}(t) - \dots, \quad (2)$$

де  $P_{W_j}(t)$  – імовірність безвідмовної роботи елемента РЗ  $W_j$ ,  $j \in W$ , де  $W$  – множина елементів, з яких складається схема захисту.

Імовірності безвідмовної роботи елементів схеми РЗ визначаються одним з наступних способів:

1) за експоненціальним законом розподілу імовірності відмови об'єкта за незмінних параметрів потоку відмов відповідних елементів  $\omega_j = const, j \in W$ :

$$P_{W_j}(t) = e^{-\omega_j t}; \quad (3)$$

2) за статистичними інтегральними функціями розподілу імовірності відмов елементів схеми РЗ кожного типу  $F_j(t)$ ,  $j \in W$ :

$$P_{W_j}(t) = 1 - F_j(t); \quad (4)$$

3) за статистичними інтегральними функціями розподілу імовірності відмов, модифікованими з урахуванням фактичного технічного стану кожного окремого елемента захисту  $F_j'(t)$ ,  $j \in W$ :

$$P_{W_j}(t) = 1 - F_j'(t). \quad (5)$$

Кожен з перерахованих способів має свої переваги та недоліки. Визначення імовірності відмови за експоненціальним законом є найпростішим, оскільки усереднені значення потоків відмов окремих елементів релейного захисту (трансформатори струму, струмові реле, реле часу, проміжні реле, мікропроцесорні термінали, тощо) є довідниковими величинами, але, з іншого боку, оцінка надійності проведена з використанням усереднених параметрів є найменш точною і, згідно з [10], є придатною лише для проведення різного роду порівняльних оцінок надійності і непридатною для оцінювання надійності окремого обладнання. Оцінювання імовірності відмови пристрою РЗ з використанням інтегральних функцій розподілу імовірності відмов є більш точним, оскільки функції  $F_j(t)$  базуються на генеральній сукупності подій і представляють собою імовірнісні характеристики окремого типу обладнання [2]. Модифіковані функції  $F_j'(t)$  з урахуванням технічного стану конкретних елементів розглядуваної схеми РЗ дозволяють отримати найбільш точну кількісну оцінку імовірності безвідмовної роботи кожного елемента і, як наслідок, всієї схеми РЗ, але їхнє використання вимагає наявності адекватних моделей стану окремих пристроїв та реле, що ускладнене внаслідок їхньої великої різноманітності. Інтегральні статистичні функції  $F_j(t)$  та модифіковані інтегральні статистичні функції

можна використовувати при оцінюванні надійності конкретної схеми РЗ.

Після визначення імовірностей відмови розглядуваної схеми РЗ в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  за рівнянням (1), визначається імовірність відмови схеми релейного захисту на інтервалі часу. Якщо відомо, що в момент часу  $t_1$  схема РЗ була працездатною, то імовірність її відмови на інтервалі часу  $\Delta t$  визначається як:

$$Q(\Delta t) = \frac{Q(t_2) - Q(t_1)}{1 - Q(t_1)} \quad (6)$$

Якщо відомості щодо працездатності схеми на момент часу  $t_1$  відсутні, то імовірність її відмови на інтервалі часу  $\Delta t$  визначається за виразом:

$$Q(\Delta t) = Q(t_2) - Q(t_1) \quad (7)$$

Отримана імовірність відмови є кількісною характеристикою надійності схеми РЗ на інтервалі часу і може бути використана в задачах оцінювання ризику виникнення аварії в ЕЕС та подальшого прийняття рішень щодо зниження його величини.

### 3. ПРИКЛАД ТА РЕЗУЛЬТАТИ

На Дніпровський ГЕС у 2009-2010 роках була проведена заміна комірок КРУ-6 кВ мережі власних потреб з електромеханічними захистами на сучасні комірки, оздоблені мікропроцесорними терміналами МІСОМ Р139 (струмові реле) та МІСОМ Р922 (реле напруги). Приєднання мережі 6 кВ захищаються наступними захистами, які є внутрішніми функціями реле МІСОМ Р139:

- максимальний струмовий захист (МСЗ);
- струмова відсічка (СВ).

В комірці КРУ-6 кВ встановлено один мікропроцесорний термінал. Резервування захистів приєднань на випадок виходу з ладу МІСОМ Р139 забезпечується захистами суміжних ділянок мережі власних потреб. Власних резервних захистів комірці КРУ-6 кВ Дніпровської ГЕС не мають.

Структурні схеми захистів приєднань 6 кВ до заміни (на електромеханічній базі) та після (на мікропроцесорній базі) приведені на рис. 1.

На рис. 1:  $TA_A, TA_C$  – трансформатори струму у фазах А та С відповідно;  $KA_{A-MS3}, KA_{C-MS3}$  – електромеханічні струмові реле МСЗ у струмових колах фаз А та С відповідно;  $KA_{A-CB}, KA_{C-CB}$  – електромеханічні струмові реле СВ у струмових колах фаз А та С відповідно;  $KT$  – електромеханічне реле часу;  $KL$  – електромеханічне проміжне реле;  $Q$  – вимикач у комірці КРУ-6 кВ;  $YAT$  – електромагніт відключення вимикача;  $AK$  – мікропроцесорний пристрій релейного захисту.

Для схем РЗ з рис. 1 необхідно провести порівняльний аналіз їхньої надійності на інтервалі часу  $\Delta t = 3$  місяці ( $t_1 = 5$  років та  $t_2 = 5,25$  років).

Для отримання кількісної оцінки імовірності відмови у спрацюванні РЗ на інтервалі часу використовується метод дерева відмов з розкладанням схеми по обраному елементу. Слід зазначити, що для трифазного КЗ АВС та двофазних КЗ АВ, ВС та СА, вигляд дерева відмов буде різним. Також його структура буде залежати від того відбулось КЗ на початку захищуваної лінії (зона дії СВ) чи в кінці (зона дії МСЗ). В цьому дослідженні оцінювання надійності схем РЗ буде виконуватись для найтяжчого з можливих пошкоджень – близького трифазного КЗ. Побудовані дерева відмов представлені на рис. 2.

За побудованими деревами відмов складаються відповідні ланцюги відмов (рис. 3).

Для оцінювання імовірності знаходження пристрою РЗ в непрацездатному стані на інтервалі часу  $\Delta t = 3$  місяці необхідно обрати спосіб визначення імовірності безвідмовної роботи елементів схеми релейного захисту. Аналіз наявних даних з відмов електромеханічних струмових реле, реле часу та проміжних реле показав їхню недостатність для побудови достовірних  $F(t)$ . В цих умовах порівняльний аналіз імовірності відмови на інтервалі часу для обох схем проведено за експоненціальним законом розподілення імовірності відмови об'єкта. Параметри потоків відмов елементів, що входять до складу обох схем прийнято за [6, 7]:

- трансформатори струму

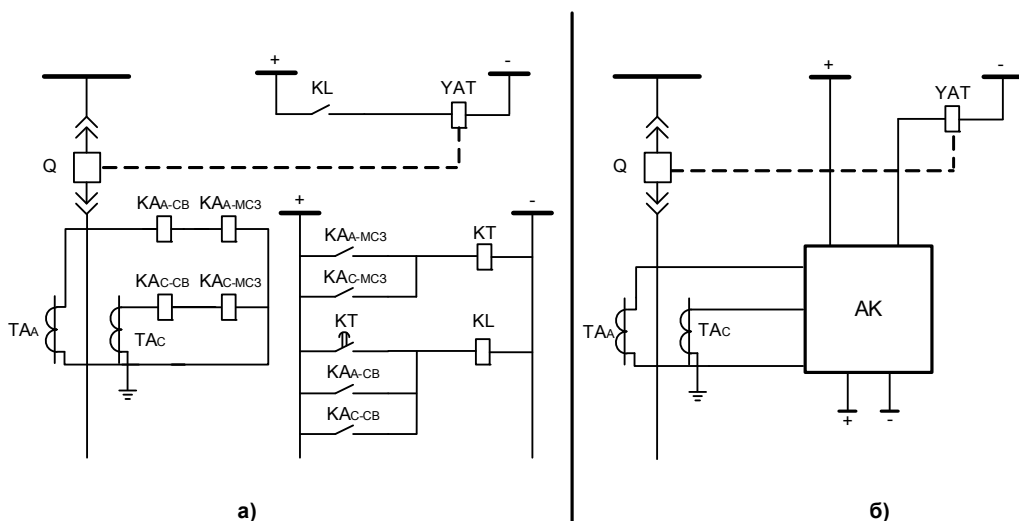


Рисунок 1 – Структурні схеми захистів приєднань 6 кВ до заміни (а – на електромеханічній базі, б – на мікропроцесорній базі)



$$\omega_{T_{A_A}} = \omega_{T_{A_C}} = 0,0003 \text{ 1/рік};$$

– струмові реле

$$\omega_{K_{A_A-CB}} = \omega_{K_{A_C-CB}} = \omega_{K_{A_A-MS3}} = \omega_{K_{A_C-MS3}} = 0,0001 \text{ 1/рік};$$

– реле часу  $\omega_{KT} = 0,0005 \text{ 1/рік};$

– проміжне реле  $\omega_{KL} = 0,0003 \text{ 1/рік};$

– МПРЗ  $\omega_{AK} = 0,001 \text{ 1/рік}.$

За приведеними параметрами потоків відмов розраховані імовірності безвідмовної роботи за виразом (3) в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ . Результати приведені в табл. 1.

На основі загального виразу (2) визначаються вирази для оцінювання імовірності безвідмовної роботи ланок ланцюгів відмов обох схем РЗ. Отримані імовірності занесені в табл. 2.

Згідно з виразом (1), визначаються імовірності відмови ланцюгів для обох захистів:

– електромеханічного:

$$Q_e(t) = 1 - P_{e1}(t) \cdot P_{e2}(t) \cdot P_{e3}(t) \cdot P_{e4}(t) \cdot P_{e5}(t) \cdot$$

$$\cdot P_{e6}(t) \cdot P_{e7}(t) \cdot P_{e8}(t); \quad (8)$$

– мікропроцесорного:

$$Q_m(t) = 1 - P_{m1}(t) \cdot P_{m2}(t). \quad (9)$$

Визначені за виразами (8), (9) імовірності відмови обох схем захисту в моменти часу  $t_1 = 5 \text{ років}$  та  $t_2 = 5,25 \text{ років}$  представлені в табл. 3. За отриманими значеннями  $Q(t_1)$  та  $Q(t_2)$  визначається шукана імовірність відмови пристрою РЗ на інтервалі часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Оскільки більшу частину часу пристрій РЗ знаходиться у режимі очікування, в більшості випадків відомостей щодо працездатності схеми РЗ в момент часу  $t_1$  немає, тому імовірність відмови на інтервалі часу визначається за виразом (7).

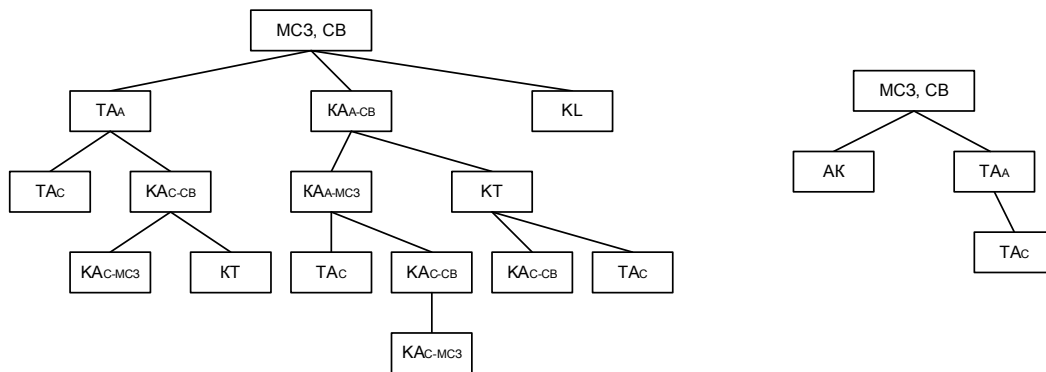


Рисунок 2 – Дерева відмов:

а) схеми MS3 та CB на електромеханічній базі; б) схеми MS3 та CB з МПРЗ

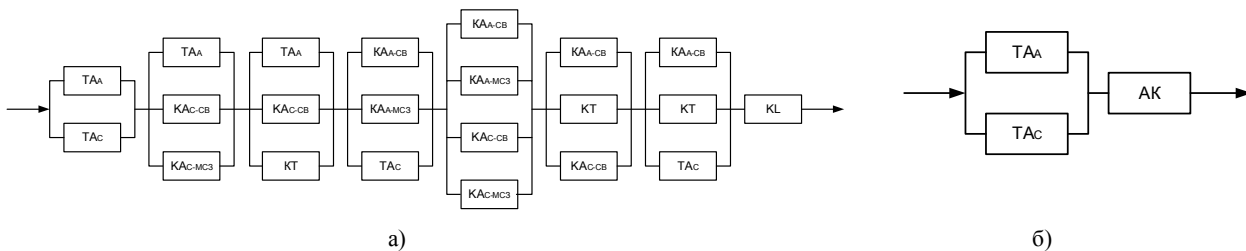


Рисунок 3 – Ланцюги відмов:

