

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

# ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ  
XXVIII МІЖНАРОДНОГО СИМПОЗИУМУ  
SIEMA'2025

30 - 31 ЖОВТНЯ 2025 р.  
УКРАЇНА, ХАРКІВ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ,  
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

**Наукове видання**

**Тези доповідей  
XXVIII МІЖНАРОДНОГО СИМПОЗИУМУ  
SIEMA'2025**

**30 - 31 жовтня 2025 р.**

**Україна, Харків**

**УДК 621.31(063)**

**П 78**

Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХП»

(Протокол № 12 від 28.11.2025 р.)

Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки [Електронне видання] : тези доповідей XXVIII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2025, 30 - 31 жовтня 2025 р. / уклад.: О. Г. Серeda [та ін.]. Харків: НТУ «ХП», 2025. 102 с.

ISBN 978-617-05-0584-2

До збірника включені тези наукових доповідей учасників симпозіуму «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA'2025). Видання підготовлено кафедрою електричних апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Матеріали збірника публікуються в авторській редакції.

**УДК 621.31(063)**

ISBN 978-617-05-0584-2

© НТУ «ХП», 2025

## ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

### Голова оргкомітету

#### **СОКОЛ Євген Іванович**

ректор НТУ «ХПІ», член - кореспондент Національної академії наук України, лауреат премії ім. С. О. Лебедева НАН України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, д.т.н., проф., (Харків)

### Заступники голови:

#### **МАРЧЕНКО Андрій Петрович,**

проректор НТУ «ХПІ» з наукової роботи, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік АН вищої школи України, д.т.н., проф., (Харків)

#### **ХРИПУНОВ Геннадій Семенович,**

проректор з міжнародних зв'язків, д.ф-м.н., проф., (Харків)

#### **БАЙДА Євген Іванович**

д.т.н., доцент, завідувач кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» (Харків)

### Члени організаційного комітету:

#### **БЕЗПРОЗВАННИХ Ганна Вікторівна**

д.т.н., професор, проф. каф. «Електроізоляційна та кабельна техніка» НТУ «ХПІ» (Харків)

#### **БУРЯКОВСЬКИЙ Сергій Геннадійович**

д.т.н., професор, директор НДПКІ «Молнія» (Харків)

#### **ВИРОВЕЦЬ Сергій Валерійович**

к.т.н., доцент, доцент каф. «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» (Харків)

#### **ГРЕЧКО Олександр Михайлович**

к.т.н., доцент, доцент каф. «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» (Харків)

#### **ЗАГІРНЯК Михайло Васильович**

академік НАПН України, д.т.н., професор, ректор КрНУ ім. М. Остроградського (Кременчук)

#### **КОРИТЧЕНКО Костянтин Володимирович**

д.т.н., професор, зав. каф. загальної електротехніки НТУ «ХПІ» (Харків)

#### **ЛЕЛЮК Микола Анатолійович**

к.т.н., доцент каф. «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» (Харків)

**ЛЮБАРСЬКИЙ Борис Григорович**

д.т.н., професор, зав. каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування»  
НТУ «ХП» (Харків)

**МІЛИХ Володимир Іванович**

д.т.н., професор, проф. каф. «Електричні машини» НТУ «ХП» (Харків)

**МИХАЙЛОВ Валерій Михайлович**

д.т.н., професор, проф. каф. «Інженерна електрофізика» НТУ «ХП» (Харків)

**ПАНТЕЛЯТ Михайло Гаррійович**

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХП» (Харків)

**РОЗОВ Володимир Юрійович**

чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор, головний науковий співробітник  
Інститута енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного  
Національної академії наук України (Харків)

**СЕРЕДА Олександр Григорійович**

д.т.н., доцент, проф. каф. «Електричні апарати» НТУ «ХП» (Харків)

**СЕРЕДА Олена Геннадіївна**

к.т.н., доцент каф. «Електричні апарати» НТУ «ХП» (Харків)

**ТОМАШЕВСЬКИЙ Роман Сергійович**

д.т.н., директор Навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та  
електромеханіки НТУ «ХП» (Харків)

**ЧЕПЕЛЮК Олександр Олександрович**

к.т.н., доцент, доцент каф. «Електричні апарати» НТУ «ХП» (Харків)

**ШЕВЧЕНКО Валентина Володимирівна**

д.т.н., професор, професор каф. «Електричні машини» НТУ «ХП» (Харків)

**ШЕВЧЕНКО Сергій Юрійович**

д.т.н., професор, зав. каф. «Передача електричної енергії» НТУ «ХП» (Харків)



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

## ЗМІСТ

### *Пленарне засідання*

#### **Clemens M., Pantelyat M.G.**

A Round Table Panel Session On “Cem And Multiphysics: In-House Codes Vs. Commercial Software Vs. Open Source Software” During The Siema’2025 International Symposium..... 10

#### **Кузовкін С. Б., Побігайло В. А., Бориченко О. В., Калінчик В. П.**

Сучасні засоби підвищення ефективності функціонування розподільчих електричних мереж..... 11

#### **Толмачов С. Т., Ільченко О. В.**

Деякі проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у контексті енергоефективності..... 12

#### **Чернюк А. М., Васюченко П. В., Подопригора Д. Р.**

Розширення галузі використання фотоелектричних електростанцій шляхом впровадження спрощених технологічних схем з гравітаційними накопичувачами енергії..... 13

#### **Толмачов С. Т., Ільченко О. В.**

Щодо розгортання системи комплексного моніторингу асинхронних двигунів безпосередньо в умовах виробництва..... 14

### *Секція 1. Теоретична електротехніка*

#### **Горкунов Б. М., Львов С. Г., Дем’яненко В. О., Олійник В. М.**

Щодо розгортання системи комплексного моніторингу асинхронних двигунів безпосередньо в умовах виробництва..... 15

#### **Бульдяк Я. А., Горкунов Б. М., Дроздова Т. В.**

Рациональні розміри котушок електромагнітного перетворювача при контролі якості зварювання..... 16

#### **Толмачов С. Т., Ільченко О. В.**

Метод розрахунку магнітного і силового поля у стрижневих фільтрах з двоякоперіодичною структурою..... 17

#### **Розов В. Ю., Кундіус К. Д., Пелєвін Д. Є.**

Магнітне поле вбудованих трансформаторних підстанцій при розкіді струмів навантаження..... 18

#### **Михайлов В. М.**

Еквівалентність магнітостатичних полів циліндричних соленоїдів з тонкого проводу та магнітів..... 19

### *Секція 2. Проблеми теорії і практики електричних машин*

#### **Shevchenko V. V., Lazurenko K. O., Arestova T. V.**

Statistical analysis of turbogenerator failure causes with regard to their design solutions..... 20

#### **Гребеніков В. В., Гамалія Р. В., Дадичін С. А., Попков В. С.**

Підвищення питомих характеристик тягових електродвигунів для міського тролейбуса..... 21

#### **Міліх В. І., Калінін В. О.**

Чисельно-польовий аналіз магнітних втрат в осерді статора асинхронного двигуна..... 22

#### **Михайличенко О. С., Шилкова Л. В., Масленніков А. М.**

Застосування технологій 3d-друку для виготовлення деталей високооборотного синхронного генератора систем автономного електропостачання..... 23



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

<b>Гребеніков В. В., Гамалія Р. В., Попков В. С.</b> Деякі особливості комп'ютерного моделювання циліндричних магнітних редукторів	24
<b>Поляков М. О., Василевський В. В., Барабан О. Д.</b> Аналіз впливу мікротріщин на старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора	25
<b>Дунєв О. О., Єгоров А. В., Корсаков О. Р., Суворін Д. В.</b> Оптимізація конструкції транслятора лінійного генератора з поперечним магнітним потоком для зменшення гальмівних зубцевих сил зчеплення	26
<b>Мазуренко Л. І., Шихненко М. О., Джура О. В., Білик О. А.</b> Вентильно-індукторні двигуни тягового електроприводу залізничного транспорту	27
<b>Суржик В. В., Заблодський М. М.</b> Спосіб оцінки економічного ефекту від впровадження РМ двигунів ІЕ5 для насосних агрегатів в системах водопостачання	28
<b>Заблодський М. М., Бабак Д. О.</b> Система дистанційного моніторингу стану заглибного електромеханічного перетворювача на основі обертового трансформатора	29
<b>Василів К. М., Мазуренко Л. І.</b> Математична модель автономної енергоустановки на базі асинхронного генератора з двома обмотками на статорі і вентильною системою збудження	30
<b>Чернюк А. М., Войтенко С. М., Колесников А. В.</b> Визначення робочих характеристик двигуна постійного струму, який працює у складі гравітаційного накопичувача енергії фотоелектричної електростанції	31
<b>Шайда В. П., Юр'єва О. Ю.</b> Напрями світових досліджень з розвитку електричних машин	32
<b>Секція 3. Проблеми теорії і практики електричних апаратів</b>	
<b>Байда Є. І.</b> Особливості розв'язання електромеханічних задач за допомогою рівнянь Лагранжа	33
<b>Стрункін Г. М., Шамрай А. Є.</b> Бездуговий вимикач постійного струму надшвидкої дії	34
<b>Гречко О.М., Бугайчук В. М.</b> Експериментальне дослідження умовності спрацьовування топких запобіжників для захисту вимірювальних трансформаторів середньої напруги	35
<b>Катречко В. В., Вінніков Д. В., Озеров О. М., Ткачов В. І., Мануйленко О. В.</b> Напівпровідникові детектори для вимірювання НВЧ потужності на імпульсних прискорювачах: можливості та обмеження	36
<b>Zorin Y. Y., Chepelyuk O. O.</b> Single-phase voltage control relay for protection of household consumers with adaptive characteristics based on machine learning algorithms	37
<b>Милашич А. В., Чепелюк О. О.</b> Аналіз математичних моделей термісторів для систем температурного захисту асинхронних електродвигунів напругою до 0,66 кВ	38
<b>Leliuk M. A., Lytvynenko V. V., Sereda O. Hr., Sereda O. Hen., Zinchenko V. O.</b> Features of modelling the external magnetic field of electrotechnical complexes and systems before and after their compensation	39
<b>Лелюк М. А., Серєда Олександр Г., Серєда Олена Г., Яловенко М. М., Качєєв Ф. О.</b> Пристрій теплового захисту асинхронних електродвигунів при перевантаженні з контролем цілісності фазного провідника	40



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

<b>Лелюк М. А., Серета О. Гр., Серета О. Ген., Рубежин Д. А., Жадько А. О.</b> Оцінка ефективності функціонування побутових кондиціонерів у режимі теплового насосу.....	41
--	----

#### *Секція 4. Сильні електричні і магнітні поля*

<b>Вінніков Д. В., Озеров О. М., Ткачов В. І., Катречко В. В., Бровкін Б. О.</b> Вплив електротехнічних параметрів прискорювача прямої дії на динаміку розмикання плазмового комутатора струму.....	42
<b>Вінніков Д. В., Озеров О. М., Ткачов В. І., Катречко В. В., Бровкін Б. О.</b> Перешкодозахист на малогабаритному прискорювачі електронів прямої дії з плазмовим комутатором струму.....	43
<b>Таран Г. В., Замурієв О. О., Опалев П. О., Родіонов С. В., Кольчик О. В.</b> Інгібуючі властивості плазмохімічної обробки біоцідно забруднених водних розчинів.....	44
<b>Лютенко Л. А., Бондаренко Я. А.</b> Агровольтаїка – потенціал для українського сільського господарства.....	45
<b>Бойко М. І., Макогон А. В.</b> Електрофізична технологія знезараження води за допомогою розрядів із субнаносекундним фронтом в газових бульках.....	46
<b>Заблодський М. М., Ковальчук О. І.</b> Експериментально-чисельне дослідження коаксіального плазмового пальника з тангенціальною подачею повітря.....	47
<b>Мостовий С. П., Князєв С. А., Бахвалов О. В.</b> Дослідження впливу імпульсного магнітного поля на структуру масивного феромагнітного провідника.....	48
<b>Удовицький В. Г., Литвиненко В. В.</b> Дуговий синтез впорядкованих структур з вуглецевих нанотрубок для термоемісійних перетворювачів енергії.....	49
<b>Петренко М. П., Марценюк В. Є., Тейberman Є. М., Томчук Д. Я.</b> Вплив скін-ефекту на поверхневий тиск при електромагнітному формуванні тонкостінних циліндричних заготовок.....	50
<b>Коритченко К. В., Болюх В. Ф., Тищенко Д. М., Титов В. Ю., Чертіщев І. О.</b> Вплив елементів схеми імпульсного модулятора на імпульс напруги на навантаженні.....	51
<b>Резинкін О. Л., Резинкіна М. М.</b> Електромагнітні резонатори для активації квантових сенсорів на NV-центрах.....	52

#### *Секція 5. Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка*

<b>Шевченко В. В., Андрієнко А. М.</b> Перспективи використання та особливості діагностики кабелів з високотемпературними надпровідниками.....	53
<b>Атріхалов С. Ю., Богославець А. М., Чернова В. В.</b> Кабельна продукція як будівельний матеріал.....	54
<b>Антонець Т. Ю., Білянін Р. В.</b> Підводні камені застосування алюмінієвого екрану для ЗПЕ кабелів.....	55
<b>Безпрозванних Г. В., Москвітін Є. С., Рогинський В. О.</b> Технологічні дефекти у терморезистивній високовольтній ізоляції електричних машин та техніка їх виявлення.....	56



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

<b>Безпрозваних Г. В., Мошенський В. І., Сіятовський Д. О.</b> Моніторинг зволоженості трансформаторної оливи методами частотної діелектричної спектроскопії та рефрактометрії.....	57
<b>Бойко І. В., Кессаєв О. Г.</b> Прогнозування технічного стану кабельних ліній за параметрами часткових розрядів.....	58
<b>Гонтар Ю. Г., Кессаєв О. Г.</b> Електротехнічні матеріали в контексті індустрії 4.0: тенденції, виклики та перспективи.....	59
<b>Гринишина М. В.</b> Тенденції підвищення енергоефективності силових кабелів середньої напруги з полімерною ізоляцією.....	60
<b>Ковалек П. Є., Шабельник Р. В.</b> CPR та CPR2: новий рівень безпеки та відповідальності у кабельній продукції.....	61
<b>Костюков І. О.</b> Підвищення точності вимірювань параметрів діелектричної абсорбції ізоляції електротехнічного обладнання із застосуванням осцилографічних методів.....	62
<b>Мірчук І. А.</b> Дослідження електроізоляційних і фізико-механічних характеристик двокомпонентного поліуретанового герметика.....	63
<b>Мукоєєв Д. П., Кессаєв О. Г.</b> Аналіз нормативної документації щодо випробувань ізоляційних матеріалів сигнально-блокувальних кабелів.....	64
<b>Пушкар І. А.</b> Категорії та критерії кабелів атомних електричних станцій.....	65
<b>Пушкар О. А.</b> Параметри для оцінки стійкості кабелів промислових мереж до електромагнітних впливів.....	66