а) схеми MS3 та CB на електромеханічній базі; б) схеми MS3 та CB з МПРЗ

Таблиця 1 – Імовірності безвідмовної роботи елементів схем релейного захисту

Елемент	$\omega, \text{1/рік}$	$P(t_1)$	$P(t_2)$
TAA, TAC	0,0003	0,9985011244	0,9984262397
KAA-CB, KAC-CB, KAA-MS3, KAC-MS3	0,0001	0,9995001250	0,9994751378
KT	0,0005	0,9975031224	0,9973784423
KL	0,0003	0,9985011244	0,9984262397
AK	0,001	0,9950124792	0,9947637572

Таблиця 2 – Імовірності безвідмовної роботи ланок ланцюгів відмов

№ ланки	Елементи, що її складають	$P_{wi}(t_1)$	$P_{wi}(t_2)$
Електромеханічний захист			
1	ТА <sub>А</sub> -ТА <sub>С</sub>	0,99999775337205	0,99999752327840
2	ТА <sub>А</sub> -КА <sub>С</sub> -СВ-КА <sub>С</sub> -МСЗ	0,9999999962547	0,9999999956646
3	ТА <sub>С</sub> -КА <sub>А</sub> -СВ-КА <sub>А</sub> -МСЗ	0,9999999962547	0,9999999956646
4	ТА <sub>А</sub> -КА <sub>С</sub> -СВ-КТ	0,9999999812921	0,9999999783457
5	КА <sub>А</sub> -СВ-КА <sub>С</sub> -СВ-КА <sub>А</sub> -МСЗ-КА <sub>С</sub> -МСЗ	0,9999999999994	0,9999999999992
6	КА <sub>А</sub> -СВ-КА <sub>С</sub> -СВ-КТ	0,9999999937609	0,9999999927781
7	ТА <sub>С</sub> -КА <sub>А</sub> -СВ-КТ	0,9999999812921	0,9999999783457
8	KL	0,99850112443771	0,99842623966159
Мікропроцесорний захист			
1	ТА <sub>А</sub> -ТА <sub>С</sub>	0,99999775337205	0,99999752327840
2	AK	0,99501247919268	0,99476375716443

Таблиця 3 – Імовірності відмови схем релейного захисту на інтервалі часу  $\Delta t$

Релейний захист	$Q(t_1)$	$Q(t_2)$	$Q(\Delta t)$
Електромеханічний	0,0015011239	0,0015762391	<b>0,0000751151</b>
Мікропроцесорний	0,0049897562	0,0052387066	<b>0,0002489504</b>

Отриманий результат підтверджує, що надійність мікропроцесорних захистів є нижчою за надійність електромеханічних захистів. Для захистів, аналогічних за місцем встановлення та за своїми функціями, імовірність відмови на відповідному інтервалі часу для мікропроцесорного захисту є втричі вищою, ніж для електромеханічного. Таким чином, питання дослідження надійності схем релейного захисту з МПРЗ набуває особливої актуальності. Але, як було зазначено вище, використовувати усереднені значення параметрів потоку відмов можна лише при проведенні порівняльного аналізу надійності. Для кількісного оцінювання надійності конкретної схеми РЗ необхідне використання статистичних даних з функціонування елементів конкретного типу, що входять у схему. Для схеми МСЗ та СВ на мікропроцесорній базі (див. рис. 1б) такими елементами є:

- трансформатор струму;
- мікропроцесорний термінал.

В [11] приведені статистичні дані з відмов трансформаторів струму. По цим даними побудовано гістограму розподілу параметру потоку відмов для часу напрацювання 25 років за виразом:

$$\omega_{TC}(t_i) = \frac{m_i}{N \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

де  $N$  – загальна кількість трансформаторів струму за якими велось спостереження,  $m_i$  – кількість трансформаторів струму, що відмовили на  $i$ -тому інтервалі часу,  $\Delta t$  – тривалість  $i$ -того інтервалу часу.

За отриманою залежністю  $\omega_{TC}(t_i)$  будується інтегральна функція розподілу імовірності відмов трансформаторів струму:

$$F_{TC}(t) = \int_0^t \omega_{TC}(t) dt. \quad (11)$$

Отримані залежності  $\omega_{TC}(t)$  та  $F_{TC}(t)$  представлені на рис. 4.

В [12] приведені статистичні дані з відмов мікропроцесорних струмових реле для часу напрацювання 19 років. По цим даним за виразами, аналогічними виразам (10), (11) будуються залежності  $\omega_{МПРЗ}(t)$  та  $F_{МПРЗ}(t)$ . Ці залежності представлені на рис. 5.

За виразом (4) з функцій  $F_{TC}(t)$  та  $F_{МПРЗ}(t)$  визначаються імовірності безвідмовної роботи трансформаторів струму та МПРЗ в моменти часу  $t_1 = 5$  років та  $t_2 = 5,25$  років. Результати приведені в табл. 4.

Імовірності відмови схеми з МПРЗ в моменти часу  $t_1 = 5$  років та  $t_2 = 5,25$  років визначаються по даним з табл. 4 і складають  $Q_M(t_1) = 0,016482685$ ,  $Q_M(t_2) = 0,017019891$ . За виразом (7) визначається імовірність відмови схеми на інтервалі часу  $\Delta t = 3$  міс, яка складає:  $Q_M(\Delta t) = 0,000537206$ .

Отриманий результат показує, що імовірність відмови схеми РЗ на інтервалі часу, визначена за статистичною функцією, вища, ніж визначена за усередненим параметром потоку відмов. Це пояснюється тим, що обра-

ний інтервал часу відноситься до етапу припрацювальних відмов, який не враховується експоненціальним законом розподілу імовірності відмови і враховується при використанні статистичних даних з відмов розглядуваного типу обладнання.

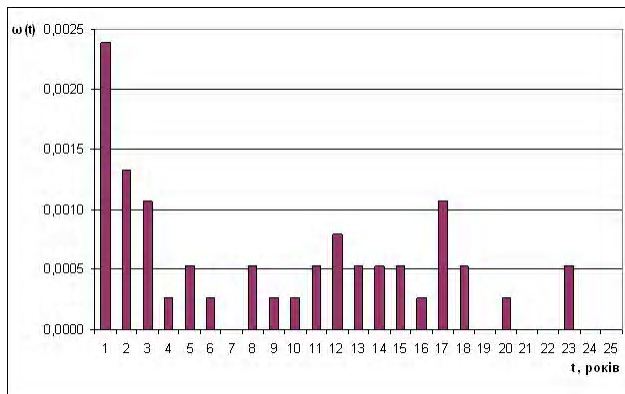
**ВИСНОВКИ**

Удосконалений метод дерева відмов для оцінювання показників надійності схем РЗ дає можливість використовувати в якості вихідної інформації як усереднені показники надійності обладнання так і статистичні показники надійності конкретного типу обладнання, що робить його придатним як для порівняльних оцінок, так і

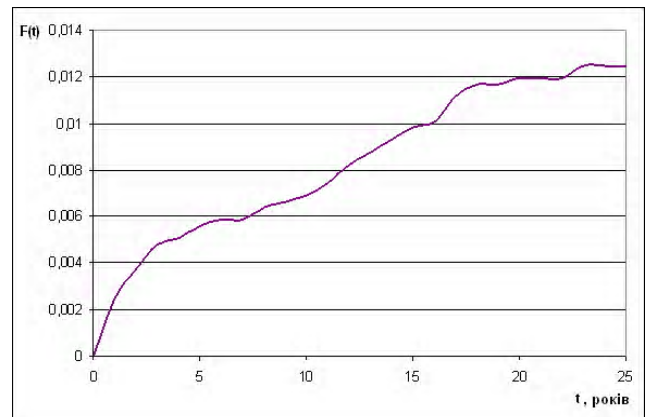
для визначення показників надійності окремих схем РЗ.

Проведений порівняльний аналіз надійності схем РЗ на електромеханічній та мікропроцесорній базах підтвердив нижчу надійність останніх через високі параметри потоків відмов мікропроцесорних терміналів.

Визначена імовірність відмови схеми струмового захисту приєднання 6 кВ Дніпровської ГЕС на мікропроцесорній базі з використанням статистичних функцій  $F(t)$ , дала більш точну оцінку надійності у порівнянні з використанням усередненого параметру потоку відмов і показала необхідність подальшого удосконалення методу шляхом врахування індивідуальних характеристик окремих одиниць обладнання схем РЗ.

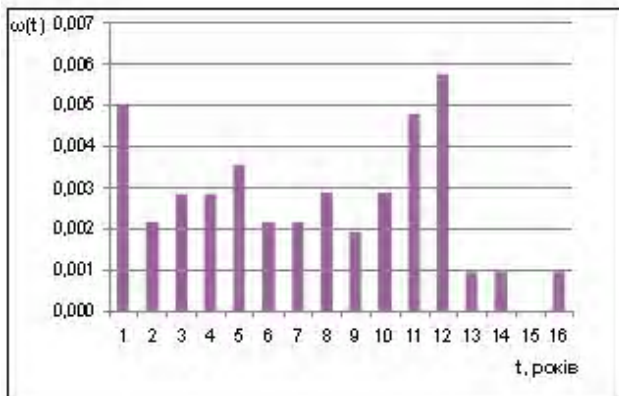


а)

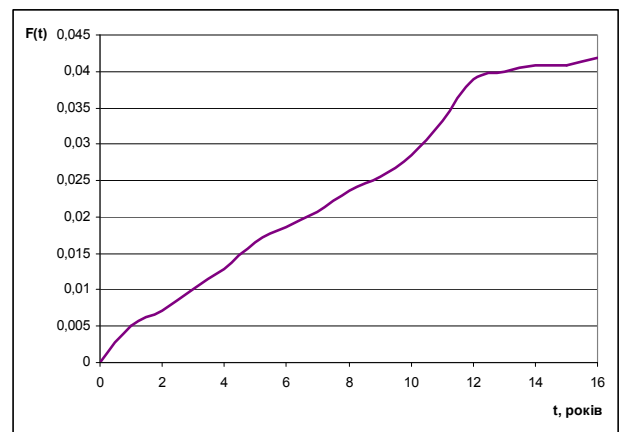


б)

**Рисунок 4** – Гістограма розподілу параметру потоку відмов (а) та інтегральна функція розподілу імовірності відмов (б) трансформаторів струму



а)



б)

**Рисунок 5** – Гістограма розподілу параметру потоку відмов (а) та інтегральна функція розподілу імовірності відмов (б) МПРЗ

**Таблиця 4** – Імовірності безвідмовної роботи елементів схеми з МПРЗ

Елемент	$F(t_1)$	$F(t_2)$	$P(t_1)$	$P(t_2)$
ТА <sub>А</sub> , ТА <sub>С</sub>	0,00557917	0,00564559	0,99442083	0,99435441
АК	0,01645207	0,01698856	0,98354793	0,98301144

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Літвінов В. В. Оцінювання надійності пристроїв релейного захисту за допомогою ієрархічних схем нечіткого виводу / В. В. Літвінов, Я. С. Саченко // Відновлювана енергетика XXI століття. Матеріали XV ювілейної міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, 2014. – С. 261–264.
- Kosterev M. V. Risk Estimation of Induction Motor Fault in Power System / M. V. Kosterev, E. I. Bardyk, V. V. Litvinov // WSEAS Transactions on Power Systems. – Issue 4. – Volume 8. – October, 2013. – P. 217–226.
- Абдурахманов А. М. Влияние продолжительности эксплуатации на отказы выключателей в высоковольтных электрических сетях / А. М. Абдурахманов, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов // Электрические станции. – 2007. – № 7. – С. 59–63.
- Саратова Н. Е. Анализ подходов к исследованию процессов протекания системных аварий / Н. Е. Саратова // Системные исследования в энергетике. Материалы конференции молодых ученых. – Иркутск: ИСЭМ, 2007. – С. 31–39.
- Гуревич В. И. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 12–15.
- Schweitzer E. O. Reliability Analysis of Transmission Protection Using Fault Tree Methods / E. O. Schweitzer, B. Fleming, T. J. Lee, P. M. Anderson // 51st Annual Conference for Protective Relay Engineers. – Texas A&M University, College Station. – April 6-8, 1998.
- Шалин А. И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 384 с.
- Черняк А. А. Логико-вероятностный метод анализа надёжности многозначных систем большой размерности / А. А. Черняк // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 1. – С. 171–180.
- Китушин В. Г. Надёжность электрических систем / В. Г. Китушин. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.
- РД 34.20.574-85. Указания по применению показателей надёжности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками: утв. ГТУ ЭЭС МЭ СССР 03.09.84. – М.: Союзтехэнерго, 1985. – 10 с.
- Лоханин А. К. Обеспечение работоспособности маслонаполненного высоковольтного оборудования после расчетного срока службы / А. К. Лоханин, В. В. Соколов // Электро. – 2002. – № 1. – С. 10–16.
- Ridwan M. I. Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays / M. I. Ridwan, K. L. Yen, A. Musa, B. Yunus // World Academy of Science, Engineering and Technology. – Volume 48. – 2010. – P. 969–975.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2015  
Після доробки 20.04.2015

Литвинов В. В.<sup>1</sup>, Саченко Я. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, инженер цеха компьютерных технологий, релейной защиты и связи Днепровской ГЭС, Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Магистрант кафедры гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье Украина

#### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

*Усовершенствован метод дерева отказов для оценивания вероятности отказа схемы релейной защиты на интервале времени путем использования статистических функций распределения вероятности отказов элементов схемы релейной защиты. Усовершенствованный метод позволяет проводить оценку надежности схем релейной защиты с учетом характеристик отдельных типов оборудования. Проведен сравнительный анализ надежности схем релейной защиты на электромеханической и микропроцессорной элементных базах.*

**Ключевые слова:** надежность, релейная защита, вероятность, отказ, техническое состояние, дерево отказов.

Litvinov V. V.<sup>1</sup>, Sachenko Ya. S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor of Hydro Power Department of Zaporizhia State Engineering Academy, Engineer of Computer Technologies, Relay Protection and Connection Department of Dnipro HPS, Zaporizhia, Ukraine;

<sup>2</sup>Master Student of Hydro Power Department of Zaporizhia State Engineering Academy, Zaporizhia, Ukraine.