*Секція 6. Передача електричної енергії,  
автоматизація та кібербезпека енергетичних систем*

<b>Котиш А. І., Баласнко К. О., Василенко Я. В.</b> Тенденції розвитку сучасного електричного та електроенергетичного обладнання.....	67
<b>Сліпченко В. О., Поляков М. О.</b> Використання суперконденсаторів для підвищення динамічних характеристик газотурбінної електростанції.....	68
<b>Крюкова Н. В., Марков В. С., Гончаров Є. В., Логвиненко С. С.</b> Застосування акумуляторних систем зберігання енергії BESS в якості резерву підтримки частоти енергетичних мереж.....	69
<b>Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Левченко О. П., Бахметьєв В. В.</b> Спосіб аналітичного визначення параметрів режиму форсованих випробувань тиристорних модулів пристрою РПН.....	70
<b>Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д.</b> Дослідження магнітного поля повітряних леп 0,4-330 кВ на границі чинних охоронних зон та визначення необхідності їх збільшення.....	71
<b>Зубенко С. О.</b> Комплексний підхід до управління енергоефективністю в сучасних системах енергоменеджменту.....	72
<b>Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Олійник Ю. С.</b> Цифровий двійник енергоблоку атомної електростанції на основі системно-кластерного моделювання.....	73



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

<b>Бровко К. Ю., Винокурова Н. Д., Войтенко С. М.</b> Моделювання динаміки аварійного процесу на чорнобильській АЕС із застосуванням інтерактивного тренажера-симулятора.....	74
<b>Бровко К. Ю., Пономаренко О. М., Подопрігора Д. Р.</b> Фрактально-кластерний підхід до аналізу температурних параметрів першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000.....	75
<b>Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Щусь В. М.</b> Самоадаптивна конденсаторна ізоляція для приглушення часткових розрядів у високовольтних системах.....	76
<b>Довгалюк О. М., Білоконь Г. В., Баталін В. Ю.</b> Впровадження Smart Grid технологій для керування режимами розподільних електричних мереж України.....	77
<b>Піротті О. Є., Макєєв А. С.</b> Аналіз режимів роботи електричних мереж з малими гідроелектростанціями.....	78
<b>Семененко Ю. О., Серєда О. Гр., Серєда О. Г., Семененко О. Д.</b> Аналіз причин неселективної дії захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю.....	79
<b>Бублій Д. В., Трет'як А. В.</b> Аналіз ефективності впровадження автоматизованого індивідуального теплового вузла для адміністративної будівлі.....	80
<b>Загайнова О. А., Попенко К. П., Германчук Д. Д.</b> Підвищення енергоефективності процесів передачі та розподілу електроенергії з відновлюваних джерел.....	81
<b>Орлов В. С., Хоменко І. В., Шкребєла А. В., Серєнко Д. В.</b> Оцінка ефективності компенсації реактивної потужності в розподільчій мережі за допомогою розрахункової програми "МАЕСТРО".....	82
<b>Савченко Н. П., Бараненко Т. К.</b> Організація гібридних систем накопичення енергії для Microgrid мереж.....	83
<b>Кулик О. С.</b> Розпізнавання дефектів маслонаповненого обладнання електричних мереж за комплексом діагностичних критеріїв.....	84
<b>Пономаренко С. Г.</b> Рання діагностика стану трансформаторних масел за комплексом діагностичних ознак.....	85
<b>Шутенко О. В., Довгалюк В. В.</b> Аналіз динаміки зміни концентрацій та швидкостей наростання газів в маслонаповнених трансформаторах з різним станом.....	86
<b>Шутенко О. В.</b> Розпізнавання типу дефектів високовольтних силових трансформаторів на основі аналізу прирощень концентрацій газів.....	87

### *Секція 7. Електричний транспорт*

<b>Овер'янова Л. В., Рябов Є. С., Іванов К. І.</b> Гібридна тягова система для приміського електропоїзду.....	88
<b>Грозєнок Є. Д., Дубовик Т. І., Немашкало В. С.</b> Індукційний нагрів металевих компонентів у технологіях виробництва та обслуговування електричного транспорту залізниць.....	89



Рекомендовано до видання Вченою радою НТУ «ХПІ», протокол № 12 від 28.11.2025

<b>Грозенок Є. Д., Дубовик Т. І., Пуха І. В.</b> Індукційне нагрівання як енергоефективна технологія термообробки деталей залізничного електротранспорту.....	90
<b>Любарський Б. Г., Стеценко М. І., Єрціян Б. Х.</b> Швидкісні контактано-акумуляторні електропоїзди з нахилом кузова – перспективна технологія для залізниць України.....	91
<b>Козьма В. О., Яқунін Д. І.</b> Удосконалення гібридної системи нахилу кузова електрорухомого складу залізниць.....	92
<b>Ляшенко В.М., Яцько С.І.</b> Визначення типових поздовжніх профілів шляху для задач моделювання руху міського рейкового транспорту.....	93
<b>Лобунько М. В., Яқунін Д. І.</b> Передумови до розробки комбінованої системи нахилу кузовів для перспективного електрорухомого складу з огляду на євроінтеграцію України.....	94
<b>Яқунін О. О., Маслієв В. Г.</b> Особливості використання швидкісного електрорухомого складу на вітчизняній залізниці.....	95
<b>Рябов Є. С., Єрціян Б. Х., Лисенко Є. В., Чернишенко Є. Г., Жуков А. Ю.</b> Удосконалення керування тяговим колекторним електроприводом маневрового локомотиву.....	96
<b>Маслій А. С., Буряковський С. Г., Антоненко Р. М., Геврасьов В. А., Маслій Ан. С.</b> Вибір накопичувача енергії для plug-in гібридної тягової системи рухомого складу.....	97
<b>Любарський Б. Г., Пуха І. В.</b> Вдосконалення систем охолодження ротору тягових електричних двигунів.....	98

***Визначні події SIEMA'2025***

Підсумкове повідомлення про проведення круглого столу у рамках міжнародного симпозіуму Siema'2025.....	99
MODERATOR'S SHORT CV. PANELISTS' SHORT CVs.....	100
PANELISTS' SHORT CVs.....	101
Підсумок обговорення круглого столу у рамках міжнародного симпозіуму Siema'2025.....	102

**A ROUND TABLE PANEL SESSION ON  
“CEM AND MULTIPHYSICS: IN-HOUSE CODES  
VS. COMMERCIAL SOFTWARE VS. OPEN SOURCE SOFTWARE”  
DURING THE SIEMA'2025 INTERNATIONAL SYMPOSIUM**

M. Clemens<sup>1</sup>, M.G. Pantelyat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chair of Electromagnetic Theory, University of Wuppertal, Wuppertal, Germany

<sup>2</sup>Department of Electrical Devices, National Technical University „Kharkiv Polytechnic Institute“, Ukraine

The 28th International Symposium on Problems of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (SIEMA'2025) in Kharkiv, Ukraine, 30th to 31st of October 2025, featured an online round table panel discussion with the title “CEM and Multiphysics: In-house Codes vs. Commercial Software vs. Open Source Software” (including aspects of the impact of data-driven methods and artificial intelligence techniques in this field of research).

In this plenary session, organized and moderated by

- Markus Clemens, University of Wuppertal, Germany and
- Michael G. Pantelyat, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ukraine, the panelists
- Herbert De Gersem, Technical University of Darmstadt, Germany;
- Christophe Geuzaine, University of Liège, Belgium;
- Stefan Kurz, Robert Bosch GmbH, Germany / ETH Zürich, Switzerland;
- David A. Lowther, McGill University, Montreal, Canada

discussed a range of specific issues and questions covering the following topics:

### **1 – Discussion on State-of-the-Art**

Contemporary open-source software packages in computational electromagnetics and computational multiphysics often reach a level of versatility and usability that rivals commercial software packages. Using commercial software, which is commonly subject to rigorous quality control, is beneficial for many standard simulation tasks when the immediate usability of the codes is a priority and the licensing fees do not exceed the cost of the scientific personnel required to prepare and work with open-source or in-house codes. Open-source and specifically designed custom codes provide additional options when specific simulation tasks cannot be accomplished with standard commercial codes. This is the case for certain specific "custom" simulation tasks, for which there is no business case to the providers of commercial codes to implement the required specialized solvers. Open-source codes also often provide a platform for novel and experimental solver developments that are eventually later adapted into commercial software codes.

### **2 – Potential and Impact of AI- and Data-driven methods**

Machine learning techniques, such as the use of large language models or artificial intelligence, affect the development of computational engineering code at every level.

The production of complex simulation tools now benefits from large language models (LLMs), which provide code segments and complete implementations, as well as established numerical solver strategies. These LLM tools also help to considerably speed up the production of simulation tools, particularly within routine tasks such as creating software wrappers for libraries or interfaces between different programming languages.

Regarding advances in computational solution scheme development, deep neural networks (DNNs) can establish surrogate computational models, even for complex nonlinear problems, to provide approximate solutions or high-quality initial guesses for subsequent solution steps. These techniques also allow measurement results to be included in simulation codes. DNNs are also used to refine established simulation techniques, and using them with surrogate models is considered a key component of accelerating the computation of simulation results in near real time.

### **3 – Outlook/Prospects – in relation to the comparative analysis of all three classes of software**

In future design and engineering development processes, the use of digital twins of actual products will benefit from combining specifically trained large language models with e.g. computational electromagnetics or multiphysics simulation software. This combination will provide prompt-based user interfaces. In this context, Model Context Protocols (MCP), which provide standardized frameworks for integrating simulation tools, data sources, application programming interfaces (APIs), and artificial intelligence models, are considered a future path for developing computer-aided engineering (CAE) and numerical simulation tools for computational product lifecycle management.

## СУЧАСНІ ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

С. Б. Кузовкін<sup>1</sup>, В. А. Побігайло<sup>2</sup>, О. В. Бориченко<sup>2</sup>, В. П. Калінчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Компанія Е.NEXT-Україна

<sup>2</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**Вступ.** В Україні узагальнена протяжність повітряних ліній 6-10 кВ становить більше ніж 1,3 млн. км, що складає близько 45% від загальної протяжності ліній електропередачі 0,4-110 кВ. Наразі, розподільчі мережі залишаються найбільш вразливою ланкою системи електропостачання (СЕП), близько 80% всіх аварій та пошкоджень відбуваються саме у межах СЕП. Однак, саме СЕП забезпечує електропостачання промислових та усіх побутових споживачів. Особливістю є те, що майже дві третини усіх ушкоджень відбувається саме в мережах цього класу напруги. Наразі з цим слід зазначити дуже неефективну автоматизацію розподільних мереж 6-10 кВ і як наслідок, у разі виникнення ушкодження на лінії усі оперативні перемикачів, пошук і відгалудження пошкодженої ділянки, включення резервного живлення виконуються ресурсом оперативно-виїзних бригад вручну. Це призводить до значного збільшення часу пошуку ушкодження, часу відновлення електропостачання і збитку для споживача. Узагальнена тривалість відключень споживачів складає близько 100 годин в рік.

Вдосконалення електричних розподільчих мереж, з метою підвищення ефективності, полягає в оснащенні пунктами автоматичного секціонування і автоматичного включення резерву (АВР), які дозволяють відключати тільки аварійну ділянку мережі і автоматично відновлювати живлення неушкоджених споживачів. На теперішній час забезпечення ефективності функціонування СЕП – досить складне завдання, успішне вирішення якого залежить від багатьох факторів, один з яких – використання сучасних засобів комутації та захисту і, зокрема, пунктів секціонування, розподілу та моніторингу на базі вакуумних реклоузерів тощо.

**Мета роботи** полягає у дослідженні технічних характеристик вакуумних реклоузерів.

**Матеріали досліджень.** Реклоузер (від англійського "recloser" - перемикач) - пристрій автоматичного управління і захисту повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) на основі вакуумних викивачів, що управляється мікропроцесорною системою. Крім комутаційних і протиаварійних функцій захисту повітряних ЛЕП додатково можуть виконувати функції моніторингу та обліку характеристик і параметрів електромереж СЕП. В рамках загальної класифікації пристроїв енергетики реклоузери відносяться до комплектних розподільних пристроїв зовнішнього встановлення. Однією з важливих відмінних особливостей реклоузера в порівнянні з традиційними пунктами секціонування є відсутність необхідності виконання поточних, капітальних і середніх ремонтів упродовж усього терміну.

З-посеред когорти українських виробників високовольтного обладнання одним із провідних є від Компанії «Е.NEXT-Україна», яке виробляє вакуумну комутаційну апаратуру для розподільних мереж 6-35 кВ. Серед найновіших розробок підприємства – пункт мережевого резервування на базі автоматичного вакуумного реклоузера, призначений для повітряних електричних мереж 10 кВ. Загальний вигляд вакуумного реклоузера, встановленого на ПЛІ 10-35 кВ із неізолюва-

ними та з ізолюваними проводами наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд вакуумного реклоузера

Апарат складається з комутаційного модуля, який розміщується на опорі під лінією електропередачі та здійснює комутацію номінальних струмів та струмів короткого замикання; шафи керування, яка обладнана акумулятором резервного живлення, приладами сигналізації і керування, а також апаратурою релейного захисту і автоматики.

Реклоузер об'єднав практично всі види протиаварійного захисту та автоматики, які використовуються в розподільних електричних мережах:

багатократне АПВ (автоматичне повторне включення), АВР (автоматичне введення резерва), МСЗ (максимальний струмовий захист), ЗЗЗ (захист від замикань на землю) та інші.

Основні функції реклоузера:

- здійснення оперативних перемикачів в мережі розподілу (дистанційна і місцева конфігурація мереж);
- автоматичне відключення пошкоджених ділянок;
- повторне автоматичне включення ліній;
- автоматичне відновлення електроживлення непошкоджених ділянок;
- автоматичний збір даних про параметри функціонування мереж.

Відповідно до загальноприйнятої класифікації, реклоузери належать до комплектів розподільних пристроїв зовнішнього встановлення з такими особливостями:

- всі прилади розміщуються, як правило, на опорах ПЛІ без додаткових спеціальних огорожень;
- реклоузери є пристроями герметичного виконання без обслуговування, що дозволяє забезпечити високий рівень захищеності;
- реклоузери мають деякі ознаки «інтелектуального» керування, що дозволяє здійснювати кілька спроб відновлення електропостачання після аварії, а в разі невдачі, повідомити про це оператора.

**Висновки.** Виняткова функціональність релейного захисту та автоматики, значне скорочення часу пошуку і локалізації пошкодження, значні можливості діагностики параметрів режимів роботи мережі, здатність інтегруватися в будь-які системи телемеханіки дають змогу використовувати реклоузери для вирішення найрізноманітніших завдань автоматизації режимів та керування розподільними електричними мережами.

Список літератури

- [1] Реклоузери Компанії Е.NEXT-Україна.  
<https://enext.ua/uk/>

## ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ У КОНТЕКСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

С. Т. Толмачов, О. В. Ільченко

Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Економіка України завжди позиціонувалася як одна з найбільш енергоємних, поступаючись за показником енергоефективності у 2,5-3 рази промислово розвиненим країнам світу. Тому підвищення енергоефективності завжди було одним із основних пріоритетів енергетичної політики України.