#### THE IMPROVEMENT OF RELAY PROTECTION SCHEMES RELIABILITY ESTIMATION METHOD

*In paper the fault tree method for the relay protection scheme reliability estimation at the time interval is improved. The improved method can be used as input information of the following values: the averaged reliability indexes of equipment, the statistical functions of relay scheme elements of fault probability distribution and the modified statistical functions of relay scheme elements of fault probability distribution. The improved fault tree method is possible to apply both for the comparison estimations and for the risk-management problem solution. In practical part of the paper the comparison of reliability analysis of relay schemes with electromechanical relays and digital relays is presented. The obtained results show that the reliability of modern digital relay schemes is less than the reliability of electromechanical relay schemes. Also, in paper the quantity estimation of 6 kV network current protection fault probability is obtained by using the statistical functions  $F(t)$ .*

**Keywords:** reliability, relay protection, probability, fault, technical state, fault tree.

**REFERENCES**

1. Litvinov V. V., Ya. S. Sachenko Otsiniuvannia nadiinosti prystroiv releinogo zahysty za dopomogoiu ierarhichnyh shem nechitkogo vyvodu. Vidnovliuvana energetyka XXI stolittia. Materialy XV yuvileinoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kyiv, 2014, s. 261–264.
2. Kosterev M. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. Risk Estimation of Induction Motor Fault in Power System. WSEAS Transactions on Power Systems, Issue 4, Volume 8, October, 2013, pp. 217–226.
3. Abdurahmanov A. M., Misrihanov M. Sh., Shuntov A. V. Vlianie prodolzhytelnosti ekspluatatsii na otkazy vykluchatelei v vysokovoltnyh elektricheskikh setiah. Elektricheskii stantsii. 2007, No 7, pp. 59–63.
4. Saratova N. E. Analiz podkhodov k issledovaniu protsessov protekaniia sistemnyh avarii. Sistemnye issledovaniia v energetike. Materialy konferentsii molodyh uchionyh. Irkutsk, ISEM, 2007, pp. 31–39.
5. Gurevich V. I. Novaia kontseptsia postroeniia mikroprotsessornyh ustroistv releinoi zashchity. Komponenty i tehnologii, 2010, No 5, pp. 12–15.
6. Schweitzer E. O., Fleming B., Lee T. J., Anderson P. M. Reliability Analysis of Transmission Protection Using Fault Tree Methods. 51st Annual Conference for Protective Relay Engineers. Texas A&M University, College Station, April 6–8, 1998.
7. Shalin A. I. Nadiozhnost i diagnostika releinoi zashchity energosistem. Novosibirsk, NGTU, 2002, 384 s.
8. Cherniak A. A. Logiko-veroiatnostnyi metod analiza nadiozhnosti mnogoznachnyh sistem bolszoi razmernosti. Cherniak. *Avtomatika i telemehanika*, 1998, No 1, pp. 171–180.
9. Kitushin V. G. Nadiozhnost elektricheskikh sistem. Moscow. Vysshaia shkola, 1984, 256 s.
10. RD 34.20.574-85. Ukazania po primeneniiu pokazatelei nadiozhnosti elementov energosistem i raboty energoblokov s paroturbinnymi ustanovkami: utv. GTU EES ME SSSR 03.09.84, Moscow, Soiuztehenergo, 1985, 10 s.
11. Lohanin A. K., Sokolov V. V. Obespechenie rabotosposobnosti maslonapolnennogo vysokovoltnogo oborudovaniia posle raschetnogo sroka sluzhby. Elektro, 2002, No 1, pp. 10–16.
12. Ridwan M. I., Yen K. L., Musa A., Yunus B. Application of Life Data Analysis for the Reliability Assessment of Numerical Overcurrent Relays. World Academy of Science, Engineering and Technology. Volume 48, 2010, pp. 969–975.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*В статье рассматривается новый подход к формированию программы энергосбережения для систем электроснабжения, целью которой является реализация максимального объема потенциала энергосбережения. Формируется общий список энергосберегающих мероприятий программы на результатах оптимизации структуры и параметров системы с точки зрения минимума потерь электрической энергии в ней. Критерием включения мероприятий в данную программу является себестоимость сэкономленной энергии, значение которой не должно превышать действующий тариф.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, энергоэффективность, потери электрической энергии, программа энергосбережения, энергосберегающие мероприятия.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс эффективного потребления электрической энергии в Украине не становится пока что значимой альтернативой в решении проблемы развития энергетики. Очевидная причина этого – относительно небольшой объем реализованного на практике потенциала энергосберегающего эффекта, не соизмеримый с существующим потенциалом энергосбережения (ПЭС), и который значительно уступает необходимому общему приросту производства энергии в стране. И это когда общеизвестно из международного опыта [1], что повышение энергоэффективности является наиболее дешевым способом удовлетворения потребностей в энергоресурсах для экономики любой страны. Улучшение такой негативной энергетической ситуации в нашем государстве требует разработки новых способов достижения экономически целесообразного эффекта в энергосбережении, в частности экономии максимального количества электрической энергии.

Предлагаемая трактовка ПЭС, по мнению авторов [1], должна быть дополнена главной характеристикой – способностью производственного объекта к энергосбережению. А представленная здесь же классификация ПЭС, которая разделяет его, например, по видам топливно-энергетических ресурсов, системам энергоснабжения, периодам времени его оценки, уровням использования, объектам и др., выполнена с целью реализации принципов системности и комплексности при определении его. Такой подход дает возможность вычислить значение потенциала только применительно к рекомендуемой классификации, но при этом сам процесс его оценки зависит от опыта специалистов в соответствующей области энергоснабжения.

Существующая практика энергосбережения на промышленных предприятиях носит рекомендательный характер. Например, для системы электроснабжения (СЭС) предлагается следующее: установка компенсирующих устройств; регулирование коэффициента трансформации; переход электрических сетей на повышенное напряжение; включение под нагрузкой резервных линий

электропередач и др. Каждое из подобных мероприятий, которые предлагаются либо из опыта эксплуатации, либо как новые разработки в области энергосбережения, безусловно, повышает энергоэффективность. Однако здесь отсутствует целенаправленность действий по снижению энергопотребления и по реализации полного объема ПЭС.

### ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### ЗАДАЧИ

Известно, что ПЭС характеризуется соотношением потерь энергии реального и желаемого (наиболее целесообразного) технологических процессов ее преобразования и передачи в систему [2]. В качестве целесообразного технологического процесса передачи электрической энергии по СЭС, имеет смысл рассмотреть процесс с минимально возможными суммарными потерями в элементах системы [3]. Это позволит выявить предельный технически допустимый резерв экономии электроэнергии в явном виде и сориентировать мероприятия непосредственно на снижение потерь электрической энергии в СЭС. Причем предельность и техническая допустимость резерва базируется не на каких-либо предположительных версиях частичного изменения параметров и режимов системы, а на результатах, которые получены на основе оптимизации структуры и параметров СЭС с позиции минимальных суммарных потерь электрической энергии (ПЭЭ) в ней за заданный период времени и соблюдении всех технических требований к ее эксплуатации [4].

Очевидно, что новый состав электрооборудования и структура СЭС (полученные на основе оптимизации) являются рекомендуемыми для внедрения. Действия, связанные с их обеспечением и составляют те энергосберегающие мероприятия (ЭСМ), которые необходимо выполнить для максимально возможного снижения ПЭЭ в системе. Сопровождается каждое из мероприятий своими конкретными изменениями СЭС во времени и соответствующими ПЭЭ. То есть любое воздействие на систему приводит к изменению показателей ее энергоэффективности. Следовательно, возникают вопросы

выбора таких мероприятий, направленных на реализацию потенциала энергосбережения в СЭС, которые были бы экономически целесообразными либо в настоящее время, либо с учетом прогноза изменения цен на электрооборудование и тарифов на электроэнергию в ближайшей перспективе. Не исключается при этом и определение последовательности их внедрения для повышения эффективности процесса энергосбережения. То есть требуется формирование такого плана ЭСМ (программы энергосбережения) в СЭС предприятий, который бы позволил эффективно реализовать предельное значение резерва экономии электроэнергии в полном объеме, что и является целью статьи.

## ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Потенциальная экономия электроэнергии для промышленного предприятия должна быть целесообразна из экономических соображений. Это связано с тем, что реализация конкретных технических мероприятий сопровождается затратами, обусловленными в данном случае установкой электрооборудования с другими конструктивными характеристиками, а также дополнительных электроустройств, строительными работами, монтажом новых источников питания электрических сетей, модернизацией их схем и т.д. При этом в соответствии с государственным стандартом [5] эффективность организационно-технических мероприятий по энергосбережению оценивается частью из общей величины прибыли, которая остается в распоряжении предприятия после их реализации:

$$\Delta\Pi_t = \Pi_{2t} - \Pi_{1t}, \quad (1)$$

где  $\Pi_{1t}$  и  $\Pi_{2t}$  – показатели прибыли предприятия в течение  $t$ -го расчетного периода до и после реализации ЭСМ.

Применительно к СЭС промышленного предприятия такая оценка примет вид:

$$\Delta\Pi_t = \beta_t \cdot \delta\Delta W_t - eK - \Delta C_t, \quad (2)$$

где  $\beta_t$  – тариф на электроэнергию, потребляемую из энергосистемы в  $t$ -ом периоде, грн/кВт·час;  $\delta\Delta W_t$  – объем экономии электроэнергии за счет реализации ЭСМ в  $t$ -ом периоде, кВт·час;  $e$  – внутренняя норма эффективности, отн. ед.;  $K$  – капитальные расходы, связанные с реализацией ЭСМ (включаются капиталовложения на приобретение, монтаж электрооборудования, а также при необходимости и на строительные конструкции), тыс. грн.;  $\Delta C_t$  – изменение эксплуатационных текущих затрат за  $t$ -ый период при замене электрооборудования либо при каких-либо других модификациях системы, тыс. грн.

Предлагаемая оценка эффективности ЭСМ согласно формуле (2) заключается в их восприятии как генератора дохода по схеме финансирования за счет собственных средств предприятия. Очевидно, что отрицательное значение указанной эффективности свидетельствует о

неприемлемости ЭСМ с точки зрения экономической целесообразности. В противном случае сэкономленный объем энергии обеспечивает дополнительную прибыль в некотором определенном значении. Тогда минимально допустимая эффективность ЭСМ определяется равенством затрат, связанных с их реализацией и стоимостью сэкономленной энергии:

$$eK + \Delta C_t = \beta_t \cdot \delta\Delta W_t, \quad (3)$$

откуда после преобразований получим:

$$\beta_t = (eK + \Delta C_t) / \delta\Delta W_t. \quad (4)$$

Правая часть уравнения (4) отражает удельные затраты на экономию единицы электроэнергии, то есть представляет собой себестоимость сэкономленной электроэнергии. Разумеется, что если эта величина превышает действующий  $\beta_t$  тариф на электроэнергию, потребляемую из энергосистемы в  $t$ -ом периоде, то предприятию не выгодно эти мероприятия [6]. Следовательно, этот показатель, можно рекомендовать для экспресс-оценки экономической целесообразности внедрения ЭСМ, так как он убедительно указывает на выгодность (убыточность) такого мероприятия.