Спеціальність G3 є найбільш дотичною до даної проблеми, оскільки охоплює практично всі її основні аспекти. Тому цей факт слід враховувати при формуванні орієнтації і фокусу освітніх програм усіх рівнів.

Мета даної публікації – поділитися деякими судженнями і фактами, які, на нашу думку, не завжди переконливо доводяться до студентської аудиторії.

1. Саме поняття енергоефективності трактується в Україні не зовсім чітко. Адже базовий закон «Про енергетичну ефективність» визначає її як «кількісне співвідношення між роботою, послугами, товарами або енергією на виході та витраченою енергією на вході». Це фактично карт-бланш на оперування лише цифрами, що суттєво дисонує з більш поширеним в розвинених країнах комплексним виміром, де енергоефективність розглядається в єдиній системі координат з екологічністю та конкурентоспроможністю.

2. Проблеми енергоефективності слід розглядати через призму енергетичної грамотності, рівень якої навіть серед студентства вкрай низький. У цьому контексті корисним є введення дисципліни «Основи енергетичної грамотності та енергозбереження», яка надає не лише базові знання щодо особливостей перетворення різних форм енергії, а й чітке розуміння особливої ролі теплової енергії як найбільш вузької ланки в галузі енергетики, що фактично формує сучасний вектор енергетичної стратегії у світовому вимірі.

3. Студентській аудиторії важливо надавати об'єктивну картину важкого шляху України до енергоефективності, а при аналізі основних бар'єрів на цьому шляху уникати використання лише чорного кольору. Адже ми отримали у спадщину не лише енергоємну експортно орієнтовану промисловість, а й совкову ментальність. Разом з тим не слід в яскравих фарбах подавати енергетичну політику України та обмежуватися лише плановими показниками, оскільки для комплексних програм, стратегій розвитку та інших базових документів енергетичної політики характерними є їх декларативність, завищена оцінка власних можливостей і навіть елементи популізму. Так, частка у ВВП витрат на виконання науково-технічних робіт: заплановано на 2020-й рік 1.5 %, за фактом 0,36 % (у 2015 році 0.62 %!, світовий рівень – 2,17%). Відповідно частка реалізованої інноваційної продукції в обсязі промисловості: план 5,0%, факт 1.9%. Така динаміка обумовить безнадійне відставання розвитку України від провідних країн світу.

4. При міжнародній співпраці корисно орієнтуватися на досвід і кращі практики в галузі енергоефективності. Але при цьому слід враховувати, що з

багатьма країнами нас розділяють декілька рівнів технологічних укладів. Для них сьогодні в пріоритеті не енергоефективність, а наукоємність виробництва. Зрозуміло, що цей факт значно ускладнює участь вітчизняних структур у спільних проєктах з реформування енергоємної промисловості України – ми втратили занадто багато часу і можливостей. Нагадаємо, що лише з 2014-го року енергоефективність та енергозаощадження офіційно стали пріоритетними напрямками функціонування вітчизняної економіки. Розвинені ж країни світу вже 40 років до цього активно шукали шляхи виходу з першої енергетичної кризи.

5. Необхідно ставити перед студентами гострі й проблемні питання енергетичної проблематики, стимулюючи їх до активного пошуку позитивної динаміки. Зрозуміло, що краще робити це не в рамках традиційних лекцій-монологів викладача, а у формі проблемних лекцій, семінар-дискусій, аналізу конкретних ситуацій та інших методів активізації навчального процесу із заздалегідь підготовленою аудиторією. Наведемо деякі приклади обговорення у контексті енергоефективності. «Чому при однаковому виробництві електричної енергії в довоєнні часи у Польщі та Україні (приблизно 150 млрд. кВт·год) ВВП Польщі більш ніж у 4 рази перевищує наш?». Розділилося відношення аудиторії відносно поширеної тези, що зелена енергетика «...є розкішшю багатих країн». Велику активність студенти показали при обговоренні пріоритетності в реалізації схеми «виробництво – передача – споживання» електричної енергії. Такі дискусії позитивно сприймаються студентами.

6. Слід підкреслювати престиж спеціальності «Електрична інженерія». За «Сценарієм нових стратегій» з огляду МЕА від 2017 року «електроенергія виходить на провідні позиції, як джерело енергії, у той час як останні двадцять п'ять років цю роль виконувала нафта». Електроенергія все більш активно проникає в нетрадиційні області, в першу чергу у сфері тепlopостачання і транспорту. Фактично вона стала «першим паливом» для розвитку світової економіки.

7. Дисципліни енергетичного блоку потребують постійного інформаційного оновлення. І зрозуміло, що весь навчальний процес ми повинні розглядати через призму воєнного стану. Але за будь-яких умов обов'язок науково-педагогічних працівників – максимально використати свій потенціал для підготовки фахівців не лише з високим рівнем професійної компетентності, активності та соціальної відповідальності, а і з готовністю і здатністю в складних умовах активно впроваджувати новітні знання, методику і кращі світові практики в області енергоефективних систем і технологій. Пропонуємо всю нашу спільну роботу проводити під гаслом: **Від енергоємності через енергоефективність до наукоємності!**

## РОЗШИРЕННЯ ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ СПРОЩЕНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ З ГРАВІТАЦІЙНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

А. М. Чернюк, П. В. Васюченко, Д. Р. Подопригора  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичної галузі фіксують значне зростання встановленої потужності фотоелектричних електростанцій (ФЕЕ) та збільшення питомої долі генерації електричної енергії на цих об'єктах [1]. Проте подальшому розвитку фотовольтаїки заважають такі недоліки ФЕЕ як нестабільний та слабкопрогнозований графік генерації електричної енергії та значна питома собівартість спорудження таких електростанцій [2,3].

Шляхами вирішення проблеми подальшого розширення галузі використання ФЕЕ може бути розробка та впровадження спрощених технологічних схем ФЕЕ та застосування принципу цільового їх використання для невибагливих споживачів електричної енергії.

На рисунках 1-3 наведено спрощені технологічні схеми ФЕЕ з гравітаційними накопичувачами енергії [4,5].

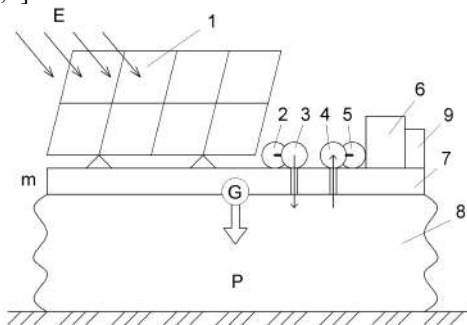


Рис. 1. Технологічна схема ФЕЕ з пневмогравітаційним накопичувачем енергії:

- 1 – фотоелектричні модулі, 2 – двигун постійного струму, 3 – нагнітач повітря, 4 – повітряна турбіна, 5 – синхронний генератор, 6 – електростанція, 7 – опорна платформа, 8 – еластична смість, 9 – система управління

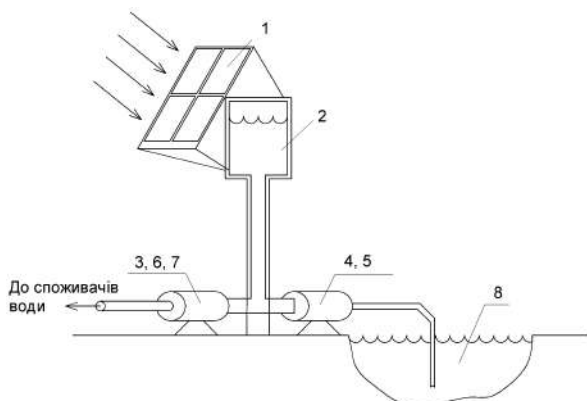


Рис. 2. Технологічна схема цільової водопостачальної ФЕЕ з рідинним гравітаційним накопичувачем енергії:

- 1 – фотоелектричні модулі, 2 – резервуар верхнього б'єфу, 3 – система управління генерацією електричної енергії, 4 – насос, 5 – приводний двигун постійного струму, 6 – гідротурбіна, 7 – синхронний генератор, 8 – резервуар нижнього б'єфу

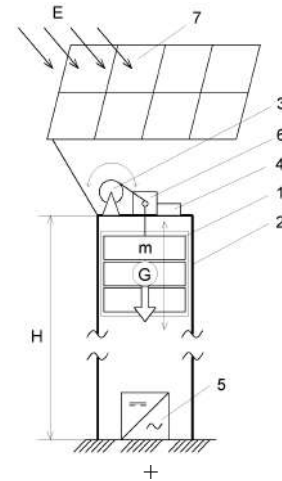


Рис. 3. Технологічна схема ФЕЕ з хімічно-гравітаційним накопичувачем енергії:  
1 – батарея хімічних акумуляторів, 2 – вежа, 3 – машина постійного струму, 4 – система управління, 5 – контролер заряду, 6 – підйомний механізм, 7 – фотоелектричні модулі

Запропоновані технологічні рішення дозволяють значною мірою здешевити вартість спорудження ФЕЕ та застосувати гравітаційні накопичувачі енергії в якості засобів акумулювання електричної енергії та стабілізації режиму генерації електростанції. Усі технологічні схеми відрізняються тим, що не містять в своєму складі таких дорогих елементів як напівпровідникові інвертори та батареї хімічних акумуляторів, або використовують ці елементи за подвійним призначенням.

### Список літератури

- [1] Statistical Review of World Energy, 2025, 74th edition, Energy institute. 76p. Режим доступу <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] Чернюк А.М., Качанов Є.І., Черевик Ю.О., Оберемок З.В. Загальні засади забезпечення електропостачання в локальних децентралізованих енергосистемах. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 6, С.88-92
- [3] Качанов Є.І., Чернюк А.М. Метеоенергетичне прогнозування як засіб адаптації альтернативних джерел живлення в об'єднані енергосистеми., IV Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2020)»: Збірник наукових праць. Харків : Друкарня Мадрид, 2020. С 96-97.
- [4] Чернюк А.М., Олійник Ю.С., Качанов Є.І., Пальваль Д.Г. Фотоелектрична станція з пневмогравітаційним накопичувачем енергії, Патент на корисну модель, UA157684U, 13.11.2024, Бюл.№ 46
- [5] Чернюк А.М., Олійник Ю.С., Качанов Є.І., Пальваль Д.Г. Хімічно-гравітаційний накопичувач енергії., Патент на корисну модель, UA157348U , 02.10.2024, Бюл. № 40.

## ЩОДО РОЗГОРТАННЯ СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ БЕЗПОСЕРЕДНЬО В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

С. Т. Толмачов, О. В. Ільченко

Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Енергоефективність вітчизняної промисловості, у т. ч. електроенергетики на всіх її ланках – від виробництва і передачі електроенергії до її споживання – завжди була низькою, а повномасштабна війна спричинила в комплексі традиційних проблем додаткові труднощі. Тому в післявоєнний час суспільство буде вимушене спрямувати на цю проблему значні сили. Але здається, що навіть у довоєнні часи вектор основних зусиль на її вирішення був визначеним недостатньо чітко. На протипагу цьому підвищення ефективності енергетики у розвинених країнах світу базується на комплексах чітких стратегічних планів, сценаріїв розвитку, директив і концепцій, спільними рисами яких є боротьба за зменшення технологічних втрат енергії при її виробництві і передачі шляхом залучення новітніх досягнень в технологіях і обладнанні. Основним критерієм успіху є позитивна динаміка ККД з визначеними термінами і показниками їх реалізації. В останні десятиліття основні інвестиції більшості країн спрямовані на системи генерації, транспортування і зберігання електричної енергії.

З урахуванням гострого дефіциту електроенергії за умов воєнного стану Україна вимушена свої обмежені фінансові ресурси спрямовувати на збереження і відновлення генеруючих можливостей для надійного забезпечення електричною енергією її споживачів. Але саме у питанні ефективного споживання енергії за роки незалежності накопичилося найбільше проблем. Можна прямо сказати, що воно практично у повному занепаді. Можливо доречно для загальної характеристики буде метафора: Обладнане застарілими насосними агрегатами водопостачальне підприємство через довгий і забитий трубопровід наповнює ржавий і дірявий резервуар, в якому через надмірні витрати важко підтримати критичний рівень. За необхідності підприємство вимушене збільшувати потужність парку насосних агрегатів, втрачаючи при цьому значні додаткові кошти як на обладнання, так і на транспортування. Висновок зрозумілий – проблему необхідно вирішувати з іншого кінця, від споживача, тобто максимально залатати «дірки» в резервуарі.

Повертаючись до розглянутої проблеми споживання електричної енергії, варто зазначити, що за рівнем складності та кількістю чинників, які впливають на показники енергоефективності, вона належить до найскладніших. Водночас у розвинених країнах світу цю проблему вдалося ефективно вирішити стосовно основних споживачів електроенергії – асинхронних двигунів (АД), хоча для цього знадобилися десятиліття цілеспрямованої і наполегливої роботи. На сьогодні за класом енергоефективності ІЕ5 ККД потужних АД перевищив 98%. Зазначимо, що саме акцент на максимальний ККД позитивно вплинув на низку інших проблем: залежності від навантаження,

експлуатаційної надійності, переважувальної здатності та ін.

Попри низку обмежувальних чинників, як зовнішнього, так і внутрішнього походження, з яких відзначимо недостатню мотивацію, низьку культуру експлуатації, брак кваліфікації та нерозуміння шляхів і цілей впровадження, проблему ефективного споживання електричної енергії слід радикально вирішувати. При цьому зрозуміло, що навіть за потенційних зовнішніх інвестицій у короткостроковій перспективі замінити мільйони АД на європейські енергоефективні аналоги нереально. На наш погляд, єдиним конструктивним шляхом вирішення проблеми може стати широкомасштабний моніторинг наявного парку АД в умовах виробництва. Очевидно вирішити цю складну проблему зусиллями лише окремих наукових колективів, промислових підприємств та міністерств неможливо, необхідна широка консолідація відповідних фахівців і структур, здатних забезпечити суспільний інтерес до вирішення даної проблеми.

На цьому шляху найбільш складним завданням є достовірне визначення енергетичних параметрів кожного АД у виробничих умовах. Віддаючи належне успіхам математичного моделювання енергетичних процесів в АД, слід визнати, що їх масове впровадження нереальне. Конструктивною альтернативою є безпосередній вимір механічних параметрів на валу АД поширеними на ринку високочастотними, але дорогими тензорезисторними датчиками моменту. Основними обмеженнями для їх широкого використання, окрім високої вартості, є необхідність «розрізування валу» і складність монтажу при встановленні датчика та додаткової муфти. Проривними у цьому напрямку стали накладні датчики без модифікації валу, які розроблені у Великобританії та Німеччині і які можна ефективно використовувати «у польових умовах». Вони мають високу гнучкість і швидкість встановлення, здатні працювати в обмеженому просторі, надійні у промислових умовах. Однак слід зазначити, що впровадження таких систем вимагає врахування ряду техніко-організаційних умов та обмежень щодо доступу, умов середовища, підготовки персоналу, економічної доцільності інвестицій тощо. Тим не менше розгортання таких систем дозволяє на основі отриманих даних оптимізувати режими роботи АД, забезпечуючи відповідність їх навантаження реальним виробничим потребам, а також доцільність їх заміни енергоефективними аналогами.

**Висновок.** Широке впровадження моніторингу роботи АД є стратегічно важливим напрямом модернізації промислових об'єктів, тому доцільним є створення ініціативної групи для детального вивчення проблеми шляхом консолідації зусиль зацікавлених фахівців і структур з орієнтацією на міжнародну співпрацю і фінансову підтримку.

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, В. О. Дем'яненко, В. М. Олійник

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Корозія арматури є одним із найважливіших чинників, що визначають фактичний технічний стан залізобетонних конструкцій, їхню надійність і довговічність. Корозійне пошкодження арматурної сталі призводить до зниження зчеплення арматури з бетоном, утворення тріщин і руйнування захисного шару бетону, а також до зменшення несучої здатності конструкцій унаслідок зменшення перерізу арматури та бетону.

Традиційно застосовуються такі методи:

1. Візуальне обстеження арматурних стержнів на ділянках розкриття захисного шару.

2. Метод потенціалу півелемента призначений для вимірювання потенціалу мікрогальванічної пари, що виникає внаслідок хімічної реакції між металом арматури та тілом бетону.

3. Метод вимірювання питомого електричного опору поверхневого шару бетону.

Відомо, що при виготовленні залізобетонних конструкцій спочатку нагрівають елементи або вузли до заданої температури (індукційним нагрівом або відкритим вогнем). При цьому прутки збільшують довжину в бік вільних кінців, оскільки інші кінці жорстко закріплені. А потім спеціальними затискачами фіксують вільні кінці прутків. А далі починають їх охолоджувати, в процесі чого прутки іспитують механічне навантаження, оскільки закріплення їх кінців не дає можливості пруткам скорочуватись.

Таким чином, важливим питанням підвищення якості виготовлення конструкцій є визначення оптимального з точки зору досягнення заданих механічних навантажень в прутках при їх нагріві та охолодженні. Очевидно, що найбільш вигідним і достовірним методом і засобом, який дозволить контролювати цей процес, є багато параметрові безконтактні засоби контролю. Особливий інтерес заслуговує використання для безперервного контролю радіуса та механічних навантажень у феромагнітних прутках, дротах, розташованих всередині залізобетонних колон, плитах перекриттів і інших конструкціях.

В багатьох випадках в армованих залізобетонних конструкціях проникає волога (наприклад, з незахищених країв колони або плити) всередину конструкції вздовж прутків. Останній фактор спричиняє корозію поверхневих шарів металевих прутків, яка, в свою чергу, приводить до зменшення ефективного діаметра (поперечного розміру прутка). Зменшення поперечного розміру елементів конструкцій пов'язано зі значним зниженням допустимих значень механічних напружень прутка, а значить і втратою міцності всієї конструкції в цілому, так як в даному випадку поверхня прутків не стиснена бетоном.

На рис. 1 наведена залізобетонна колона 1, всередині якої закріплені стержні 2, що працюють на стискання. Розміщені на стержні та залиті бетоном параметричні електромагнітні перетворювачі 3 до-

зволяють в процесі експлуатації колони, яка входить в залізобетонну конструкцію, безперервно слідкувати за радіусом, магнітною проникністю та електричною провідністю металевого стержня колони, а по цим параметрам опосередковано за механічним напруженням, тобто, за міцністю всієї конструкції.

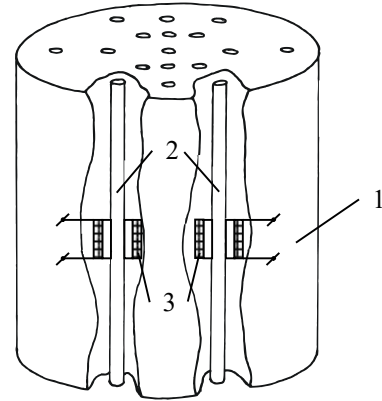


Рис. 1. Частина залізобетону з металевою арматурою: 1 – залізобетонна колона; 2 – стержні; 3 – електромагнітні перетворювачі

При цьому за магнітною проникністю та питомою електричною провідністю визначають механічні навантаження в несучих елементах колон, ферм і інших вузлах, а інформація про радіус арматур дозволяє оцінити ступінь підтримання в них механічних напружень, за рахунок щільного контакту з бетоном.

При використанні амплітудного та фазового методів для контролю механічних напружень виконується вимірювання амплітуди  $U$  або фази  $\varphi$  вихідних сигналів перетворювача. Формули для визначення механічного напруження  $\sigma_m$  мають наступний вигляд [1]:

$$\sigma_m = \pm k_a \left( \frac{x^2(U)}{x_0(U)} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\sigma_m = \pm k_\varphi \left( \frac{x^2(\varphi)}{x_0(\varphi)} - 1 \right) \quad (2)$$

де:  $k_a$  і  $k_\varphi$  – розмірний коефіцієнт;  $x(U)$ ,  $x(\varphi)$  – залежність узагальненого параметра  $x$  від  $U$  і  $\varphi$  при навантаженому виробі;  $x_0(U)$ ,  $x_0(\varphi)$  – ті ж функції з виробом, але без навантаження.

### Список літератури

- [1] Розширення функціональних можливостей електромагнітних методів і пристроїв контролю механічних напружень у металевих циліндричних виробках. Б. Горкунов, С. Львов, В. Олійник, В. Вевенко. Метрологія та прилади, 2024, № 1, с. 32-36.

## РАЦІОНАЛЬНІ РОЗМІРИ КОТУШОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПРИ КОНТРОЛІ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ

Я. А. Бульдяк, Б. М. Горкунов, Т. В. Дроздова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Можливість контролю якості зварювання за допомогою електромагнітного методу визначається тим, що магнітна проникність та питомий електричний опір сталей суттєво залежать від їхньої мікроструктури. Як відомо, питома електрична провідність  $\sigma$  і відносна магнітна проникність  $\mu_r$  сталі тим менші, чим вищий вміст вуглецю в ній і чим більше вуглецю при загартуванні перейшло у твердий розчин.

Метою даної роботи є створення моделі вихрострумового перетворювача (ВСП) для контролю поверхневих шарів металевих виробів та вибір раціональних розмірів котушок даного перетворювача.

Система складається з котушки збудження і стрижня, що знаходиться в ній, і може бути представлена еквівалентною схемою зв'язаних контурів (рис. 1).

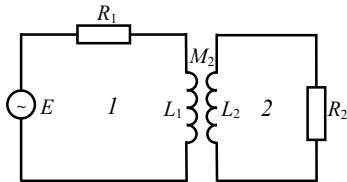


Рис. 1. Схема взаємопов'язаних контурів

Еквівалентний опір контуру 1 за наявності пов'язаного з ним контуру 2 можна визначити за формулою (1):

$$Z_{екв} = R_1 + \frac{\omega^2 M_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j \left( \omega L_1 - \frac{\omega^2 M_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right), \quad (1)$$

де  $R_1$  – активний опір контуру 1;  $R_2$  – активний опір контуру 2;  $M_2$  – взаємна індуктивність між першим та другим контуром;  $L_1$  – індуктивність контуру 1;  $L_2$  – індуктивність контуру 2.

В даному дослідженні розглянуто три моделі ВСП з циліндричним зразком та вимірювальними обмотками у вигляді горизонтально розташованих витків, вертикально розташованих витків та у вигляді котушки квадратного перерізу, узагальнено представлені на рис. 2. Зразок є соленоїдом, розбитим на елементарні витки, діаметр перерізу яких дорівнює  $\delta$ .

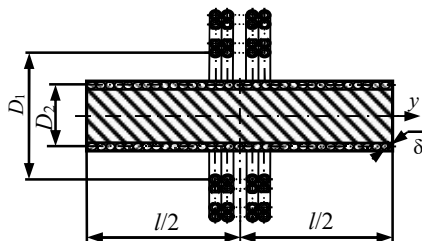


Рис. 2. ВСП з циліндричним зразком і вимірювальною обмоткою різної конфігурації

Параметри обмотки: зовнішній діаметр витка  $D_1+d=14$  мм; діаметр дроту  $d=0,1$  мм (з урахуванням ізоляції  $d=0,12$  мм); матеріал витка – мідь,  $\rho=0,17 \cdot 10^{-7}$  Ом·м; (кількість витків обмотки ВСП – 9, 18 та 81 виток для відповідної конфігурації котушки).

Параметри зразка: зовнішній діаметр зразка  $D_2+\delta = 10$  мм; довжина зразка  $l=50$  мм. Були використані зразки, виготовлені зі сталі Ст.45 з характеристиками  $\mu_r = 80$ ;  $\rho = 2,13 \cdot 10^{-7}$  Ом·м та сталі X18H10T з характеристиками  $\mu_r = 1,5$ ;  $\rho = 7,14 \cdot 10^{-7}$  Ом·м. Розрахунок значень еквівалентного опору зв'язаних контурів  $Z_{екв}$  проведено для глибин проникнення поля:  $\delta = 0,1$  мм;  $\delta = 0,2$  мм,  $\delta = 0,3$  мм;  $\delta = 0,4$  мм та  $\delta = 0,5$  мм.

В табл. 1 наведено розрахункові значення  $Z^*$  на різних глибинах проникнення поля та різних конфігурацій котушок,  $Z^*$  визначається із співвідношення:

$$Z^* = Z_{екв} / Z_1, \quad (2)$$

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \quad (3)$$

де:  $Z_1$  – напруга на обмотках трансформатора.

Таблиця 1. Значення  $Z^*$  на різних глибинах проникнення поля та обмоток ВСП

	$\delta$ , мм	$Z^*$ гориз	$Z^*$ вертикал	$Z^*$ (9x2)	$Z^*$ (2x9)	$Z^*$ (9x9)
Сталь Ст. 45	0,1	10,9711	13,5611	22,8044	27,2635	122,299
	0,2	1,87074	2,32525	3,67295	4,37252	19,3291
	0,3	1,15774	1,23265	1,58637	1,77395	6,72321
	0,4	1,03886	1,05824	1,15816	1,21311	3,32048
	0,5	1,01413	1,02102	1,05709	1,08028	2,07874
Сталь X18H10T	0,1	56,7180	69,3618	118,159	139,724	627,164
	0,2	34,5316	42,0248	71,5754	85,2222	386,534
	0,3	25,8938	31,5202	54,5419	64,2108	291,837
	0,4	20,4077	24,9514	42,8399	49,9552	232,047
	0,5	16,3185	20,0354	34,3547	40,8762	186,358

На рис. 3 наведені графіки залежностей  $Z^*$  від  $\delta$  для різних конфігурацій вимірювальних котушок ВСП і двох марок сталі.

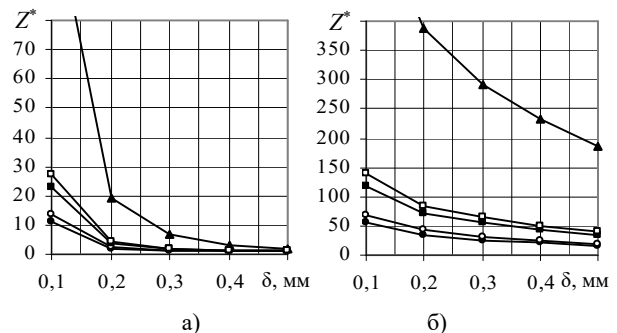


Рис. 3. Графіки залежності  $Z^*$  від глибини проникнення поля для сталі Ст.45 а) та сталі X18H10T б) для різних конфігурацій котушок ВСП: ● – 9 горизонтальних витків; ○ – 9 вертикальних витків; ■ – 9x2; □ – 2x9; ▲ – 9x9

Проаналізувавши розглянуті моделі ВСП, можна зробити наступний висновок: ВСП з обмоткою із горизонтально розташованих витків доцільно використовувати в структуроскопії, а ВСП з обмоткою із вертикально розташованих витків – для дефектоскопії. Для якіснішого контролю поверхні зміцнених деталей необхідно вдосконалити ВСП, тобто для нашого випадку можливе використання ВСП з обмоткою у вигляді котушки квадратного перерізу.

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО І СИЛОВОГО ПОЛЯ У СТРИЖНЕВИХ ФІЛЬТРАХ З ДВОЯКОПЕРІОДИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

С. Т. Толмачов, О. В. Ільченко

Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Дослідження гетерогенних електрофізичних систем є однією з важливих проблем теоретичної електротехніки. Зокрема, це стосується актуальної проблеми ефективності магнітних фільтрів (МФ) високоградієнтних магнітних сепараторів, якісний аналіз яких може бути проведено лише з використанням польових методів аналізу, серед яких найбільш поширеним є метод скінченних елементів (МСЕ). Незважаючи на загальновідомі переваги, одним з його основних недоліків є необхідність і складність формування граничних умов у випадку МФ зі складною геометрією і високою концентрацією елементів. Ефективною альтернативою МСК для найбільш поширених МФ стрижневого типу з двоякоперіодичною структурою елементів є чисельно-інтегральний метод відносно вектору намагніченості феромагнітних елементів МФ [1]. Універсальні обчислювальні можливості даного методу характеризуються відсутністю необхідності формування невідомих граничних умов та обмежень на кількість і геометричні й фізичні параметри дискретних елементів у рамках основного паралелограма періодів  $\Omega$ . Розрахунок намагніченості стрижнів дозволяє виконати поглиблений локальний магнітний аналіз МФ з урахуванням як лінійних, так і нелінійних анізотропних властивостей феромагнітних елементів МФ. Усереднення вектору намагніченості по площі паралелограма періодів  $\Omega$  вирішує задачу пошуку ефективної магнітної проникності гетерогенного середовища як однорідного.

**Метою даної роботи** є ілюстрація додаткових можливостей детального магнітного аналізу, зокрема розрахунку розподілу сил магнітного поля  $f = H \cdot \text{grad}(H)$  у робочому просторі МФ та ефективного способу їх візуалізації, що суттєво розширює ефективність порівняльного аналізу МФ різного типу та їх оптимізації.

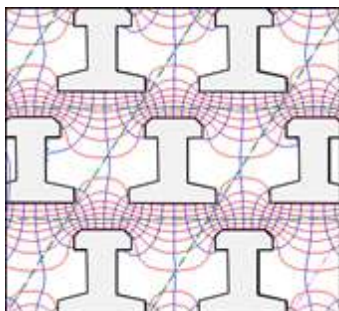


Рис. 1. Приклад картини поля в двоякоперіодичній системі стрижнів

В основі розрахунку локального силового поля МФ – лінії постійних значень сили  $f = |H \cdot \text{grad}(H)| = \text{const}$  (ізодини). На рис. 2 наведено комплекс із 4-х ізодин різних рівнів інтенсивності. До них належать також маловідомі, але характерні для двояко-періодичних структур зони біфуркації [2], у центрах яких  $f = 0$ . Періодичний характер картини поля обумовлює аналогічний характер ізодин. Тому для аналізу силового поля МФ до-

статньо знати відповідну інформацію в рамках основного паралелограма періодів (на рис. 1 виділено зеленим пунктиром).