Таким образом, для анализа эффективности ЭСМ применительно к СЭС требуется определение следующих технико-экономических показателей (ТЭП): капиталовложений и текущих затрат на эксплуатацию системы, а также годовых потерь электроэнергии в ней. Для вычисления затратной части на реализацию ЭСМ необходимы исходные стоимостные показатели (цены на электрооборудование, стоимость его монтажа и строительных конструкций) таких элементов системы: кабельные линии до и выше 1000 В, низковольтные и высоковольтные компенсирующие устройства, цеховые трансформаторные подстанции, распределительные подстанции с надлежащей комплектацией электрооборудования, а также источники питания предприятия, куда входят трансформаторы с различной трансформацией напряжения и необходимая коммутационно-защитная аппаратура. Для определения затрат на эксплуатацию системы понадобятся нормы отчислений на амортизацию, техобслуживание и ремонт электрооборудования. В этот расчет необходимо включить и затраты, связанные с оплатой за реактивную электроэнергию. Учет последних обусловлен тем, что процесс оптимизации параметров СЭС с точки зрения минимума ПЭЭ отражается и на способе компенсации реактивной мощности, который, как правило, воспроизводится установкой дополнительных компенсирующих устройств, а, следовательно, приводит к изменению режима и объема потребления реактивной электроэнергии.

Предлагаемая выше оценка эффективности ЭСМ рассматривается с позиции предприятия, то есть их финансирование выполняется за счет его собственных средств. Тем не менее, возможна и ситуация привлечения инвесторов к этому процессу. В этом случае ЭСМ рассмат-

риваются как инвестиционные проекты энергосбережения, так как они направлены на снижение электропотребления посредством уменьшения потерь электроэнергии при транспортировке ее по СЭС. Для оценки эффективности таких проектов рекомендуется перечень приведенных ниже показателей, которые вычисляются по известным в практике инвестиционного анализа формулам [7]: дисконтированный доход; индекс доходности инвестиций; внутренняя норма дохода; статистический и динамический срок окупаемости капиталовложений.

Выбор экономически целесообразных ЭСМ зависит от поставленных целей и схем финансирования процесса энергосбережения. Так, выбор мероприятий, обеспечивающих максимальное снижение потерь электроэнергии в системе, и ограниченных себестоимостью сэкономленной электроэнергии, будет направлен на реализацию части потенциала энергосбережения, допустимую с точки зрения экономической целесообразности. Выбор же таких ЭСМ, которые обеспечивают максимальную прибыль от их реализации, обуславливают повышение экономической эффективности непосредственно процесса энергосбережения на предприятии. В частности, с позиции инвестора абсолютная эффективность этого процесса определяется теми мероприятиями, которые имеют максимальный чистый дисконтированный доход.

Совокупность всех технических и схемных модификаций на каждом участке и уровне СЭС, позволяющих сделать последнюю энергоэффективной, и представляет собой тот необходимый перечень ЭСМ, которые необходимо осуществить для максимальной экономии электроэнергии при ее транспортировке по системе. Данный перечень будет зависеть от результатов решения оптимизационной задачи и технологических особенностей потребителя энергии. Применение при формировании указанных мероприятий процесса оптимизации структуры и параметров СЭС, опирающегося на комплексное решение всех основных задач синтеза энергоэффективной системы, позволяет получить ее корректную трансформацию. То есть при потенциальной реализации предлагаемых изменений в системе учитывается их взаимовлияние.

Как показали исследования, полная и одновременная замена всего состава электрооборудования системы и компоновка новых схем электрических сетей в условиях эксплуатации практически всегда экономически нецелесообразны [8], несмотря на максимальный эффект от снижения потерь электроэнергии. Это обусловлено существующей политикой цен на энергоресурсы и оборудование. Следует также понимать, что для получения предельной величины снижения ПЭЭ в системе согласно результатам оптимизации требуется некоторая совокупность воздействий на нее. Например, для реализации потенциала в цеховых электрических сетях предприятий требуется прокладка дополнительных линий на участках сети, установка трансформаторных подстанций (ТП) в других местах. Также на предельное значение ре-

зерва в этих сетях оказывает влияние количество ТП, что обуславливает перераспределение нагрузок между ними, то есть изменение схем этих сетей.

Естественно, что указанные воздействия на систему или какие-либо другие изменения для прочих структурных частей СЭС будут сопровождаться дополнительными затратами. Причем эти затраты не всегда приведут к их обязательному увеличению в рамках группы элементов одного функционального назначения. Например, прокладка дополнительных линий на участках ЦЭС, либо изменение сечений кабеля на большие значения, естественно, требует увеличения затрат. В процессе же модификации топологии сети, заключающейся в изменении как координат места расположения ее узлов, так и всей схемы, затраты на сеть могут оказаться меньшими за счет сокращения суммарной длины участков. Не исключается при этом вероятное увеличение (снижение) затрат на сами узлы сети, если изменяется их количество, а стало быть и конструктивные параметры.

Таким образом присутствует неоднозначность в зависимости необходимых затрат на реализацию мероприятий по экономии энергии от объема последней. Усугубляется неопределенность и отсутствием четкой закономерности в изменении цен на электрооборудование, характерной для плановой экономики. Отсутствует эта закономерность и между группами электрооборудования (применительно к существующей классификации и назначению) для каждого производителя, не говоря, уже о фирмах-посредниках.

Поэтому для последующего решения задачи разработки ПЭС необходимо сформировать список вариантов технически возможных модификаций системы как основу для анализа экономической целесообразности реализации энергосберегающих мероприятий. Очередность действий по изменению существующих параметров СЭС на оптимальные на данном этапе не имеет значения. Однако каждая такая операция должна сопровождаться перерасчетом технико-экономических показателей, так как вероятно изменение характеристик потребления смежных уровней системы, что, в свою очередь, потребует проверить ее на допустимость эксплуатации по техническим условиям, а также определить дополнительные затраты на временные мероприятия.

Это обусловлено тем, что при формировании такого списка задействуется всего лишь фрагмент вариации системы относительно оптимальной, который включает в себя только какую-то часть ее параметров. Здесь временные мероприятия обеспечивают реализацию системы в целом до следующих действий, способствующих снижению потерь в системе. В затраты на такие мероприятия входят стоимость необходимого дополнительного электрооборудования, а также монтажа и строительных конструкций на его установку. Их в последующем можно уменьшить либо за счет продажи этого электрооборудования по остаточной стоимости, либо включить данное оборудование (часть его) в последующие модификации элементов системы.



Формирование списка технически возможных мероприятий по изменению системы основывается на сопоставлении оптимальных значений ее параметров (табл. 1) с существующими. Вначале имеет смысл выделить независимые группы последних, изменение которых не связано с остальными. К ним относятся операции, обусловленные использованием проводников электрической сети с оптимальными параметрами, а также с установкой компенсирующих устройств (КУ) в ее узлах либо в полном объеме из предлагаемого состава, либо их части, что определяется фактическим режимом электропотребления.

Действительно, выбор сечений проводников до 1000 В зависит только от электрической нагрузки узлов цеховой электрической сети, которая является исходной информацией в условиях исследования. Параметры же кабельных линий (КЛ) выше 1000 В, определенные из условия минимума ПЭЭ в сети, имеют достаточно большой запас как по нагреву, так и по другим условиям, в частности по термической стойкости к токам короткого замыкания и по нормативной экономической плотности тока. Поэтому оптимальные параметры таких проводников могут быть предложены для самостоятельной реализации. В области энергосбережения компенсация реактивной мощности (КРМ) рекомендуется как самостоятельное ЭСМ, что и предложено в виде установки КУ, номинальная мощность которого выбрана из условия предельной КРМ на шинах РУ-0,4 кВ ТП. В данном исследовании это относится только к низковольтным устройствам, так как выбор номинальных мощностей высоковольтных КУ обусловлен балансом реактивных мощностей, поэтому зависит от результатов выбора низковольтных КУ и других параметров.

Затем рассматриваются группы зависимых параметров, так как самостоятельное изменение каждого из них невозможно без участия других. Этот шаг выделит группы мероприятий, состоящие из собственных последовательностей по их реализации. Логично связать это с узлами электрической сети, так как они являются промежуточными звеньями между питающими и распределительными участками последней, что приводит к взаимовлиянию результатов выбора оптимальных технических параметров самих узлов и смежных с ними электрических сетей.

Очевидно, что к таким параметрам относятся, во-первых, топологические характеристики сети, а именно: координаты мест установки узлов сети и распределение нагрузок между ними, что обуславливает схему связи между ними и трассу самой сети. Во-вторых, технические характеристики самих узлов сети с трансформацией и подключенных к ним КУ, так как установка таких узлов в оптимальных местах при перекомпоновке схемы, чаще всего приводит к тому, что номинальные мощности трансформаторов будут отличаться от существующих, а это потребует установки либо дополнительных КУ, либо новых устройств. Поэтому рассматривать самостоятельное размещение узлов сети в местах с оптимальными координатами с прежними техническими характеристиками не имеет смысла.

В табл. 1 представлены самостоятельные технические ЭСМ, которые предложены из условия замены существующих параметров СЭС на их оптимальные значения (последняя колонка таблицы). При этом реализация зависимых групп параметров объединена в логическую совокупность действий и отражена в 1-ом, 5-ом и 7-ом мероприятиях. Очерченные в таблице сопутствующие операции необходимы для оценки затрат на указанные ЭСМ. Формируется такой список для каждого узла электрической сети, параметры которого получены в результате оптимизации.

Реализация же независимых оптимальных параметров СЭС (мероприятия – 2, 3 и 6) может быть предложена и в рамках существующих узлов, что расширяет возможности анализа ЭСМ, а, следовательно, и применения их, в том случае, если бы предложенные мероприятия для новых узлов электрической сети (ТП, РП и ИПП) оказались экономически нецелесообразными. Это обусловлено тем, что здесь отсутствуют затраты на их покупку, строительство и монтаж.

Сформированный по вышеописанному принципу перечень технических ЭСМ для каждого узла системы, в конечном итоге преследует единую цель – создание энергоэффективной СЭС, что способствует максимальному снижению электропотребления на промышленном предприятии. Однако этот процесс энергосбережения может быть более эффективным (как во временных рамках, так и по экономическим соображениям), если определить приоритетность выполнения предлагаемых ЭСМ, то есть установить последовательность их внедрения.

Естественно, что последовательность реализации каждого из рассматриваемых мероприятий должна быть установлена только для тех, из них которые экономически целесообразны. Последнее обеспечивается выполнением условия: себестоимость сэкономленной электроэнергии ( $e_{эж}$ ) не должна превышать действующего тарифа ( $e_{д}$ ). Очевидно, что для получения как можно быстрее большего эффекта, последовательность реализации уже экономически допустимых ЭСМ может быть определена, например, ранжированием (по убыванию) их по такому показателю как объем сэкономленной электроэнергии.

Таким образом, организация программы энергосбережения для СЭС промышленных предприятий будет складываться из следующих этапов.

1. Формируется список всех возможных технических ЭСМ, внедрение которых является допустимым по требуемым условиям эксплуатации системы. Так как реализация потенциала энергосбережения на каком-либо уровне системы, в конечном итоге может повлиять на параметры смежных уровней, поэтому обязательно требуется соблюдение этих условий. Составляется такой перечень на основе ряда параметров, полученных в результате оптимизации СЭС с позиции минимума суммарных ПАЭЭ в ней.

2. На основании полученного выше списка ЭСМ определяются экономически допустимые мероприятия,

Таблица 1 – Основные технические ЭСМ для реализации оптимальных параметров СЭС

№ ЭСМ	Действия для реализации технических энергосберегающих мероприятий	Сопутствующие операции	Реализуемые параметры
1	Установка ТП; ввод в эксплуатацию трансформаторов на ТП; подключение низковольтных КУ к ТП; компоновка схемы цеховых электрических сетей (ЦЭС)	демонтаж существующей ТП; строительство ТП; приобретение и монтаж трансформаторов новой ТП; закупка, монтаж низковольтной КУ и подключение к новой ТП; присоединение пунктов распределительных до 1000 В к ТП	координаты ТП; количество трансформаторов и их номинальная мощность на ТП; номинальная мощность низковольтных КУ; схема ЦЭС
2	Замена проводников участков ЦЭС	закупка и монтаж КЛ до 1000В; присоединение пунктов распределительных до 1000 В к ТП	количество линий, сечения и материал жил КЛ ЦЭС
3	Установка низковольтных компенсирующих устройств (НКУ)	закупка, монтаж и присоединение НКУ к шинам РУ 0,4 кВ ТП	номинальная мощность низковольтных КУ
4	Замена проводников участков распределительных электрических сетей (РЭС) выше 1000 В внутризаводской электрической сети (ВЗЭС)	закупка и монтаж КЛ выше 1000В, присоединение ТП, высоковольтных приемников электроэнергии к РП	количество линий, сечения и материал жил КЛ РЭС
5	Установка распределительных подстанций (РП); компоновка схемы распределительных электрических сетей выше 1000 В; установка высоковольтных КУ	демонтаж существующей РП; строительство РП; закупка и монтаж необходимого электрооборудования; присоединение ТП и высоковольтных электроприемников к РП; закупка, монтаж и подключение высоковольтных КУ к РП	координаты РП; номинальная мощность высоковольтных КУ; схема РЭС
6	Замена проводников участков питающих электрических сетей (ПЭС) выше 1000 В	закупка и монтаж КЛ выше 1000В, присоединение РП к ИПП	количество линий, сечения и материал жил КЛ ПЭС
7	Установка подстанции источников питания предприятия (ИПП); ввод в эксплуатацию трансформаторов ИПП; компоновка схемы питающей электрической сети	демонтаж существующей подстанции ИПП; строительство подстанции ИПП; приобретение и монтаж новых трансформаторов ИПП; присоединение РП к новой подстанции ИПП	координаты ИПП; количество трансформаторов и их номинальная мощность на ИПП; схема ПЭС

исходя из условия, что себестоимость сэкономленной на основе их реализации электроэнергии не должна превышать действующего тарифа.