Рисунок 2 ілюструє отримані у лінійному 2-D наближенні результати розрахунків у відносних одиницях. Ця інформація може бути легко і точно перерахована на будь-які геометричні розміри та фізичні значення сил використанням принципу подібності [2].

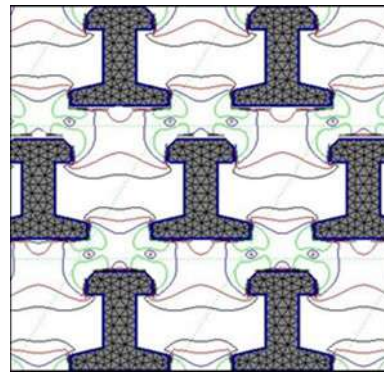


Рис. 2. Лінії ізодин різної інтенсивності  $f$ : 0.1 – чорна, 0.3 – червона, 0.7 – синя, 1.2 – зелена

Ефективність вилучальної здатності МФ визначається площею робочої зони в  $\Omega$ , в якій  $f \geq f_{\min}$ , де  $f_{\min}$  – приведенне відносне значення сили  $F_{\min}$ , достатньої для вилучення магнітних часток. Для визначення площі, обмеженої ізодиною зі складною геометрією, запропоновано ефективний спосіб візуалізації «світливих» зон, в межах яких  $f < f_{\min}$ . Виділення цих зон значно полегшує порівняльний аналіз різних МФ.

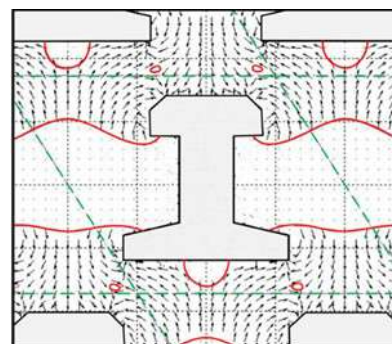


Рис. 3. Напрями сил магнітного поля в зоні, обмеженій ізодиною  $f = 0.3$

### Список літератури

- [1] С.Т. Толмачев, С.Л. Бондаревский, А.В. Ильченко. Магнитные свойства многокомпонентных гетерогенных сред с двоякопериодической структурой. Електротехніка і Електромеханіка, 2020, № 1. С. 29-38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.05>.
- [2] С.Т. Толмачов, О.В. Ільченко. Математичне моделювання магнітного поля високоградієнтних магнітних сепараторів з двояко-періодичною матричною структурою. Технічна електродинаміка. 2025. № 2. С. 3-11 / DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.02.003>

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВБУДОВАНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ ПРИ РОЗКИДІ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ

В. Ю. Розов, К. Д. Кундіус, Д. Є. Пелєвін

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України

Одним із основних джерел магнітного поля (МП) промислової частоти, що негативно впливають на здоров'я населення, є вбудовані у житлові будинки трансформаторні підстанції (ТП) 6(10)/0,4 кВ [1]. Низьковольтні струмопроводи цих ТП створюють в наближених житлових приміщеннях МП, індукція якого може істотно (в 3-16 разів) перевищувати гранично допустимий рівень 0,5 мкТл [2].

На сьогодні МП ТП та засоби його екранування достатньо досліджені тільки для найбільш небезпечного розташування житлових приміщень над ТП, коли МП ТП є максимальним і формується основним струмопроводом ТП з номінальним струмом  $I$ . При цьому не вирішено залишилась задача моделювання МП в житлових приміщеннях, розташованих на одному поверсі з вбудованими ТП і суміжних з ними. Особливо це стосується приміщень, що розташовані за ТП (рис. 1), в яких на рівень МП можуть впливати вертикальні струмопроводи вихідних фідерів ТП. МП цих струмопроводів залежить від величини струмів навантаження і їх розкиду, який може досягати  $\pm 30\%$  [2]. Визначення залежності рівня МП в житловому приміщенні від режиму навантаження фідерів ТП є важливим, так як така залежність може істотно ускладнити синтез засобів зменшення МП.

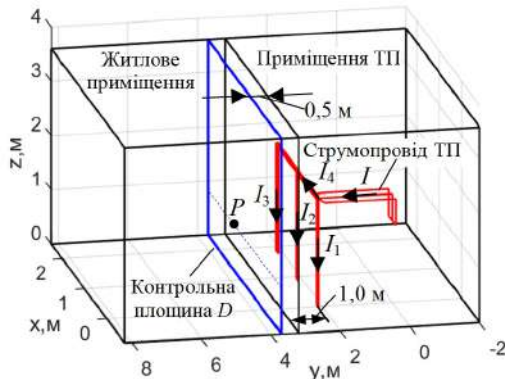


Рис. 1. Схема взаємного розташування низьковольтного струмопроводу ТП та досліджуваного житлового приміщення

**Метою** роботи є дослідження впливу струмів навантаження фідерів ТП на рівень МП в житлових приміщеннях, суміжних з ТП і розташованих на одному поверсі з ними.

Математичну модель МП низьковольтного струмопроводу ТП (рис. 1) побудуємо на основі закону Біо-Савара з використанням принципу суперпозиції. При цьому МП у точці спостереження  $P$ , що лежить на контрольній площині  $D$ , визначається векторною сумою індукції від кожної з прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 1), геометричні розміри якого відповідають [3]. Моделювання виконуємо для ТП 630 кВА з номінальним струмом 900 А при припущенні, що всі прямолінійні ділянки струмопроводу

зорієнтовані паралельно координатним осям і моделюються струмовими нитками. Також припускаємо, що трифазний струм  $I$  основного горизонтального струмопроводу є симетричним і номінальним, та відповідає сумі струмів  $I_1+I_2+I_3$  фідерів ТП. При цьому струми  $I_1, I_2, I_3$  мають максимальний розкид  $\pm 30\%$ .

Результати моделювання діючого значення індукції МП на площині  $D$  представлені на рис. 2 і в табл. 1 і показують, що для найгіршого випадку розкиду струмів, індукція  $B_{max}$  у порівнянні із симетричним режимом змінюється менш ніж на 6 %.

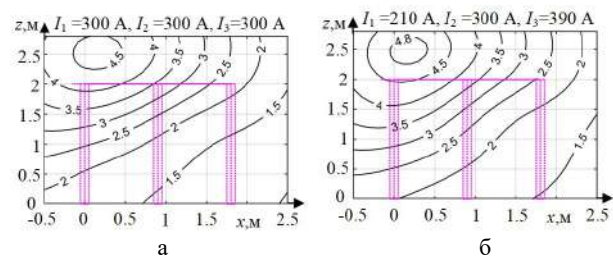


Рис. 2. Розподіл індукції МП на контрольній площині  $D$  житлового приміщення при симетричному навантаженні фідерів (а) і для найгіршого випадку розкиду струмів навантаження (б)

Таблиця 1. Максимальна індукція МП  $B_{max}$  в житловому приміщенні при розкиді струмів  $\pm 30\%$  у вихідних фідерах ТП

№	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$	$B_{max}, \text{мкТл}$
0	300	300	300	4,634
1	300	210	390	4,707
2	300	390	210	4,569
3	210	300	390	4,884
4	390	300	210	4,418
5	210	390	300	4,807
6	390	210	300	4,472

Таким чином, розкид на  $\pm 30\%$  струмів навантаження фідерів ТП спричиняє незначний вплив (менш 6 %) на рівень МП в суміжних житлових приміщеннях, і їм можна знехтувати.

### Список літератури

- [1] Кундіус К. Д. Системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій : дис. д-ра філософії : 141 / Націон. техн. ун-т "ХП". Харків, 2023. 136 с.
- [2] Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
- [3] Пелєвін Д. Є. Нормалізація магнітного поля в житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими трансформаторними підстанціями 6(10)/0,4 кВ потужністю 100-400 кВА. Вісник НТУ "ХП". Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, Харків: НТУ "ХП", 2024. № 2 (12). С. 39-45.

## ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ МАГНІТОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ СОЛЕНОЇДІВ З ТОНКОГО ПРОВОДУ ТА МАГНІТІВ

В. М. Михайлов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У 1954 р. І. С. Тамм запропонував замінити дію кожного витка циліндричного соленоїда, по котрому протікає постійний струм (рис. 1, а), дією подвійного однорідного магнітного шару фіктивних магнітних зарядів. Через компенсацію полів сусідніх простих шарів магнітних зарядів протилежних знаків залишаються тільки два прості шари на торцях соленоїда. З іншого боку, однорідно намагнічений вздовж осі циліндр (магніт, рис. 1, б) згідно дипольній моделі намагнічення, що основана на електростатичній аналогії [1], теж може бути замінений системою однакових диполів фіктивних магнітних зарядів. В результаті схожої компенсації зарядженими залишаються тільки торці циліндра. Таким чином, соленоїд можна замінити магнітом. Але І.С. Тамм підкреслює, що тільки зовнішнє поле вектора напруженості  $\vec{H}$  магніту таке ж, як соленоїда (рис. 1).

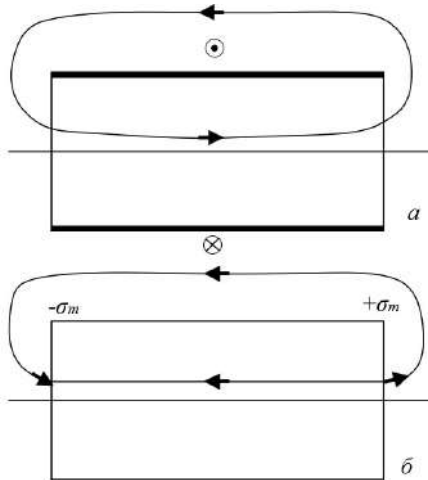


Рис. 1. Соленоїд з тонкого проводу (а) та однорідно намагнічений циліндр (б)

Нехай маємо плоский контур з струмом  $I_k$  у немагнітному середовищі. Замінімо цей контур однорідним подвійним магнітним шаром (ідея належить Амперу) з магнітним моментом

$$\tau_m = \sigma_m l, \quad (1)$$

де:  $\sigma_m$  – поверхнева густина фіктивних магнітних зарядів (густина простого шару),  $l$  – відстань між простими шарами з густиною  $\pm\sigma_m$ . Із двох умов стрибка потенціалу подвійного шару

$$\varphi_m^+ - \varphi_m^- = I_k \quad (2)$$

та

$$\varphi_m^+ - \varphi_m^- = \frac{\tau_m}{\mu_0} \quad (3)$$

витікає

$$\tau_m = \mu_0 I_k, \quad (4)$$

де:  $\varphi_m^+$ ,  $\varphi_m^-$  – потенціали на межах подвійного шару.

Зіставляючи формули (1) та (4), отримуємо умову еквівалентності плоского контуру з струмом

однорідному подвійному шару фіктивних магнітних зарядів

$$\sigma_m l = \mu_0 I_k. \quad (5)$$

Нехай в умові (5) плоским контуром є виток циліндричного соленоїда (рис. 2;  $\vec{n}_M$  – одинична нормаль,  $\vec{I}_z$  – орт осі  $z$ ) з постійним струмом  $I$ ,  $l$  – шаг намотки соленоїда. Тоді із (5) маємо умову еквівалентності соленоїда і магніту (умову І.С. Тамма)

$$\sigma_m = \mu_0 \eta, \quad (6)$$

де  $\eta$  – лінійна густина струму в соленоїді;  $\eta = Iw/b$ ;  $w$ ,  $b$  – число витків та довжина соленоїда.

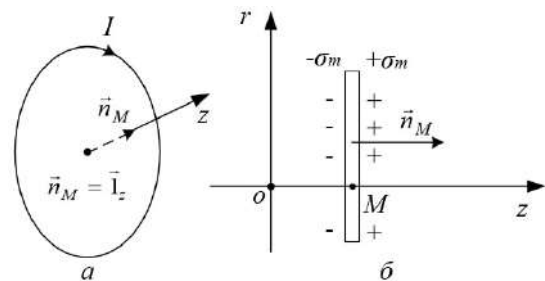


Рис. 2. Виток циліндричного соленоїда (а) та відповідний подвійний шар фіктивних магнітних зарядів у циліндричних координатах (б)

Отримано формули для скалярного потенціалу магнітостатичного поля подвійного шару у формі круглого диску радіуса  $r_2$ . Для випадку радіальної координати точки спостереження поля  $P$   $r_P < r_2$

$$\varphi_m(P) = -\frac{I}{\pi} \left\{ r_2 \int_0^\infty K_1(kr_2) I_0(kr_P) \times \right. \\ \left. \times \sin[k(z_P - z_M)] dk \begin{cases} -\frac{\pi}{2}, & z_P > z_M \\ +\frac{\pi}{2}, & z_P < z_M \end{cases} \right\}, \quad (7)$$

де  $I_0(kr_P)$ ,  $K_1(kr_2)$  – модифіковані функції Бесселя,  $z_M$  – осьова координата середини подвійного шару (рис. 2, б).

Із формули (7) витікають значення потенціалів на межах подвійного шару

$$\varphi_m^+(P) = \frac{I}{2}, \quad \varphi_m^-(P) = -\frac{I}{2}, \quad (8)$$

котрі узгоджуються з граничною умовою (2).

Список літератури

- [1] Mikhailov V. M., Chunikhin K. V. On electrostatic analogy of magnetostatic field in inhomogeneous magnetized medium. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2017. no. 5. pp. 38–40. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.05.

## STATISTICAL ANALYSIS OF TURBOGENERATOR FAILURE CAUSES WITH REGARD TO THEIR DESIGN SOLUTIONS

V. V. Shevchenko<sup>1</sup>, K. O. Lazurenko<sup>1</sup>, T. V. Arestova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Bakhmut Educational and Scientific Vocational-Pedagogical Institute of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

The purpose of the study is to determine the necessary actions and directions for using the experience of maintenance, operation history, repairs, and modernizations, and to form operational information on the condition of turbogenerators (TG) that are already in a worn state. Archiving the history of operation and maintenance of TGs at thermal power plants, data on repairs and modernization, information on specific test results, and online diagnostics data make it possible to gather information on the most common causes of TG failures. Comparing TGs of different series and manufacturers allows to evaluate the influence of design features of elements and assemblies on their reliable operation under various modes, as well as to determine and compare a number and frequency of defects. This information is needed both for choosing the most reliable solutions in the design of new generators and for modernization.

Extending the service life of power plant systems and equipment in recent decades has been a viable alternative to their complete replacement. Replacing TGs with new ones, due to the global economic crisis, has become the only option for maintaining the operation of thermal power in our country during wartime, and it will remain the main approach in the postwar period.