3. Уточненный выше список уже экономически и технически допустимых ЭСМ сортируется по убыванию объема сэкономленной электроэнергии, что и определяет последовательность их реализации.

Несмотря на то, что существующие системы электроснабжения аналогичны по своей структуре и параметрам, так как создаются на принципах типизации и унификации проектных решений, режимные же параметры их могут отличаться, что обусловлено технологическими особенностями объекта. Следовательно, будут и разные ориентиры в процессе энергосбережения. Например, для одних систем начальными структурными

элементами, на которые необходимо обратить внимание, могут быть – цеховые сети, а для других – цеховые ТП, или – ИПП. Так были исследованы фрагменты (со своими источниками питания электрических сетей) систем электроснабжения Запорожских заводов – ПАО «Запорожжкокс» и ПАО «Запорожжогнеупор», которые отличаются структурами и режимами электропотребления. В табл. 2 представлены значения суммарных годовых ПЭЭ в целом по исследуемым и энергоэффективным системам (ИСЭС и ЭСЭС) указанных предприятий, а также отдельно для каждой их структурной составляющей. Там же указан потенциал энергосбережения (*ΔДВ*) и его структура с долевым участием (%) каждой составной части в общем значении потенциала.

**Таблица 2** – Годовые потери электроэнергии и структура потенциала энергосбережения для фрагментов СЭС ПАО «Запорожжкокс»и ПАО «Запорожогнеупор»

Структурные элементы СЭС	Система электроснабжения ПАО «Запорожжкокс»				Система электроснабжения ПАО «Запорожогнеупор»			
	Годовые ПЭЭ, МВт·час/год		$\delta\Delta W$ , МВт·час/год	%	Годовые ПЭЭ, МВт·час/год		$\delta\Delta W$ , МВт·час/год	%
	ИСЭС	ЭСЭС			ИСЭС	ЭСЭС		
ЦЭС	2592,9	740,8	1852,1	64	149,2	38,5	110,7	51
ТП	1695,0	932,2	762,8	26	332,6	256,0	76,6	35
ВЗЭС:	324,6	146,3	178,3	6	37,1	7,4	29,7	14
– РЭС	61,9	40,2	21,7	–	9,0	3,7	5,3	–
– ПЭС	262,7	106,1	156,6	–	28,1	3,7	24,4	–
ИПП	979,1	871,4	107,7	4	–	–	–	–
система	5591,6	2690,7	2900,9	100	518,9	301,9	217,0	100

Из результатов расчета видно, что наибольшее значение потенциалов в СЭС указанных объектов приходится на цеховые сети. Причем для ПАО «Запорожжкокс» эта часть преобладает в общем потенциале системы – более 60%. Максимальное значение годовых потерь приходится также на эти сети – 2592,9 МВт\*час, которые составляют более 40% от их общей величины. Для системы же ПАО «Запорожогнеупор» такое совпадение отсутствует – здесь максимальные потери приходятся на ТП (332,6 МВт\*час – более 60%). При этом возможность получения большего эффекта от снижения общих потерь принадлежит все таки цеховым сетям – 50%, несмотря, что удельный вес годовых потерь в них здесь составляет около 30%.

Таким образом, имеется неоднозначность в оценке потенциальной возможности каждого из предложенного ЭСМ (табл. 1), тем более с точки зрения экономической целесообразности. И может быть она определена только для конкретной системы электроснабжения. А разработанный список ЭСМ, как элемент предлагаемой программы энергосбережения, позволит в дальнейшем использовать все возможные действия, направленные на реализацию максимального объема резерва экономии электроэнергии.

### ВЫВОДЫ

1. Основой программы энергосбережения для СЭС должен стать потенциал энергосбережения, где в качестве целесообразного технологического процесса передачи электрической энергии по системе рассматривается процесс с минимальными суммарными ПЭЭ в ее элементах. Это позволит выявить предельный технически допустимый резерв экономии электроэнергии в явном виде. Предельность и техническая допустимость резерва базируется на результатах, полученных на основе оптимизации структуры и параметров СЭС с позиции минимальных суммарных ПЭЭ в ней за заданный период времени и соблюдении всех технических требований к ее эксплуатации.

2. Совокупность всех технических и схемных модификаций на каждом участке и уровне СЭС, позволяющих сделать последнюю энергоэффективной, то есть с минимальными ПЭЭ в ней, и представляет собой тот необходимый перечень ЭСМ, которые необходимо осуществить для максимальной экономии электроэнергии при ее транспортировке по системе. Формирование списка технически возможных мероприятий по изменению системы основывается на сопоставлении оптимальных значений ее параметров с существующими и последующей замене их.

3. Для СЭС на основании нормативной оценки эффективности ЭСМ предложены условия выбора экономически эффективных мероприятий по снижению ПЭЭ в системе: себестоимость сэкономленной электроэнергии не должна превышать действующий тариф на электроэнергию, потребляемую предприятием из энергосистемы.

4. Предлагаемый подход к составлению программы энергосбережения для СЭС позволит максимально реализовать технически допустимый потенциал энергосбережения системы, так как он основан не на случайных изменениях ее параметров согласно существующей практики энергосбережения в этой области, а на целенаправленной трансформации системы в энергоэффективную.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетичний аудит: навчальний посібник / [О. І. Соловой, В. П. Розен, Ю. Г. Лега та ін.] – Черкаси : ЧДТУ, 2005. – 299 с.
2. Литвак В. В. Об оценке потенциала энергосбережения / В. В. Литвак // Промышленная энергетика. – 2003. – №2. – С. 2 – 6.
3. Качан Ю.Г. Об оценке потенциала энергосбережения в системах электроснабжения / Ю.Г. Качан, В.В. Дьяченко //Інтегровані технології та енергозбереження: Щоквартальний наук.–практ. журн. – Харків : НТУ «ХП», 2005. – №2 – С. 154–156.
4. Качан Ю. Г. Алгоритм синтеза оптимальной энергоэффективной системы электроснабжения промыш-

- ленних підприємств / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук.-техн.зб. – Дніпропетровськ : НГУ, 2010. – Вип. 85. – С. 11–17.
5. ДСТУ 2155–93. Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження. – [Чинний від 1995–01–01]. – К. : Держстандарт України, 1993. – 42 с. – (Національні стандарти України).
  6. Качан Ю. Г. Оценка потенциала и программы энергосбережения в системе электроснабжения на примере коксохимического производства / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – №2(21). – С. 55–59.
  7. Богатин Ю. В. Инвестиционный анализ: учебное пособие / Ю. В. Богатин, В. А. Швандар. – М. : ЮНИТИ–ДАНА, 2000. – 287 с.
  8. Сердюк Т. В. Особливості реалізації політики енергозбереження в Україні: досягнення та шляхи вдосконалення / Т. В. Сердюк, С. Ю. Франишина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – №1. – С. 52–56.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2015  
Після доробки 26.08.2015

Дьяченко В. В.

Канд. техн. наук Запорізький національний технічний університет, Україна

#### ФОРМУВАННЯ ПРОГРАМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У статті розглядається новий підхід до формування програми енергозбереження для систем електропостачання, метою якої є реалізація максимального обсягу потенціалу енергозбереження. Формується загальний список енергозберігаючих заходів програми згідно результатам оптимізації структури і параметрів системи з точки зору мінімуму втрат електричної енергії в ній. Критерієм включення цих заходів у дану програму є собівартість зекономленої енергії, значення якої не повинно перевищувати діючий тариф.

**Ключові слова:** система електропостачання, енергоефективність, втрати електричної енергії, програма енергозбереження, енергозберігаючі заходи.

Dyachenko V. V.

Ph. D. of Zaporozhye National Technical University, Ukraine

#### CREATION OF ENERGY SAVING PROGRAM FOR POWER SUPPLY SYSTEMS

The article discusses a new approach to the formation of energy-saving program for the power supply system, which aims to realize the maximum amount of reserve electric power saving system. The combination of all technical and circuit modifications at each site and system level power that creates the energy-efficient systems, and is an initial list of energy saving measures will be included into the program. The general list of energy-saving measures on the results of the program to optimize the structure and parameters of the system in terms of the minimum electric power losses in it is formed. For the power supply system on the basis of a regulatory evaluation of the effectiveness of energy saving measures it is proposed the criteria selection of cost-effective measures to reduce energy losses in the system: the saved energy cost should not exceed the current tariff for electricity consumption from the grid.

**Key words:** power, energy, loss of electrical power, energy-saving program, energy saving measures.

#### REFERENCES

1. Solovej O. I., Rozen V. P., Lega Ju. G. *Energy audit: a tutorial. Energetichnij audit: navchal'nij posibnik*, ChDTU, 2005, Cherkasy, 299 p.
2. Litvak V. V. About energy saving potential estimate. Ob ocenke potenciala jenergosberezhenija, *Industrial Energy*, No. 2, 2003, pp.2–4.
3. Качан Ю. Г., Д'яченко В. В. About energy saving potential evaluation in power supply systems *Integrated technologies and energy efficiency: Quarterly practical scientific journal*, No. 2, 2005, pp.154–156.
4. Качан Ю. Г., Д'яченко В. В. Synthesis algorithm of optimal energy-efficient industrial enterprises power supply system. *Mining Electromechanics and Automation*, No.85, 2010, pp.11–17.
5. Качан Ю. Г., Д'яченко В. В. Оценка потенциала и программы энергосбережения в системе электроснабжения на примере коксохимического производства / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – №2(21). – С. 55–59.
6. Богатин Ю. В., Швандар В. А. *Investment analysis: a tutorial*. UNITY–DANA, Moscow, 2000, 287 p.
7. Сердюк Т. В., Франишина С. Ю. Особенности реализации политики энергосбережения в Украине: достижения и пути совершенствования / Т. В. Сердюк, С. Ю. Франишина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – №1. – С. 52–56.
8. Качан Ю. Г., Д'яченко В. В. Потенціал оцінки та програми економії енергії в системі електропостачання на прикладі коксохімічного виробництва. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2(21), 2007, с.55–59.

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, Україна, E-mail: ntu.em@ua.fm

<sup>2</sup>Асистент кафедри відновлюваних джерел енергії, Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, Україна

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Метою даної роботи є встановлення факторів, що впливають на зміну технічних втрат електроенергії, та залежності динаміки зміни технічних втрат за час експлуатації елементів систем електропостачання а також розробка класифікації заходів щодо зниження втрат електроенергії у системах електропостачання. В результаті проведеного аналізу встановлено, що зміна технічних втрат визначається постійною зміною конфігурації мереж, внаслідок їхньої реконструкції та змін умов і інтенсивності експлуатації, а також технічного стану елементів систем електропостачання за час експлуатації.*

**Ключові слова:** системи електропостачання, втрати електроенергії, умови експлуатації елементів систем електропостачання, лінії електропостачання, економія електроенергії.

### ВСТУП

Задача зниження рівня втрат електроенергії є важливою складовою частиною більш загальної задачі зменшення енергоспоживання і ефективного використання енергетичних ресурсів на основі оптимізації балансів споживання і вироблення електричної енергії. Існуючі на сьогоднішній день методи аналізу балансів в основному базуються на методі експертних оцінок, так як для цього використовується тільки невелика частина достовірної інформації – споживання енергосистеми в цілому [1], вироблення енергії електростанціями і потоки енергії по «зовнішнім» перетокам.

З початком реформування енергетики України (з середини 90-х років) створилися самостійні суб'єкти халянування. Вони в теперішній час експлуатують об'єкти енергетики, які були спроектовані і побудовані без урахування технічних вимог стосовно роботи систем обліку електроенергії в умовах функціонування енергоринку. В теперішній час майже повсюди спостерігається зріст абсолютних і відносних втрат електроенергії. За даними Мінпаливенерго технологічні витрати на транспортування електроенергії (технічні і комерційні складові втрат) в електричних мережах України складають 19,11 % загального товарного відпуску. В окремих областях України втрати електроенергії досягають 30 %.