The war in Ukraine has been a harsh but undeniable proof of the vulnerability of centralized power grids with large generating capacities. It has shown that protecting the energy sector requires decentralization of electrical grids and limiting TG capacities at thermal power plants to 500 MW (with the exception of nuclear power plants). Additionally, the global trend of replacing hydrogen with air for cooling the internal volume of TGs with capacities up to 300 MW must be taken into account. This forecasts the next significant step in the development of the theory and practice of building new types of TGs. Therefore, it is essential to understand the operational history of TGs, know their assemblies, elements, and overall design, in order to determine which components most often developed defects during operation that caused TG failures. Among TGs of the same power class, the best design solutions for specific elements and assemblies should be chosen for future design.

Collecting accurate, standardized statistics on the number and causes of failures is quite difficult, as energy companies often conceal such information. However, based on the analysis of open reports, publications by energy associations (such as CIGRE, EPRI), and operational experience, it is possible to establish a list of the most common TG failure causes.

Table 1. The Most Frequent Causes of TG Failures

Element / Assembly	Elements and assemblies, causes of failures
Stator (up to 30-40% of failures)	1) Winding insulation: aging, gradual degradation due to thermal cycling; switching and atmospheric overvoltages, resonance phenomena in the grid; mechanical damage due to increased vibration; formation of corona and partial discharges caused by dust-oil deposits and moisture. 2) Stator core: weakening of crimping, "loosening" of end packages; damage to inter-sheet insulation up to "steel fire". 3) Water leaks into the winding (for water-cooled TGs).
Excitation system (15-25% of failures)	1) Failures of semiconductor valves (thyristors/diodes). 2) Failures of the automatic reserve switching system (ARS). 3) Wear of the brush-contact unit.
Rotor (10-20% of failures)	1) Mass imbalance, shaft misalignment. 2) Rotor winding damage, inter-turn short circuits. 3) Metal aging at the fastening points of retaining wire rings.
Cooling system (10-15% of failures)	1) Hydrogen leaks, risk of fire and explosion, most often at shaft seals and flange joints. 2) Increased hydrogen moisture. 3) Contamination of coolers.
Bearing and lubrication system (5-10% of failures)	1) Bearing shell wear, oil contamination, pressure drop, improper alignment, vibration. 2) Breakdown of the oil film that ensures rotor shaft "floating."

Knowing the most common causes of failures allows designers to choose design solutions that have shown the best results in reducing TG failure causes under various operating conditions.

### References

- [1] Kensytskyi, O.H., Kramarskyi, V.A., Kobzar, K.O. On the Restoration of the Turbogenerator Fleet of Ukrainian Power Plants. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2024, 24, 106-113.

## ПІДВИЩЕННЯ ПИТОМИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ МІСЬКОГО ТРОЛЕЙБУСА

В. В. Гребеніков<sup>1</sup>, Р. В. Гамалія<sup>1</sup>, С. А. Дадичін<sup>1</sup>, В. С. Попков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

На даний момент для приводу тролейбусів переважно використовують асинхронні двигуни (АД), висока ефективність і надійність яких порівняно з тяговими двигунами постійного струму забезпечила їм широке застосування для приводу транспортних засобів. Але асинхронні тягові двигуни мають низку недоліків: недостатня ефективність за невеликої швидкості, недостатньо жорстка механічна характеристика в діапазоні великих швидкостей, схильність до значних теплових втрат.

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є перспективною альтернативою асинхронним двигунам завдяки своїм високим питомим показникам – відношенню крутного моменту та потужності до маси. Це дає змогу створювати більш компактні та легкі двигуни, зберігаючи при цьому високу продуктивність [1].

Наразі в галузі створення СДПМ накопичено великий досвід, розроблено ефективні електромагнітні структури з внутрішніми постійними магнітами (ІРМ) [2]. Показано, що в разі використання передових методів керування тягового двигуна з постійними магні-

тами, привід тролейбуса на його базі матиме високі динамічні характеристики [3]. Слід відмітити, що СПДМ з рідинним охолодженням вже застосовуються концерном HESS AG (Швейцарія) у тролейбусах [4].

Метою даної роботи є підвищення питомих характеристик тягових електродвигунів для міського тролейбуса шляхом проведення порівняльного аналізу конструктивних варіантів синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), виконаних у габаритах існуючого асинхронного двигуна, та зіставлення їх електромеханічних параметрів при рідинному охолодженні з характеристиками серійних асинхронних двигунів з повітряним охолодженням.

Під час проектування СПДМ за основу було взято статор тягового асинхронного електродвигуна АТД-4. Варіанти конструкцій СПДМ розраховані в програмі Simcentre MotorSolve і охоплюють типи двигунів, які нині набули широкого поширення.

В табл. 1 наведені розрахункові дані чотирьох варіантів двигунів, з якої випливає, що варіант 4 є оптимальним ( $K_M = 6,91 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$ ).

Таблиця 1. Варіанти конструкцій синхронних двигунів із постійними магнітами

Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Швидкість обертання (об/хв) – n	2500			
Загальна маса актив. частин (кг) – m <sub>Σ</sub>	171,8	178,8	175,3	178
Крутний момент (Н·м) – M <sub>ou</sub>	1094,5	1203,5	993,5	1229,3
Вихідна потужність (кВт) – P <sub>ou</sub>	286,5	315,1	260,1	321,8
ККД (%) – η	97,0	97,3	97,4	97,4
$K_M = M_{ou}/m_{\Sigma}$ (Н·м/кг)	6,37	6,73	5,67	6,91

Застосування постійних магнітів та рідинного охолодження у СДПМ дають змогу значно поліпшені питомими характеристики (відношення крутного моменту і потужності до маси) порівняно з АД, який використовуються в тролейбусах. Питома потужність оптимального варіанта СДПМ становить 0,92 кВт/кг, що в 4,3 рази вище, ніж у стандартного АД типу ДТА-1У1 ( $K_p = 0,21 \text{ кВт}/\text{кг}$  згідно документації).

Подальше підвищення питомих характеристик тягового приводу тролейбуса можливе за рахунок використання високошвидкісних двигунів із постійними магнітами у поєднанні з магнітним редуктором (МР). Таке поєднання дає змогу істотно зменшити габарити і вагу електропривода.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України – проект «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту», 2024-2025 рр.

### Список літератури

- [1] E. Tudor *et al.* Case Study of a Newly Developed Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Buses. 2023. *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania. pp. 1-5. DOI: 10.1109/ATEE58038.2023.10108323.
- [2] Z. Wang *et al.* Optimization design and torque performance research of interior permanent magnet synchronous motor. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, No. 1, pp. 538. DOI: 10.1038/s41598-025-93285-x.
- [3] Seung-Ki Sul, Young-Cheol Kwon. Modelling and Control of Automotive Grade Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020, October 11-15.
- [4] Hess AG <https://www.hess-ag.ch/> (дата звернення 05.07.2025).

## ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНИХ ВТРАТ В ОСЕРДІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

**В. І. Міліх**, В. О. Калінін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

При проектуванні електричних машин, в тому числі і трифазних асинхронних двигунів (ТАД) [1], важливою складовою є визначення магнітних втрат потужності (МВП). Це відбувається на основі теорії магнітних кіл, тому ці втрати розраховуються на відокремлених укріплених ділянках шихтованих феромагнітних осердь. У їх межах магнітна індукція (МІ) вважається розподіленою рівномірно, і так само рівномірно розподіляються МВП, що є грубим припущенням.

Здавна і досі [1] для МВП в сталевих феромагнітних осердях розповсюдженою є формула:

$$P_{mag} = K_{mag} p_{1,0/50} \left( \frac{f_s}{50} \right)^\beta m_{Fe} B_m^2, \quad (1)$$

де  $f_s$  – частота змінного магнітного поля, Гц;  $\beta$  – показник ступеню для її зведення до 50 Гц;  $B_m$  – амплітуда МІ в осерді, Тл;  $p_{1,0/50}$  – питомі магнітні втрати, Вт/кг;  $m_{Fe}$  – маса осердя, кг;  $K_{mag}$  – технологічний коефіцієнт.

Окрім того, МВП розраховуються лише у режимі неробочого ходу (НХ). Але в режимі навантаження (РН) розподіл магнітного поля (МП) суттєво відрізняється від режиму НХ, у якому реально працює ТАД.

Запобігти зазначеним припущенням і отримати реалістичніші дані про МВП дозволяють сучасні програмні засоби, створені на основі методу скінчених елементів, до яких відноситься популярна програма FEMM, і особливо при її підтримці автоматизованими розрахунками з використанням скриптів – програм, написаних на алгоритмічній мові Lua.

Метою даної роботи є подання універсального методу уточненого розрахунку МВП втрат в ТАД за допомогою програми FEMM у сукупності з розробленим для цього скриптом Lua.

Аналіз МВП відбувається у чотириполюсному ТАД потужністю 2,2 кВт. Його електромагнітна система надана на рис. 1 в її поперечному перерізі.

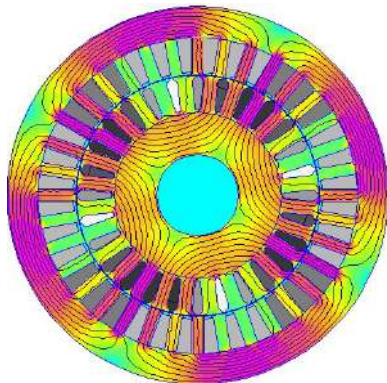


Рис. 1. Електромагнітна система ТАД з розподілом струмів в його обмотках та магнітного поля в РН

Розроблена методика уточненого розрахунку МВП полягає у розділенні зубців та спинки осердя статора у межах зубцевого кроку на мінісектори, що надано на рис. 2, а. Для кожного мінісектора на решті

зубцевих кроків є аналоги з точки зору періодичності, що показано на рис. 2, б для одного мінісектора зубця та одного мінісектора спинки осердя.

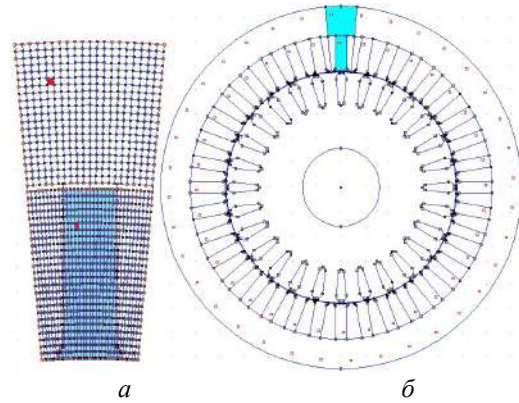


Рис. 2. Розділення спинки та зубців осердя статора на мінісектори та повторювані їх структури

Після розрахунку МП для кожної сім'ї періодично повторюваних мінісекторів визначається максимум модуля МІ  $B_{ms}$ . По отриманому розподілу таких значень у межах зубцевого кроку (рис. 2, а) розраховуються середні значення максимумів та середньоквадратичне значення максимумів модуля МІ

$$B_{mav} = \frac{1}{S_{Fe}} \sum_k B_{ms,k} S_{e,k}; \quad B_{mav2} = \frac{1}{S_{Fe}} \sum_k B_{ms,k}^2 S_{e,k}, \quad (2)$$

де:  $K$  – кількість мінісекторів;  $S_{e,k}$  – площа кожного з них;  $S_{Fe}$  – сумарна площа усіх.

Розрахунки за (2) виконуються окремо у поперечному перерізі зубця та сектора ярма.

Головним результатом є значення  $B_{mav2}$  (2), яке тепер підставляється у (1) для обчислення МВП замість звичайного значення квадрата амплітуди МІ  $B_m^2$ , яка була однаковою на усій ділянці осердя.

Результати розрахунків надаються в табл. 1 для його варіантів: var.1 – чисельно-польовий; var.2 – класична методика. Висновки роботи є наочними.

Таблиця 1. Порівняння результатів розрахунків МІ та МВП на ділянках осердя статора в ТАД

Варіант	Режим	Спинка осердя			Зубці осердя		
		$B_{mav}$ , Тл	$B_{mav2}$ , Тл	$P_{mag}$ , Вт	$B_{mav}$ , Тл	$B_{mav2}$ , Тл	$P_{mag}$ , Вт
var.1	НХ	1,80	3,24	71	1,68	2,82	30
	РН	1,67	2,78	61	1,86	3,48	36
var.2	НХ	1,75	-	67	1,6	-	26

### Список літератури

- [1] **Міліх В. І.** Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора: навч. посібник. – Харків : ФОП Панов А.М., 2023. – 112 с.

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ВИСОКОБОРОТНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

О. С. Михайличенко, Л. В. Шилкова, А. М. Масленніков

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У системах автономного електропостачання, зокрема у газотурбінних, суднових, мобільних і резервних енергетичних комплексах, актуальною задачею є підвищення питомої потужності, енергоефективності та надійності електричних машин при одночасному зменшенні їх маси та габаритів. Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є впровадження адитивних технологій (3D-друку), які дозволяють створювати деталі складної просторової форми, інтегрувати системи охолодження, а також зменшити кількість технологічних операцій і відходів виробництва [1–2].

Метою даної роботи є аналіз можливостей застосування технологій 3D-друку у виготовленні окремих елементів високооборотного синхронного генератора для систем автономного електропостачання з метою підвищення його техніко-експлуатаційних характеристик.

Огляд сучасних досліджень [1–4] показує, що адитивне виробництво стає ефективним інструментом при створенні високошвидкісних електричних машин. У роботі [1] підкреслюється, що технології SLM (Selective Laser Melting) і DMLS (Direct Metal Laser Sintering) дозволяють формувати топологічно оптимізовані корпуси і статорні пакети з інтегрованими каналами охолодження. У публікації [2] автори доводять, що застосування 3D-друку забезпечує можливість створення ротора зі складною внутрішньою структурою, що зменшує момент інерції і покращує балансування при високих швидкостях обертання.

Дослідження [3] демонструє перспективність використання композитних магнітних матеріалів із порошків м'якого заліза в полімерній матриці. Отримані зразки характеризуються низькими втратами на гістерезис та стабільними магнітними властивостями при підвищених температурах, що є особливо важливим для високооборотного синхронного генератора. У роботі [4] виконано моделювання феромагнітних осердь, виготовлених методом 3D-друку, і показано, що при оптимальному виборі параметрів друку можна досягти магнітних характеристик, близьких до електротехнічних сталей, з меншими втратами на вихрові струми.

Аналіз цих робіт дозволяє виділити основні напрямки практичного застосування 3D-друку у конструкції високооборотного синхронного генератора:

- корпус генератора: виготовлення з алюмінієвих або титанових порошків для зменшення маси та інтеграції системи охолодження;

- осердя статора: друк із феромагнітних композитів типу Soft Magnetic Composites (SMC), що забезпечують складну геометрію магнітопроводу та зниження втрат;

- ротор: реалізація решітчастої або порожнистої конструкції з високою міцністю, можлива інтеграція постійних магнітів без додаткової обробки;

- система охолодження: створення внутрішніх каналів у корпусі та статорі з підвищеним тепловідводом;

- допоміжні елементи: кронштейни, кожухи, кріплення, що можуть друкуватися з полімерів для зниження маси.

Використання адитивних технологій дозволяє підвищити питому потужність генератора на 20–40 %, зменшити масу активних частин на 25–30 %, покращити тепловий режим та знизити рівень вібрацій при обертах понад 30 000 об/хв. Подальші дослідження планується спрямувати на моделювання та експериментальну перевірку друківаних сегментів ротора з урахуванням динамічних і термомеханічних навантажень.

Важливою науковою новизною є можливість одночасної оптимізації електромагнітних, теплових і механічних параметрів генератора ще на етапі 3D-моделювання. Використання алгоритмів топологічної оптимізації спільно з адитивним виробництвом дозволяє проектувати елементи, що мають мінімальні напруження при максимальній жорсткості, забезпечуючи баланс між механічною міцністю і магнітною ефективністю. Окрім цього, застосування технології «розумного друку» (Smart Printing) дає можливість виготовляти багатоматеріальні деталі з локально змінними властивостями – наприклад, поєднувати зони з високою магнітною проникністю та підвищеною теплопровідністю в одному виробі. Це відкриває перспективи створення адаптивних електричних машин нового покоління, що поєднують легкість, міцність і високу ефективність.

Таким чином, технології 3D-друку відкривають нові перспективи створення високоєфективних, легких та надійних високооборотних синхронних генераторів для систем автономного електропостачання. Їх застосування дозволяє реалізувати принцип «розумного» конструювання, коли електромагнітні, теплові та механічні характеристики формуються безпосередньо на етапі проектування та виготовлення виробу.

### Список літератури

- [2] Васильовський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Київ: НТУУ «КПІ», 2007. 191 с.
- [3] Podoltsev A. D., Kucheryavaya L. N. Multiphysics modeling in electrical engineering : monograph. Kyiv : Ukrainian national academy of sciences institute of electrodynamics, 2015. 305 p.
- [4] Тягові електродвигуни. Режим доступу: <https://prom-ocean.com.ua/elektrodvigateli-ua/tyagovye-elektrodvigateli-ua> (дата звернення: 15.01.2024).

## ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ МАГНІТНИХ РЕДУКТОРІВ

В. В. Гребеніков<sup>1</sup>, Р. В. Гамалія<sup>1</sup>, В. С. Попков<sup>2</sup><sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ, Україна

Останнім часом у вітроенергетиці все ширше застосовуються магнітні редуктори (МР) на постійних магнітах, які завдяки своїм перевагам дозволяють замінити традиційні механічні мультиплікатори [1, 2].

Відсутність контакту зубчастих коліс зменшує шум і вібрації, що особливо важливо для вітроустановок поблизу населених пунктів. Передача моменту здійснюється за рахунок взаємодії магнітних полів, тому немає потреби у мастильних матеріалах, що спрощує обслуговування та підвищує екологічність системи.

Крім того, МР запобігає пошкодженню установки під час різких змін швидкості вітру, оскільки високошвидкісний і низькошвидкісний ротор магнітного редуктора мають можливість прослизати при різкому збільшенні швидкості вітру і потім втягуватися в синхронізм при зменшенні швидкості вітру.

Необхідно також враховувати, що для стабільної роботи МР в умовах виникнення короткочасних перевантажень, обумовлених різкими змінами швидкості вітра, потрібно мати 30% запас по максимальному крутному моменту [2].

На рис. 1 показана конфігурація магнітної системи та картина магнітного поля циліндричного МР. Основні елементи МР наступні: зовнішній ротор, який складеться з ярма 1, на якому закріплені постійні магніти 2; модулятор (набір феромагнітних полюсів 3, виконаних із електротехнічної шихтованої сталі); внутрішній високошвидкісний ротор, який складається з ярма 4, на якому закріплені постійні магніти 5.

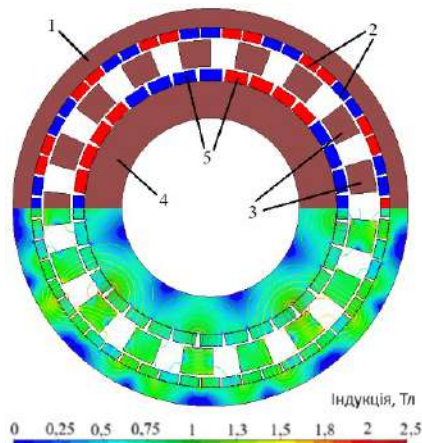


Рис. 1. Магнітний редуктор

Якщо вал вітротурбіни з'єднаний з валом модулятора то коефіцієнт редукції МР  $K_{MP}$  обчислюється за формулою

$$K_{MP} = \frac{p_l + p_h}{p_h}, \quad (1)$$

де:  $p_l$  та  $p_h$  – кількість пар полюсів на зовнішньому

та внутрішньому роторах МР відповідно. Здатність передавати крутний момент між валами МР описується статичною моментною характеристикою (СМХ), яка являє собою залежності крутних моментів від кута  $\alpha_h$  повороту внутрішнього високошвидкісного ротора МР.

В табл. 1 наведені експериментальні та розрахункові максимальні крутні моменти: на валу високошвидкісного ротора –  $M_h$  та на валу модулятора –  $M_m$ . Всі розрахунки виконані в програмному пакету Simcenter Magnet.

Таблиця 1. Максимальні крутні моменти на валах

	Експеримент	2D-модель	3D-модель
$M_h$ , Н·м	27,2	34,1	27,3
$M_m$ , Н·м	103	146,2	116,4

Для більшості циліндричних електричних машин, двовимірні (2D) кінцево-елементні комп'ютерні моделі забезпечують необхідну розрахункову точність. Однак для магнітних редукторів (МР), у яких осьова довжина менша за зовнішній діаметр, точності 2D моделювання виявляється недостатньою. Ця невідповідність обумовлена наявністю суттєвих магнітних полів розсіяння в торцевих зонах МР, які не можуть бути адекватно враховані в 2D моделях.

Результати порівняльного аналізу однозначно показують, що 2D комп'ютерні моделі не забезпечують достатньої точності при розрахунку СМХ циліндричних МР. Наприклад, максимальний крутний момент модулятора 2D-моделі (146,2 Н·м) перевищує експериментальне значення на 42%. Водночас, 3D-модель (116,4 Н·м) показує збіжність з експериментом, з відхиленням 13%. Для високошвидкісного ротора розбіжність між експериментом (27,2 Н·м) та 2D-моделлю (34,1 Н·м) дорівнює 25,4%, тоді як для 3D-моделі (27,3 Н·м) відхилення складає лише 0,4%.

Таким чином, для забезпечення необхідної точності при проектуванні МР та для коректного розрахунку 30% запасу максимального крутного моменту, критично необхідне використання 3D моделювання.

## Список літератури

- [1] Ruiz-Ponce, G., Arjona, M.A., Hernandez, C., Escarela-Perez, R. A. Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies* 2023, 16(4), 1721. <https://doi.org/10.3390>.
- [2] Grebenikov V. V., Podoltsev O.D., Gamaliia R.V., Tazhibayev A.A., Arynov N.N., Sakhno O.A. Computer modeling of transient electromechanical processes in a Wind power plant with a magnetic gearbox. *Техн. Електродинаміка* 2024, № 6, С. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2024.06.056>.

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІКРОТРИЩИН НА СТАРІННЯ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

М. О. Поляков, В. В. Василевський, О. Д. Барабан  
Національний Університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

Целюлозна ізоляція є критичним елементом силових маслонаповнених трансформаторів, оскільки саме її ресурс великою мірою визначає термін служби трансформатора в цілому. Окрім термічного та хімічного старіння, механічні впливи – вібрація, удари, динамічні зусилля під час коротких замикань і трансформації струмів – призводять до накопичення мікротріщин, зниження механічної міцності ізоляції та прискореного руйнування целюлозної матриці. Сучасні дослідження показують, що комбінований (електро-термо-механічний) вплив значно прискорює деградацію ізоляції. Завдання діагностики і моделювання таких процесів може бути вирішене із застосуванням мультифізичних підходів та програмного пакета FEMM [1-2].

Метою роботи є підвищення точності оцінки старіння целюлозної ізоляції шляхом врахування в моделі старіння впливу мікротріщин на швидкість деградації целюлози.

Завдання роботи:

1 Розробка геометричної моделі силового трансформатора в середовищі FEMM та визначення необхідних параметрів та залежностей для аналізу впливу мікротріщин на старіння целюлозної ізоляції. 2 Дослідження впливу мікротріщин на процес старіння ізоляції, виявлення закономірностей деградації матеріалу під їх дією. 3 Аналіз можливості використання отриманих даних для створення більш точної мультипольової моделі, що дозволить враховувати одночасний вплив різних фізичних полів на стан ізоляції.

Процес моделювання включав себе наступні етапи: 1. Створення геометричної моделі трансформатора. 2. Задання матеріальних властивостей. 3. Моделювання полів (рис 1).

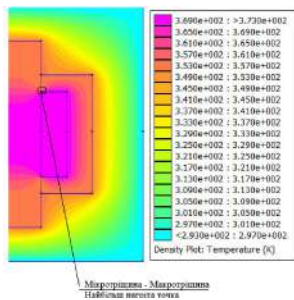


Рис. 1. Температурний профіль трансформатора, отриманий в пакеті програм FEMM

В результаті дослідження моделі, наведеної на рис.1, можна побачити перколяцію дефектів: при досягненні критичної щільності мікротріщин відбувається різке зниження механічних і діелектричних властивостей (зменшується значення ступеня полімеризації целюлози DP, збільшуються діелектричні втрати і ймовірність пробоя). Практичні критерії – DP < 200–300 та / або концентрація фуранів в трансформаторному маслі вище контрольного порогу.

Для кількісної оцінки впливу мікротріщин знаходимо найбільш нагріту точку в місці руйнування целюлозної ізоляції та здійснюємо розрахунок відносного скорочення строку служби ізоляції у цій точці за відомим виразом [3–5]:

$$L(t, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \exp \left[ \ln 2 \times \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt, \quad (1)$$

де:  $L(t, t_0 + T)$  – скорочення строку служби ізоляції в інтервалі часу, який починається в момент  $t_0$  та має тривалість  $T$ ;  $\theta_h$  – температура найбільш нагрітої точки обмотки;  $\Delta$  – температурна константа старіння згідно з ІЕС 60076-7.

За результатами розрахунку отримаємо графік швидкості старіння целюлозної ізоляції в точці максимального пошкодження, де мікротріщини об'єднуються в макротріщини та спостерігається найбільше нагрівання. Проведене дослідження показало, що комбінований підхід на основі мультипольового аналізу з урахуванням утворення мікротріщин є більш ефективним і науково обґрунтованим інструментом для моделювання процесів старіння ізоляції та оптимізації експлуатаційної надійності силових трансформаторів. Результати роботи демонструють, що тема є актуальною і потребує подальшого опрацювання.

### Список літератури

- [1] Yuan Z., Wang Q., Ren Z., Lv F., Xie Q., Geng J., Zhu J., Teng F. Investigating Aging Characteristics of Oil-Immersed Power Transformers' Insulation in Electrical-Thermal-Mechanical Combined Conditions [Електронний ресурс] / Z. Yuan, Q. Wang, Z. Ren et al. // Polymers. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 4239. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/polym15214239>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.04.2025.
- [2] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User Manual [Електронний ресурс] / D. Meeker. – Version 4.2. – 2022. – Режим доступу: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. – User Manual. – Дата звернення: 01.03.2025.
- [3] Li J. et al. A novel aging indicator of transformer paper insulation based on dispersion staining colors of cellulose fibers in oil //IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2018. – Т. 34. – №. 4. – С. 8-16.
- [4] Cigré B. 323: Ageing of cellulose in mineral oil insulated transformers //Study Committee D. – 2007. – Т. 1.
- [5] Матусевич О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць //Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2014. – №. 92. – С. 31-36.

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ТРАНСЛЯТОРА ЛІНІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОПЕРЕЧНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ГАЛЬМІВНИХ ЗУБЦЕВИХ СИЛ ЗЧЕПЛЕННЯ

О. О. Дунев, А. В. Єгоров, О. Р. Корсаков, Д. В. Суворін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Використання лінійних генераторів для перетворення енергії морських хвиль є актуальним напрямом розвитку відновлюваної енергетики. Такі генератори дозволяють безпосередньо перетворювати коливальний рух хвиль у електричну енергію без проміжних механічних передач, що підвищує ефективність і надійність системи. Зростання попиту на екологічно чисті джерела енергії робить технології хвильової генерації перспективними для прибережних регіонів світу [1].

У лінійному генераторі з постійними магнітами гальмівна зубцева сила зчеплення – це сила протидії руху, що виникає під час перетворення механічної енергії хвиль у електричну. Вона зумовлена електромагнітною взаємодією між магнітним полем постійних магнітів та залізом, вздовж якого переміщається транслятор, а також струмом, який індукується в обмотках генератора при навантаженні. Величина гальмівної сили зчеплення визначає, наскільки сильно генератор впливає на рух хвильоприймача, і є важливим параметром для оптимізації ефективності системи.

Метою даної роботи є розробка та дослідження конструкції лінійного генератора з поперечним магнітним потоком і постійними магнітами на трансляторі зі зменшеною гальмівною силою шляхом оптимізації його магнітної системи. Це дозволить підвищити ефективність перетворення енергії коливань хвиль у електричну, зменшити втрати та забезпечити стабільнішу роботу генератора при змінних навантаженнях [2].

Зменшити гальмівну силу у лінійному генераторі з постійними магнітами можна кількома способами. По-перше, варто оптимізувати конструкцію магнітної системи – наприклад, змінити силу або форму магнітного поля, щоб зменшити взаємодію з полюсами статора. По-друге, можна застосовувати регульоване електричне навантаження, яке дозволяє керувати струмом і знижувати електромагнітне гальмування під час роботи [1,3].

Оптимізація конструкції магнітної системи є одним із найефективніших способів зменшення гальмівної зубцевої сили. Зокрема, зміна форми або розташування постійних магнітів, на кшталт скосу пазів, дає змогу зменшити локальні піки магнітного потоку та зменшити зчеплення магнітного поля із феритовими наконечниками полюсів статора. Це дозволяє знизити магнітний опір руху транслятора й забезпечити більш плавну роботу транслятора, із використанням меншої величини вхідної потужності генератора.

У дослідженні, яке проводилося методом скінчених елементів було проаналізовано 3D модель лінійного генератора в режимі неробочого ходу у програмному комплексі Ansys Maxwell 3D.

Було проведено аналіз роботи генератора і порівняно його електрорушійну силу (ЕРС), наведену у його обмотці, до оптимізації і після оптимізації кон-

струкції. Також було порівняно гальмівні сили зчеплення до і після оптимізації конструкції.