Комплекс заходів щодо зниження втрат може бути розділений на три групи :

*режимні* – забезпечення оптимального режиму компенсаторів реактивної потужності, своєчасне переключення відгалужень обмоток трансформаторів РПН, відключення трансформаторів у мережах низької напруги на період малих навантажень;

*організаційні* – скорочення витрати електроенергії на власні потреби підстанцій, удосконалювання обліку електроенергії, контроль за використанням джерел реактивної потужності, впровадження нових програм для аналізу режимів мереж і їх оптимізації з використанням ЕОМ;

*технічні* – введення нових компенсуючих пристроїв, заміна проводів на лініях електропередачі, заміна трансформаторів і автотрансформаторів, автоматизація регулювання напруги.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

У структурі втрат по елементах систем електропостачання основна частина втрат приходить на лінії електропередач (в окремих випадках до 65% [2]). Втрати в трансформаторах складають близько 30 % сумарних втрат у мережі даної ступіні напруги, причому біля половини з них – втрати в сталі. Втрати в інших елементах мережі (у реакторах, компенсуючих пристроях, вимірювальних приладах, трансформаторів струму і напруги) незначні і можуть бути оцінені в межах 3–5 % сумарних втрат. Втрати включають також електроенергію, що витрачається на власні потреби підстанцій. Приблизно 1/4 загальних втрат складають втрати, що практично не залежать від навантаження, так звані умовно-постійні, і 3/4 – умовно-змінні.

Технічному аналізу піддається тільки частина загальних втрат, що називається технічними втратами; інша – приблизно 10 %, так звані комерційні втрати, – зв'язана з недосконалістю системи обліку електроенергії. В умовах паралельної роботи енергосистем виникає необхідність передачі визначеної кількості електроенергії транзитом через мережі енергосистеми. При цьому мають місце додаткові втрати електроенергії, зв'язані з транзитними перетоками. Також на величину втрат електричної енергії в елементах системи електропостачання впливає ряд технічних і експлуатаційних факторів, у тому числі характеристики навантаження, стан і рівень зносу електротехнічного устаткування, термін і інтенсивність його експлуатації.

Згідно даних енергослужб спостерігається значне перевищення реальних значень втрат електроенергії при передачі її по електричних мережах порівняно з нормативним. Це обумовлено тим, що при експлуатації систем електропостачання технічний стан елементів електрообладнання погіршується через їх знос та старіння внаслідок впливу факторів середовища в умовах яких вони працюють (кліматичних, механічних, режимних, електромагнітних та ін.). Старіння та інтенсивний знос елементів СЕП у багатьох випадках не тільки знижують їхню надійність, але викликають додаткові втрати електричної енергії. Це особливо характерно для електроус-

таткування, що знаходиться в експлуатації тривалий період і у випадках несвоєчасного чи неякісного проведення планового технічного обслуговування.

Усе це обумовлює динаміку складових технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання при її транспортуванні та розподілі. Тому метою дослідження є проведення аналізу методів та засобів зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання для підвищення ефективності електропостачання.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

*Класифікація і структура втрат електроенергії.* Однією з характерних особливостей функціонування електричних систем є те, що в кожний момент часу існує точний баланс для активної та реактивної енергії і потужності. Транспортування і перетворення електричної енергії завжди відбувається з витратами самої енергії. Внаслідок цього деяка її частина витрачається на транспортування по лініях електропередач і перетворення в трансформаторах. Для більш чіткого розуміння фізичних явищ, що відбуваються в електричних мережах, поряд з виразом «втрати електроенергії», широко вживається термін «витрати електричної енергії в електричних мережах на її транспортування», «транспортні витрати електроенергії» або «технологічні витрати електроенергії». Рівень цих втрат визначається кількістю переданої енергії, параметрами проводів і трансформаторів, рівнями напруг у центрах живлення, наявністю пристроїв компенсації реактивної потужності – тобто технічним станом мереж і рівнем їх експлуатації. Для скорочення цей вид втрат в подальшому буде називатися технічними втратами і означати витрати електроенергії в елементах мереж при її передачі, розподіленні і перетворенні.

Існують різні класифікації заходів по зниженню втрат електроенергії [3], але усі вони базуються на економічних критеріях, які можуть визначати розподіл заходів на групи і не відображають співвідношення між витратами на заходи і ефектом від їх реалізації. Безвитратні заходи часто потребують для свого виконання значних експлуатаційних витрат. Співвідношення між сумою витрат на розрахунки і експлуатаційні витрати на безвитратні заходи з одного боку і вартість зекономленої за їх рахунок електроенергії часто дорівнюють одне одному. Крім того, ці класифікації не враховують ще двох важливих обставин: перша – вплив споживачів (особливо режимів їх роботи) на втрати електроенергії у мережі, друга – роль проектних, науково-дослідних, будівельних і експлуатаційних організацій у розробці і реалізації заходів по зниженню втрат електроенергії.

В роботі запропонована класифікація заходів по зниженню втрат електроенергії, яка ґрунтується на понятті керування, тобто цілеспрямованої дії на параметри електричних мереж і споживачів та режимів їх роботи. Така класифікація відповідає процесу передачі і споживання електроенергії і наведена на рисунку 1.

Згідно зі запропонованою класифікацією дії, тривалістю більше року, спрямовані на глибоку зміну параметрів, елементів і схем мереж, віднесені до групи *заходів по керуванню розвитком мереж*. Заходи тривалістю до року віднесені до групи *заходів по керуванню режимами роботи мереж*.

Значно впливають на режим роботи мереж параметри електрообладнання. Наприклад, істотного зниження умовно-постійних втрат електроенергії можна досягти,

застосовуючи трансформатори зі зменшеними втратами холостого ходу (магнітними втратами) і схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка з нулем».

Додатковим резервом зниження втрат електроенергії є керування розвитком і режимами роботи споживачів.

Заходи по керуванню режимами роботи споживачів виконуються персоналом підприємства, де знаходяться електроустановки, разом з персоналом енергооб'єднання.

Технічні заходи по зниженню втрат електроенергії потребують реконструкції мереж, заміни або встановлення додаткових апаратів, машин та обладнання. Реконструкція мережі передбачає заміну перерізів проводів лінії, переведення ліній на більш високу напругу, скорочення радіуса мережі за рахунок будівництва нових підстанцій. Всі ці заходи потребують капітальних вкладень, що збільшує щорічні витрати на амортизацію і поточний ремонт.

Для визначення економічної ефективності всіх заходів по зниженню втрат електроенергії потрібно порівняти величину зменшення витрат коштів на втрати електроенергії  $\Delta C_e$  з величиною збільшення витрат коштів на амортизацію і обслуговування  $\Delta C_a$ . Але заходи по зниженню втрат потребують початкових витрат коштів  $K$ . Якщо величина зниження коштів на втрати електроенергії буде більшою від величини збільшення витрат коштів на амортизацію і обслуговування, то щорічні витрати  $\Delta C$  коштів на експлуатацію будуть менші після впровадження заходів по зниженню втрат електроенергії. Зменшення щорічних витрат коштів повинно бути таким, щоб початкові витрати окупились за строк менший, ніж нормативний строк окупності капітальних вкладень  $T_o$ . Строк окупності капітальних вкладень  $T_o$  – це час, протягом якого зменшення щорічних витрат коштів досягне розміру капітальних вкладень, які зумовили економію щорічних витрат коштів. Отже, строк окупності можна визначити за формулою:

$$T_o = \frac{K}{\Delta C} = \frac{K}{\Delta C_e - \Delta C_a}$$

В теперішній час в енергетиці встановлено нормативний строк окупності – 8,3 року.

Норма амортизаційних відрахувань та норми сумарних щорічних відрахувань від капітальних вкладень приймають згідно з нормативними документами; питомі витрати коштів на втрати електроенергії визначають залежно від економіко-географічної зони розміщення мережі, елемента мережі, режиму роботи споживачів за відповідними інструктивними документами.

На практиці розглядають декілька варіантів заходів зменшення втрат електричної енергії. Після цього вибирають найбільш ефективний варіант, що має найменшу величину приведених витрат. Він повинен мати строк окупності менше нормативного строку окупності капітальних вкладень. Цей варіант є оптимальним.

Оптимальний варіант має найменші зведені втрати електричної енергії. Економічно обґрунтовані втрати – це частина приведених втрат електричної енергії, яка відповідає дійсним.

Загальна методика виконання робіт по обґрунтуванню розрахункових рівнів втрат електроенергії складається зі збирання даних для проведення розрахунків втрат

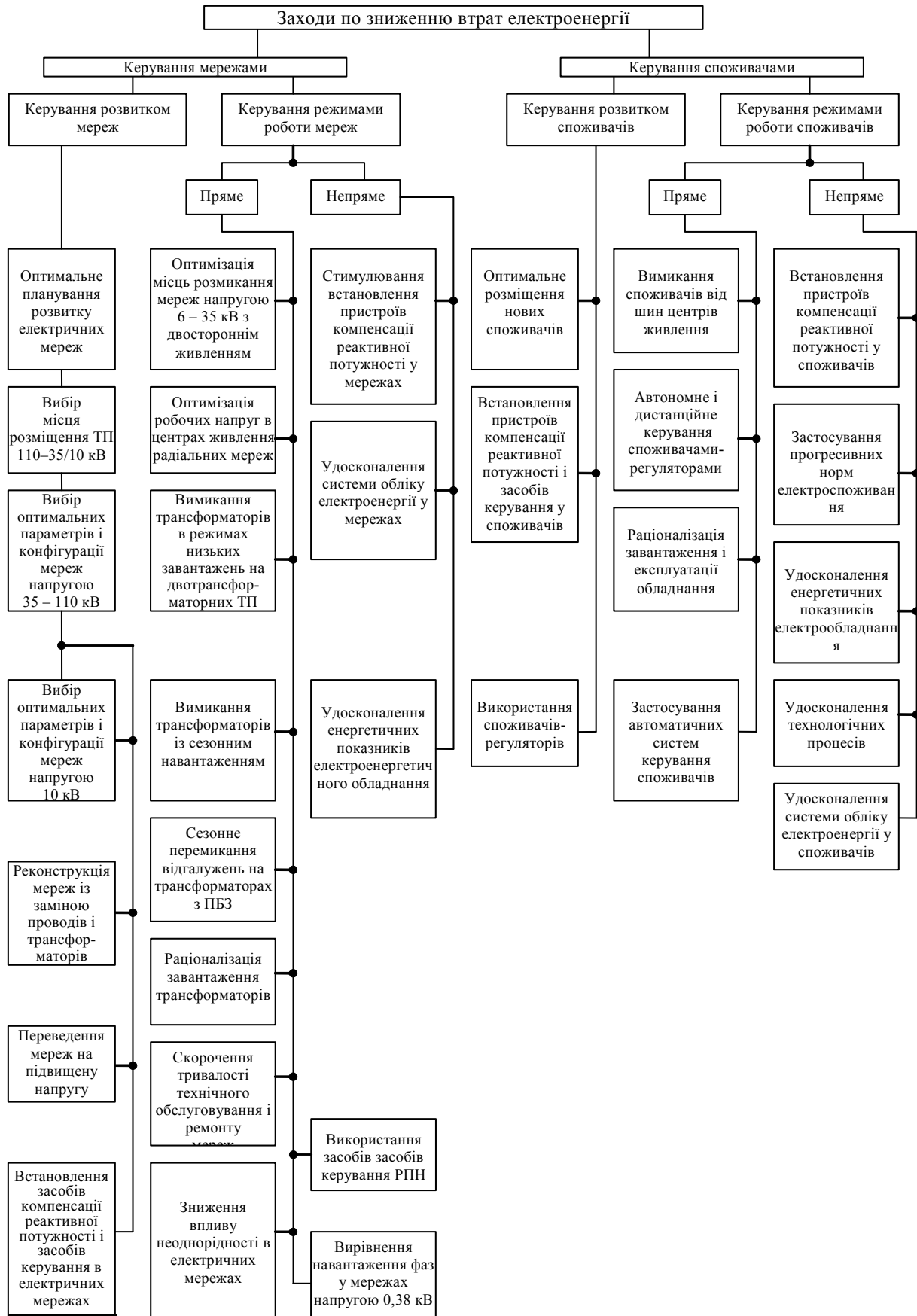


Рисунок 1 – Класифікація заходів по зниженню втрат електроенергії

електроенергії та аналізу роботи мережі; визначення втрат електроенергії в елементах мережі; вибору заходів по зниженню втрат електричної енергії; визначення початкових витрат коштів на здійснення заходів по зниженню втрат електричної енергії та величину втрат електричної енергії після впровадження заходів; порівняння приведених витрат і визначення заходів, які мають найменші приведені втрати.

У мережах, спроектованих за мінімумом приведених витрат коштів з врахуванням обмежень за умов забезпечення якості електроенергії і надійності електропостачання, рівень втрат електроенергії вважається економічно обґрунтованим, тобто оптимальним. Для визначення цього рівня використовують розрахунки, результати яких наведені у таблиці 1.

Характерною ознакою цих розрахунків є інтервальна оцінка як оптимальних втрат електроенергії, так і показників роботи мережі. Наприклад, загальні втрати у мережі напругою 10 кВ можуть знаходитись у межах 3,1–6,5 % із середнім значенням 4 % [4]. Втрати електроенергії на ділянці віднесені до пропущеної через неї енергії, не перевищують 0,14 %/км, а на магістральних ділянках – 0,1 %/км. Для визначення економічної доцільності використання різних заходів по зниженню втрат електроенергії необхідно аналізувати їх величину і співвідношення у різних елементах мережі і показники роботи мережі (максимальні сили струмів, потужність, максимальні і мінімальні рівні напруги). Доцільність заміни трансформаторів визначають за співвідношенням умовно-постійних втрат і втрат від навантаження, яке в оптимально-завантажених трансформаторах знаходиться у межах 0,4–2,5. Оптимальний ступінь компенсації реактивної потужності (співвідношення встановленої потужності конденсаторних батарей до максимального реактивного навантаження) для споживчих трансформаторів – 0,7, для сезонних споживачів – 0,4, на шинах центра живлення – 0,5, що відповідає коефіцієнту потужності 0,92–0,93. На шинах напругою 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ оптимальний коефіцієнт потужності дорівнює 0,95.

Під час аналізу втрат слід мати на увазі, якщо в їх структурі переважають втрати в проводах повітряних ліній (70–80 % від загальних втрат у мережі) і втрати на головних ділянках лінії становлять 40–50 % від загальних втрат, то це свідчить про перевантаження мережі; якщо в струк-

турі втрат переважають втрати холостого ходу трансформаторів (80–90 % від загальних втрат в мережі та 90–95 % від загальних втрат у трансформаторах), то це вказує на незадовільну експлуатацію трансформаторів.

Найбільш поширеним напрямом економії електроенергії є зниження втрат електроенергії в елементах системи електропостачання: у силових трансформаторах усіх ступіней напруги, у лініях електричної мережі, у реакторах, в установках реактивної потужності, що компенсують. Великі різнобічні можливості економії електроенергії реалізуються заходами, які можна розділити на конструктивні й експлуатаційні.

До конструктивних заходів відносяться посилення мережі шляхом введення нових кіл електроживлення, заміна декількох трансформаторів більш потужним, заміна раніше обраних проводів ліній проводами більшого перетину, установка компенсуючих пристроїв біля електроприймачів для розвантаження мережі від реактивної потужності і для підвищення рівнів напруги мереж наступних ступенів номінальної напруги: 380 на 660В, 6 на 10 кВ, 10 на 20 кВ [5].

Експлуатаційні заходи щодо зниження втрат, як заходи, що не вимагають додаткових капіталовкладень, повинні здійснюватися в першу чергу. У розподільних мережах промислових підприємств застосовується глибоке секціонування при роздільній роботі секцій шин розподільних пунктів на всіх рівнях напруги розподільної мережі. При такій схемі виникає нерівномірність навантаження в лініях і трансформаторах, різниця напруг на секціях і в результаті – додаткові втрати потужності. Для зменшення цих втрат необхідно перевіряти і забезпечувати рівномірність навантаження секцій. Для перевірки рівномірності на практиці застосовують короткочасне включення секцій на паралельну роботу включенням секційних вимикачів. Переключаючи в мережах навантаження з більш завантаженої секції на менш завантажено, домагаються зниження струму який протікає через секційний апарат до мінімуму.

Втрати електроенергії в лініях електричної мережі складають значну частину сумарних утрат у всій системі електропостачання. Одним із заходів щодо зменшення втрат у лініях є включення в роботу всіх ліній: у схемі не повинно бути ліній тільки резервних.

Рекомендується включення трансформаторів на постійну паралельну роботу при наявності технічної мож-

Таблиця 1 – Оптимальне значення втрат електроенергії у мережах напругою 10 кВ

Показники	Структура показника	Значення показників		
		Мінімальні	Середні	Максимальні
Втрати електроенергії, % до відпуску електроенергії у мережу	Загальні	3,1	4	6,5
	У лініях	0,1	1,2	3,9
	У трансформаторах	2,5	2,9	3,2
Втрати електроенергії, % до загальних втрат у мережі	Від навантаження у лініях	3,5	30	62
	Від навантаження у трансформаторах	15,9	26	43,6
	Умовно-постійні у трансформаторах	21	44	67,3



ливості такої роботи зі струму КЗ і за умовами роботи захисту, це розглядається як дієвий метод щодо зниження втрат електроенергії і поліпшення якості електроенергії.

Важливим заходом щодо економії втрат в електромережах є своєчасне відключення в резерв трансформаторів підстанцій при зниженні їхнього навантаження і включення при зростанні навантаження.

Трансформатори трансформаторних підстанцій зазвичай зв'язані попарно через перемички і секційні автоматичні вимикачі, що вимагає їх експлуатацію в економічному режимі. Цей режим визначає кількість одночасно ввімкнених трансформаторів при умові мінімальних втрат електроенергії, що можливо у тому випадку, коли навантаження в підстанції може бути забезпечене роботою не всіх, а тільки частини трансформаторів. При цьому зменшуються умовно-постійні втрати у трансформаторах (втрати в сталі) але зростають втрати від навантаження (втрати в міді). Визначимо, при якому навантаженні доцільно залишати в роботі один трансформатор, а другий відключити в резерв. Це визначається величиною граничної потужності яка відповідає співвідношенню

$$S_{зр} = S_{ном} \sqrt{\frac{2P_0}{P_{кз}}}$$

де  $P_0$  та  $P_{кз}$  – відповідно втрати холостого ходу та короткого замикання трансформатора;  $S_{ном}$  – номінальна потужність трансформатора.

Для зниження втрат електричної енергії в лініях електропередач проводи замінюють тоді, коли витрати коштів окуповуються за рахунок зменшення втрат електричної енергії. При заміні площі поперечного перерізу проводу на більший [6] існує економічний інтервал потужності, в межах якого це виконувати економічно доцільно. Економічний інтервал визначають тільки величиною капітальних вкладень на заміну проводу та опорів існуючого і проводу, на який роблять заміну. Довжина інтервалу та його положення серед інтервалів потужності для інших площ поперечних перерізів залежить від вартості заміни проводів та втрат електричної енергії, напруги лінії, коефіцієнта зростання навантаження, опору проводу, часу втрат. На наявність економічних інтервалів не впливає вартість існуючих ліній до заміни проводу.

Замінювати площі поперечних перерізів проводів на лініях електропередачі більшими можна при додержанні таких умов:

- механічна напруга на нових проводах та стріла провисання не повинні перевищувати допустимі;
- навантаження на опорі після заміни проводів не повинно перевищувати розрахункові.

При заміні проводами з такого ж матеріалу перша умова виконується сама собою, тому що із збільшенням площі поперечного перерізу, як правило, розрахункові прольоти, що відповідають максимальним допустимим напругам, збільшуються.

Проміжні та спеціальні опори розраховані на підвищення кількох марок проводів і, якщо існуючі проводи мають меншу площу поперечного перерізу, ніж граничний провід для цього типу опор, то друга умова виконується.

Якщо конструкція проміжної опори не витримує навантаження намічених проводів, то заміна їх неможлива. У випадку, коли проміжні опори без посередньо або після їх деякої реконструкції можуть витримати навантаження підвищуваних проводів, заміна дозволяється.

При розробці проекту заміни проводів треба враховувати реальний стан лінії та строк служби.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу встановлено, що зміна технічних втрат визначається:

- постійною зміною конфігурації мереж, внаслідок їхньої реконструкції;
- змінами умов і інтенсивності експлуатації, а також технічного стану елементів систем електропостачання за час експлуатації. Останнє обумовлено тим, що при експлуатації систем електропостачання технічний стан елементів електрообладнання погіршується через їх знос та старіння внаслідок впливу факторів середовища в умовах яких вони працюють (кліматичних, механічних, режимних, електромагнітних та ін.). Старіння та інтенсивний знос елементів СЕП у багатьох випадках не тільки знижують їхню надійність, але й викликають додаткові втрати електричної енергії. Це особливо характерно для електроустановок, що знаходяться в експлуатації тривалий період і у випадках несвоєчасного чи неякісного проведення планового технічного обслуговування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кудрин Б. И., О потерях электрической энергии та мощности в электрических сетях // Энергетика. – 2003. – №2. – С.3
2. Шкрабець Ф.П. Класифікація і структура втрат електроенергії / Ф.П. Шкрабець, Ю.В. Куваєв, Д.В. Ципленков, П.Ю. Красовський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3(32). – 2005. – С.122–124.
3. ГНД 34.09.204-2004. Методичні вказівки з аналізу технічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження / М-во палива та енергетики України. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2004. – 159 с.
4. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
5. Шкрабець Ф.П. Эксплуатационная динамика потерь электроэнергии в системах электроснабжения: монография / Ф.П. Шкрабець, П.Ю. Красовский; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д. НГУ, 2015. – 152 с.
6. Pavlo Krasovskiy. Operating dynamics of parameters and technical losses in the components of power supply systems / P. Krasovskiy, D. Tsypnenkov, O. Nesterova // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems. – London: Taylor & Francis Group, UK, 2013. – P. 113–119.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2015  
Після доробки 2.06.2015

Цыпленков Д. В.<sup>1</sup>, Красовский П. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>Ассистент кафедры возобновляемых источников энергии, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

**МЕТОДЫ И СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Целью данной работы является установление факторов, влияющих на изменение технических потерь электроэнергии, и зависимости динамики изменения технических потерь за время эксплуатации элементов систем электроснабжения. Это позволит разработать более точные методы определения потерь электроэнергии и рассчитать реальные значения технических потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения, эксплуатируемых в течение значительного срока. В результате проведенного анализа установлено, что изменение технических потерь определяется постоянным изменением конфигурации сетей, в результате их реконструкции и изменениями условий и интенсивности эксплуатации, а также технического состояния элементов систем электроснабжения за время эксплуатации.*

**Ключевые слова:** системы электроснабжения, потери электроэнергии, условия эксплуатации элементов систем электроснабжения, линии электроснабжения, экономия электроэнергии.

Tsyplenkov D. V.<sup>1</sup>, Krasovskiy P. Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. assistant professor of renewable energy sources department, National Mining University, Ukraine

<sup>2</sup>Assistant of renewable energy sources department, National Mining University, Ukraine

**METHODS AND MEANS OF TECHNICAL LOSSES REDUCTION OF ELECTRICITY IN THE ELEMENTS OF POWER SUPPLY SYSTEMS**

*The aim of the work is to determine the factors that influence the change of electricity technical losses and the dynamics of power losses change depending on the exploitation term of the elements of power supply systems. This will allow to develop more accurate methods for determining the electric energy losses and calculate the real value of the power losses in the elements of the power supply system that have been operated for a long time. The task of electricity losses reduction is an important part of the more general problem of reducing energy consumption and efficient use of energy resources through the optimization of consumption and power generation.*

*In the context of continuous growth of power rates and change of energy consumption, the energy saving and rational management of the power economy get the great importance and present not only engineering problem, but also the economic problem. Hence the need to reduce non-productive energy losses and improve the technical operation of power supply system appears. Currently, much attention is paid to the electric energy losses reduction through the development of more accurate methods of the energy losses determination in all elements of power systems.*

*The analysis shows that the change of power losses is determined by changing of the permanent electric networks reconfiguration as a result of their reconstruction and changes in the conditions and frequency of use, as well as the technical state of the elements of power supply systems during the operation.*

**Keywords:** power supply systems, electric energy losses, operating conditions of the elements of power-supply systems, power-supply lines, electric energy savings.

**REFERENCES**

1. Kudrin B. I., O poteryah elektricheskoi energii ta moshchnosti v elektricheskikh setyah. Energetika, 2003, No 2, P.3.
2. Shkrabets F. P., Kuvaev Yu. V., Tsyplenkov D. V., Krasovskiy P. Yu. Klyasifikatsiya i struktura vtrat elektroenergii. *Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politechnogo universytetu*. Vyp. 3(32), 2005, P. 122–124.
3. GND 34.09.204-2004. Metodichni vказivki z analizu tehnologichnyh vytrat elektroenergii ta vyboru zahodiv schodo ih znyzhennya. M-vo palyva ta energetyky Ukrainy, Ofits. Vyd, Kiev, GRIFRE: M-vo palyva ta energetyky Ukrainy, 2004, 159 p.
4. Kazantseva V. N. Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyah energosistem. Moscow, Energoatomizdat, 1983, 368 p.
5. Shkrabets F. P. Krasovskiy P. Yu. Eksploatatsionnaya dinamika poter elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya: monografiya. M-vo obrazovaniya i nauki Ukrainyi, Nats. gorn. un-t, D. NGU, 2015, 152 p.
6. Pavlo Krasovskiy. Operating dynamics of parameters and technical losses in the components of power supply systems. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems, London: Taylor & Francis Group, UK, 2013, P. 113–119.

## АНДРИЕНКО ПЕТР ДМИТРИЕВИЧ К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Андриенко Петр Дмитриевич родился 26 апреля 1940 года в поселке Хадженково Донецкой обл. После окончания средней школы с серебряной медалью в 1957 году поступил в Одесский политехнический институт (ОПИ) на электротехнический факультет. Учась в университете, Петр Дмитриевич активно занимался вольной борьбой – был чемпионом Одесской области. В дальнейшем спортивная закалка и волевой характер помогли юбиляру в различных жизненных ситуациях.

По окончании института Андриенко П. Д. в 1962 году распределен во Всесоюзный институт трансформаторостроения (ВИТ, г. Запорожье). В связи с образованием СКБ полупроводниковой техники (В дальнейшем – НИИ «Преобразователь») на базе ВИТ, в 1965 году перешел на работу в СКБ на должность старшего инженера. С 1965 по 1967 г.г. заочно заканчивает в ОПИ факультет «Автоматики и телемеханики» по специальности «Промышленная электроника».

С 1965 по 2012 г.г. прошел путь от старшего инженера, зав. лабораторией, начальника отдела, заместителя директора, директора (председатель правления Всесоюзного научно-исследовательского института «НИИ «Преобразователь» (ОАО НИИ «Преобразователь»). За указанный период создана мощная научная школа по исследованию, разработке и внедрению в производство устройств силовой электроники.

Наиболее значимые разработки, выполненные при непосредственном участии и под руководством Андриенко П. Д.:

– крупнейшие в СССР серии : тиристорных агрегатов АТ, АТР, АТВ мощностью до 1000 кВт для электроприводов постоянного тока, преобразователей частоты и электроприводов серий ТПЧ, ЭКТ, ЭКТР, ЭКТ1 мощностью до 500 кВт.

За годы независимости Украины созданы более 10 новых типов преобразователей для электротранспорта, электротехнологии и электропривода, в т.ч.:

– высоковольтный частотно-регулируемый электропривод для насосных станций

магистрального аммиакопровода «Тольятти – Одесса», мощностью 2000 кВт, 6 кВ;

– преобразователи для первых в СНГ дизель-поездов типа ДЕЛ02 с электропередачей с асинхронным двигателем;

– тяговые выпрямители для украинского электровоза ВЛ-40У;

– новые источники питания для выращивания кристаллов сапфира, кремния, переработки ядерных отходов и др.

Все разработки имели высокий технический уровень новизны. По результатам работ получены более 90 авторских свидетельств и патентов. За изобретательскую электроприводов», защищенной в 1971 г. в специализированном совете ОПИ по специальности 05.09.03, и докторской диссертации «Тиристорные преобразователи частоты на базе автономных инверторов для электропривода», защищенной в 1988 г. в специализированном совете ИЭД АНУ по специальности 05.09.12.



С 2006 г. Петр Дмитриевич – действительный член транспортной академии Украины. Он является председателем Украинского технического комитета МЭК ТК-32 «Силовые преобразователи».

Андриенко П. Д. – автор более 200 научных трудов, в т.ч. 4 монографий, 90 авторских свидетельств и патентов; член редколлегии 3-х научно-технических журналов: «Электротехника и электроэнергетика», «Электромеханические и компьютерные системы», «Электрификация транспорта»; член специализированного совета по защите кандидатских диссертаций по специальности «Подвижной состав и тяга поездов» (ДНДЦ «Укрзалізниця»).

Большое внимание Петр Дмитриевич уделяет подготовке кадров. С 1972 г. по настоящее время работал доцентом, с 1990 г. – профессором, заведующим кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, с 2012 г. – заведующим кафедрой «Электрические и электронные аппараты» ЗНТУ, одновременно совмещая работу зам. генерального директора, директора по науке ООО «НИИ «Преобразователь».

Под его руководством защищены 1 докторская и 7 кандидатских диссертаций.

За плодотворную работу Андриенко П. Д. награжден Орденом Трудового Красного Знамени (1982 г.), орденом «За заслуги III степени» (1998 г.), медалью «Ветеран труда» (1987 г.), Почетной грамотой Запорожской областной рады (2010 г.).

С юбилеем Вас, дорогой Петр Дмитриевич! Желаем новых успехов в работе, творческих поисков и дальнейшего развития, семейного благополучия и крепкого здоровья. Многии Вам лета!

*Ректорат ЗНТУ,  
деканат электротехнического факультета,  
кафедра «Электрические и электронные аппараты»,  
редколлегия журнала «Электротехника и электроэнергетика», студенческое самоуправление  
электротехнического факультета*

## ПРОФЕСОР МЕТЕЛЬСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ПЕТРОВИЧ (ДО 75-РІЧЧЯ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ)

Народився 28 січня 1940 року на станції Омелянівка Коростенського району Житомирської області в робочій сім'ї. В 1958 році з відзнакою закінчив Житомирський будівельний технікум і був направлений на роботу в Смільчинський райміжколгоспбуд технічним керівником. З жовтня 1959 року по серпень 1962 року строкова служба в лавах Радянської армії. З вересня 1962 року по грудень 1967 року студент електротехнічного факультету Запорізького машинобудівного інституту, після закінчення якого отримав спеціальність інженера електрика. З грудня 1967 року до теперішнього часу Метельський Володимир Петрович пройшов життєвий трудовий шлях від старшого інженера наукового сектору, асистента, старшого викладача, доцента, до декана, професора, завідувача кафедрою «Електропостачання промислових підприємств» Запорізького машинобудівного інституту імені В.Я.Чубаря (сьогодні Запорізький національний технічний університет (ЗНТУ)).

Електротехнічний факультет ЗНТУ, яким професор В.П. Метельський керує понад 35 років, є потужною структурою університету, на денній та заочній формі якого навчається близько 2000 студентів. Факультет об'єднує 7 кафедр, 4 з яких є профільюючими і успішно готує бакалаврів, спеціалістів і магістрів за шістьма спеціальностями (дві нові спеціальності «Енергетичний менеджмент» і «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» відкрито під час роботи Метельського В.П. на посаді декана). Впродовж останніх десяти років електротехнічний факультет є одним з найкращих в університеті з питань прийому, підготовки і випуску висококваліфікованих інженерних кадрів і подальшого розвитку електроенергетики для Запорізького регіону. Декан В.П. Метельський завжди має активну життєву позицію в навчальній та науковій роботі, студентському самоврядуванні. Професор В.П. Метельський значну увагу приділяє видавничій, навчальній та науково-методичній роботі. Він є автором 4 монографій, 2 навчальних посібників, понад 30 методичних розробок, має 12 авторських свідоцтв на винаходи, 2 патенти, 155 наукових публікацій у фахових журналах, підготував 5 кандидатів технічних наук, є членом редакційної колегії наукового журналу «Електротехніка і електроенергетика», що входить до переліку фахових видань України.

Сумлінна праця ювіляра відзначена чисельними урядовими та галузевими нагородами, а саме: Почесне звання «Заслужений працівник» освіти України, нагрудними знаками: «Відмінник освіти» України, «Петро Могила», Знаками ЗНТУ «За бездоганну працю» I, II, III ступенів.



Він нагороджений почесною грамотою Верховної Ради України, орденами: «За заслуги перед Запорізьким краєм» I, II, III ступенів.

В.П. Метельському вручено золоту медаль «За ефективне управління», ювілейну медаль «За розвиток Запорізького краю» за вагомі внески у розвиток Запорізької області, медаль «Ветеран труда» СРСР та «Ветеран праці» України. Ювіляр неодноразово нагороджений почесними грамотами Запорізької обласної, міської та районної ради.

Володимир Петрович користується великим авторитетом та повагою серед колег та студентів. Свої знання та досвід він щоденно щедро передає молоді. Колеги і студенти глибоко поважають Володимира Петровича, щиро вітають з ювілеєм, бажають йому щастя, здоров'я і натхнення для творчої праці!

Володимир Петрович – «Так тримати!»

*Ректорат ЗНТУ,  
деканат Електротехнічного факультету,  
кафедра «Електропостачання промислових підприємств»,  
редколегія журналу «Електротехніка і електроенергетика»,  
студентське самоврядування Електротехнічного факультету*

# ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Електротехніка та електроенергетика» призначений для публікації найбільш значимих наукових і практичних результатів досліджень учених вищих навчальних закладів і наукових організацій.

Журнал включений у перелік наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук (радіофізика).

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНПІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>). Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Журнал видається двічі на рік і розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Для розгляду питання про публікацію статті до редакції журналу необхідно вислати поштою або представити особисто наступне:

- 1) рукопис (роздруковку) статті, підписаний на останній сторінці всіма авторами, в двох примірниках;
  - 2) відомості про авторів (українською, російською, англійською мовами);
  - 3) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;
  - 4) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);
  - 5) рецензію від фахівця в даній галузі з вченим ступенем доктора наук. Підпис рецензента обов'язково мусить бути завіреним.
- 6) диск з наступними файлами:
- електронна версія статті, повністю ідентична роздруковці;
  - відомості про авторів;
  - рисунки у графічному форматі .tif.

Файли з матеріалами статті можна надіслати електронною поштою або передати особисто на оптичному диску або USB-накопичувачі.

**Вимоги до оформлення статті.** Приймаються статті, набрані в редакторі Microsoft Word.

Параметри сторінки:

- розмір паперу – А4 (210x297);
- орієнтація – книжкова;
- шрифт – Times New Roman, розмір – 12 pt;
- міжрядковий інтервал – полуторний;
- верхнє поле – 20 мм, нижнє – 20 мм, ліве – 25 мм, праве – 15 мм.

Сторінки рукопису повинні бути пронумеровані. Не допускаються розбіжності рукопису з електронною версією статті. Текст рукопису не повинен мати рукописних виправлень та позначок.

**Послідовність розміщення матеріалу статті:**

- 1) індекс УДК;
- 2) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова мовою статті;
- 3) текст статті;
- 4) список літератури;
- 5) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова російською мовою (якщо мова статті – українська) або українською (якщо мова статті – російська);
- 6) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова англійською мовою;
- 7) транслітерованій список літератури.

**Анотації** повинні бути інформативними, змістовними (відбивати основний зміст статті та результати досліджень) та структурованими (відбивати логіку опису результатів у статті). **Рекомендований обсяг україномовної та російськомовної анотації приблизно 50 слів, англійськомовної – 100–150 слів (вимоги науково-метричної бази SCOPUS).**

**Ключові слова** наводяться в називному відмінку у кількості до десяти слів.

**Текст статті.** Приймаються статті російською, українською та англійською мовами. Розмір статті до 0,5 авторського аркуша. У статті слід уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Стаття не повинна мати граматичних або інших помилок, а також повинна відповідати тематиці журналу й вимогам щодо фахових видань.

**Структура** тексту статті мусить містити такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато розв'язання даної проблеми, і на які опирається автор; виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки по даному дослідженню й перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Матеріал публікації мусить бути розбитий на підрозділи не більше двох рівнів.

**Рисунки** розміщуються в тексті й додатково додаються в окремих файлах (формат .tif з роздільною здатністю 150–300 dpi, чорно-білі або у градаціях сірого). Розмір рисунків не повинен перевищувати ширини сторінки (17 см) або ширини колонки (8 см). Написи на рисунках бажано виконувати шрифтом Times New Roman, розмір 10. Рисунки нумерують і підписують унизу.

**Формули** виконуються за допомогою вбудованого в Word редактора Microsoft Equation. Формули нумерують у круглих дужках праворуч. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

**Нумерація** рисунків, формул і таблиць наскрізна однорівнева.

**Список літератури** наприкінці статті подається мовою оригіналу і складається в порядку згадування посилань у тексті й відповідно до діючого стандарту на бібліографічний опис. Посилання на літературу в тексті нумеруються послідовно й позначаються цифрою у квадратних дужках.

**Транслітерований список літератури**, відповідно до вимог науково-метричної бази SCOPUS, є повним аналогом списку літератури і виконується на основі транслітерації мови оригіналу латиницею.

Посилання на англійські джерела не транслітеруються. Транслітерація української мови латиницею виконується на основі Постанови КМУ №55 від 27 січня 2010 р., російської – на основі ГОСТ 7.79-2000 (ISO 9-95). Приклади транслітерації розміщені на сайті журналу.

У **відомостях про авторів** необхідно навести:

- 1) прізвище, ім'я, по батькові (повністю);
- 2) учений ступінь;
- 3) посаду;
- 4) місце роботи;
- 5) електронну адресу;
- 6) робочий, домашній, мобільний телефони.

Статті, які не відповідають зазначеним вимогам, не приймаються до розгляду.

Всі статті проходять закриті рецензування і в разі потреби можуть бути повернуті автору на доробку. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію тексту статті без повідомлення автору.

Рукописи й диски не вертаються, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються.

**Адреса редакції:** 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу  
Тел. (061) 7-698-2-96 – редакційно-видавничий відділ.  
E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

Наукове видання

## **Електротехніка та електроенергетика №1/2015**

науковий журнал

Головний редактор      д-р техн. наук  
Заст. гол. редактора      д-р техн. наук

Орловський І. А.  
Тиховод С. М.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Комп'ютерна верстка  
Редактор англійських текстів

Дяченко О. О.  
Войтенко С. В.

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 6905 від 29.01.2003.

Підписано до друку 15.06.2015. Формат 60×84/8. Ум. др. арк. 10,0  
Тираж 300 прим. Зам. № 631  
69063 м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 2394 від 27.12.2005.