Результати зсуву середніх постійних магнітів (ПМ) із кроком 2 мм, наведена ЕРС в обмотці ( $E_{peak}$ ) та сила зчеплення ( $F_{peak}$ ) представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати моделювання

	Значення зсуву ПМ, мм	$E_{peak}, V$	$F_{peak}, N$
Базова модель	0	21,8	87
Зсув ПМ	2	21,5 (-1%)	79 (-9%)
	4	20,8 (-5%)	60 (-31%)
	6	20,2 (-7%)	60 (-31%)

Як видно із результатів моделювання роботи генератора без навантаження, електрорушійна сила при зсуві середнього магніту зменшується не суттєво, проте гальмівні сили зчеплення магнітів із полюсами статора зменшуються значніше, що вже навіть в даному режимі без навантаження дає свій позитивний ефект, який вплине на зменшення величини вхідної потужності і, таким чином, збільшення ККД роботи усєї системи.

Окремо і додатково в подальшому буде розглянуто поведінка роботи генератора під навантаженням. Проте описані вище дослідження в режимі неробочого ходу дають перспективу для використання запропонованого покращення конструкції вже зараз.

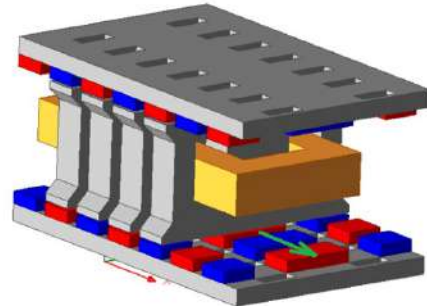


Рис. 1. Зображення розрахункової моделі лінійного генератора із напрямком зсуву середніх магнітів

### Список літератури

- [1] Duniev, O., Yehorov, A., Masliennikov, A., Stamann, M. & Dobzhanskyi, O. Linear transverse flux generator for wave energy conversion: design optimization and analysis. *at – Automatisierungstechnik* 2024, Vol. 72, No. 11, 1066 – 1076.
- [2] Duniev, O., Yehorov, A., Masliennikov, A., Shylkova, L., Stamann, M., Gouws, R. & Dobzhanskyi, O. Investigation of novel designs of linear generators based on transverse-flux machines for wave energy conversion systems. *Proc. EWTEC 2025*, Vol. 16.
- [3] Li, W., Zhu, L., Wu, W., Li, B. Jin, X. & Huang, M. Analysis and optimization of a novel flux modulation linear permanent magnet generator for wave energy converter. *IECON 2023*, 1-6.

## ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНІ ДВИГУНИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Л. І. Мазуренко, М. О. Шихненко, О. В. Джура, О. А. Білик

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, Україна

В наш час на залізницях України "ПАТ Укрзалізниця" використовуються різні модифікації електровозів серій ЧС2, ЧС4, ЧС7, ЧС8, ДС3, ДЕ1, 2ЕЛ5, ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ40, ВЛ60, ВЛ80, ВЛ82, з яких переважна кількість вичерпали свій ресурс та потребують заміни чи модернізації [1]. Насьогодні в Україні серійно не виробляються нові електровози, що змушує покривати їх нестачу за рахунок імпорту нових та продовження служби після модернізації наявних електровозів. Переважна більшість тягових електродвигунів, що експлуатуються електровозами "ПАТ Укрзалізниця", є машинами постійного струму, які за більшістю показників програють іншим типам електричних машин і тому їх заміна є доцільною.

Для тягових приводів залізничного транспорту доцільно розглядати вентильно-індукторні двигуни (ВІД), яким притаманні висока надійність, простота конструкції, енергоефективність та низька вартість виготовлення. Такі двигуни мають менший ККД ніж двигуни з постійними магнітами і тому особливу увагу варто приділяти розробці енергоефективних алгоритмів керування тяговими приводами на їх основі.

В роботі ВІД розглядаються як можлива заміна двигунів постійного струму при модернізації електровозів, наприклад ВЛ10.

Метою роботи є оцінка можливості використання ВІД у тягових приводах залізничних локомотивів.

Для розрахунку показників та характеристик ВІД була використана імітаційна модель, яка базується на розроблених раніше математичних моделях [2, 3].

Було проведено порівняння характеристик ВІД з характеристиками двигуна ТЛ-2К1 (рис. 1). Дані характеристики ВІД отримані при незмінній напрузі, постійних кутах комутації та за відсутності впливу на величину фазного струму. На реальному локомотиві вісім тягових ВІД з'єднуються послідовно, послідовно-паралельно та паралельно, що дозволяє отримати три тягові характеристики при напругах 1500 В, 750 В і 375 В за напруги мережі 3000 В.

Результати показали, що характер зміни механічних та тягових характеристик обох двигунів практично збігається, що дозволяє використовувати запропонований ВІД як заміну тягового двигуна ТЛ-2К1 або інших двигунів постійного струму аналогічного призначення. Величина сили тяги у ВІД при тій же частоті обертання більша ніж у тяговому двигуні ТЛ-2К1 (перевищення може сягати до 40 %), що значною мірою спричинене різницею у ККД двигунів і відповідно більшою потужністю на валу. Коефіцієнт корисної дії ВІД за деякого крутного моменту на 1...2 % більше, ніж у двигуна ТЛ-2К1. Отримане значення ККД може бути підвищено за рахунок ретельної оптимізації геометричних параметрів та обмотувальних даних ВІД на стадії проектування.

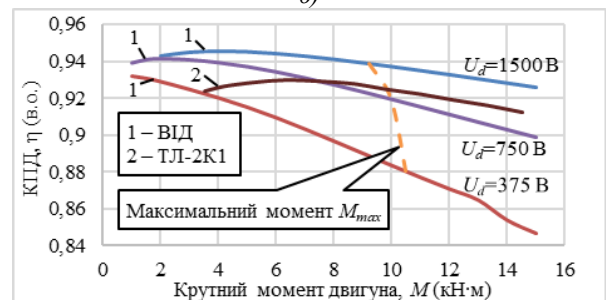
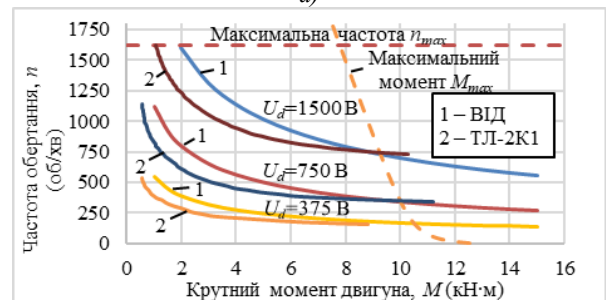
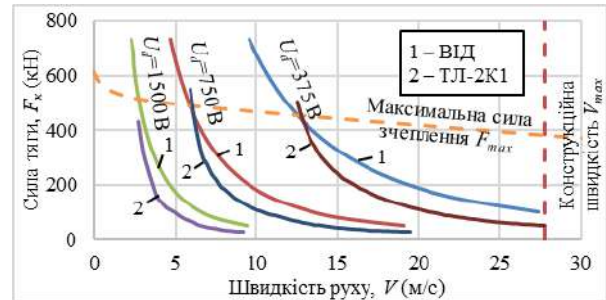


Рис. 1. Порівняння тягових характеристик локомотива (а), механічних (б) і енергетичних характеристик (в) ВІД та двигуна постійного струму

Робота виконувалась в рамках реалізації Проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0075 «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту».

### Список літератури

- [1] Локомотиви Укрзалізниці. URL: <https://traffic.od.ua/news/railua/1197849> (дата звернення: 15.10.2025).
- [2] Shykhnenko M.O., Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk O.A. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". 2018. Pp. 338–342. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559578.
- [4] Шихненко М.О. Стартер-генератор підвищеної енергоефективності на основі вентильно-індукторної машини. дис. ... канд.: 05.09. 01. Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна, 2021. 205 с.

## СПОСІБ ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ РМ ДВИГУНІВ ІЕ5 ДЛЯ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

В. В. Суржик, М. М. Заблодський

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Активне ведення сільського господарства не зважаючи від його форми чи спеціалізації в більшості випадків використовує системи водопостачання для систем поливу, тваринництва, технологічних та адміністративних потреб. Раціональне і ефективне використання водних ресурсів на пряму впливає на собівартість продукції і успішність бізнесу в цілому. Одним із напрямків підвищення конкурентоздатності є зменшення собівартості продукції за рахунок зменшення витрат на електричну енергію. Це можливо за рахунок впровадження високоефективних електродвигунів на насосних агрегатах систем водопостачання і об'єктивній оцінці економічного ефекту в прив'язці до добового графіку споживання [1].

Сучасні виклики для виробників агропродукції змушують підприємців шукати шляхи оптимізації і зниження витрат для забезпечення конкурентоздатності на внутрішньому і зовнішніх ринках сільгосп продукції.

Агро виробники використовують різноманітні системи водопостачання в залежності від їх спеціалізації і потреб. В більшості таких систем використовуються відцентрові насоси з асинхронними двигунами. Такі насоси зазвичай укомплектовані двигунами класу ІЕ1-ІЕ3, в останні роки в Україну почали постачати двигуни класу ІЕ4 [2] і в окремих випадках двигуни класу ІЕ5 [3] (це як правило РМ двигуни на постійних магнітах).

Для прийняття рішення про доцільність заміни існуючих двигунів на високоефективні пропонується модель розрахунку добового споживання насосу в прив'язці до добового графіку водопостачання:

$$E_{\text{доб.}} = P_{\text{ном}} \sum_{i=1}^4 \frac{L_i \cdot T_i}{\eta_i \cdot \cos \varphi_i}, \quad (1)$$

де:  $E_{\text{доб.}}$  – добове споживання електроенергії, кВт\*год;  
 $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність електродвигуна, кВт.;  
 $L_i$  – коефіцієнт завантаження двигуна в  $i$ -му режимі ( $L_i = R_{\text{насосу в робочій точці}} / R_{\text{ном.двигуна}}$ ), %;  
 $\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії електродвигуна в  $i$ -му режимі;  $T_i$  – тривалість роботи двигуна у  $i$ -му режимі за добу, год.;  $\cos \varphi_i$  – коефіцієнт потужності електродвигуна в  $i$ -му режимі.

В базовому варіанті розрахунку виконанні для рівня навантаження насосу 12% тривалістю 6 годин, 23% – 9 годин, 50% – 6 годин, 100% – 3 години.

Отримані наступні значення добового споживання насосним агрегатом К50-32-125 з двигуном 2,2 кВт, 3000 об. хв.:

- з двигуном класу ІЕ1 – 51,4 кВт\*год;
- з двигуном класу ІЕ4 – 44,86 кВт\*год;
- з двигуном класу ІЕ5 – 37,71 кВт\*год.

Результати розрахунку свідчать про зниження добового споживання при заміні ІЕ1 двигуна на ІЕ4

на 12,7%, що в річному розрахунку може сягати 2 387,1 кВт\*год/рік. При використанні двигуна ІЕ5 економія складе 26,6% і в річному вираженні 4 996,85 кВт\*год/рік. Результати свідчать, що використання високоефективних двигунів для насосних агрегатів є доцільним і економічно обґрунтованим в розрізі стрімкого зростання вартості енергоносіїв. Це також дозволить знизити витрати на електроенергію від 13 до 27% в системах водопостачання та позитивно вплинути на фінансовий стан підприємства і конкурентну спроможність.

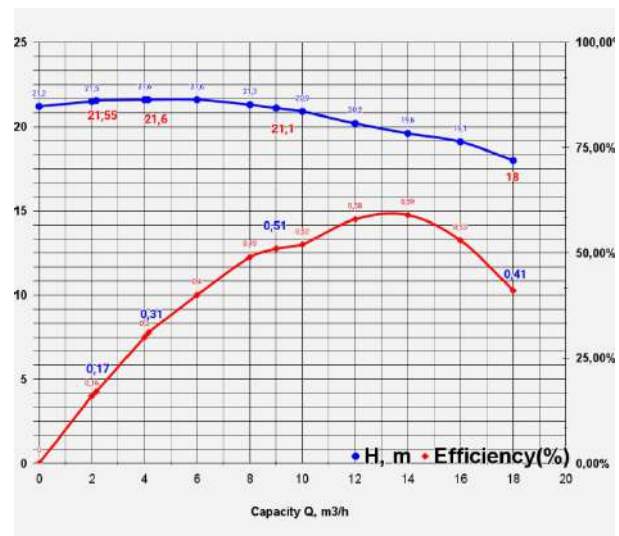


Рис. 1. Гідрравлічна крива насосу К50-32-125 і крива ККД насосу з 4-ма точками 100%, 50%, 33%, 12% продуктивності

### Список літератури

- [1] Augustyn, T. (2012). Energy efficiency and savings in pumping systems–The holistic approach. 2012 Southern African Energy Efficiency Convention (SAEEEC), 1–7. <https://doi.org/10.1109/SAEEEC.2012.6408587>.
- [2] Water Pumps–European Commission. – 2024, [https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/water-pumps\\_en](https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/water-pumps_en).
- [3] Заблодський М. М., Суржик В.В. Шляхи підвищення енергоефективності насосних агрегатів систем водопостачання з урахуванням динаміки зростання вартості електроенергії. Енергетика і автоматика. 2025. №2. С. 13-29.

## СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ ОБЕРТОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

М. М. Заблодський, Д. О. Бабак

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Безконтактний спосіб передавання електричної енергії до обертових елементів електромеханічних систем є не лише технічно доцільним, а в ряді випадків - єдино можливим рішенням, зокрема у вибухонебезпечних або хімічно агресивних середовищах [1, 2]. Метою роботи є створення системи вимірювання і передавання відповідних поточних даних стану обертової частини заглибленого електромеханічного перетворювача для забезпечення автоматичного керування процесом анаеробної ферментації.

Обладнання для автоматичного керування процесом анаеробної ферментації включає заглиблений поліфункціональний електромеханічний перетворювач (ПЕМП) для змішування, нагріву та впливу магнітного поля на субстрат. поєднаний з напівпровідниковим перетворювачем напруги, цифрові датчики, блоки спряження та мікроконтролер. На рис. 1, як приклад, показано схему розташування високоточних цифрових термодатчиків DS18B20 в ПЕМП, який розміщено в біореакторі.

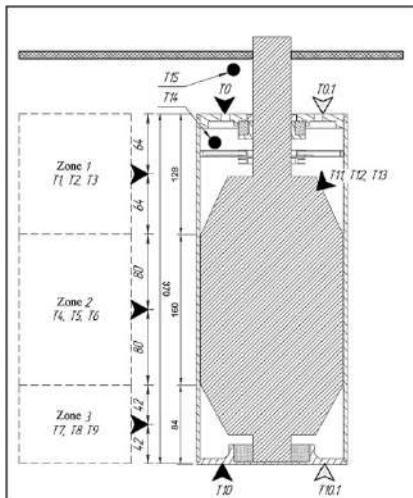


Рис. 1. Сенсори в ПЕМП, який розміщено в біореакторі

На рис.2 представлена розміщення основних вузлів обертового трансформатора на нерухомому валу ПЕМП.

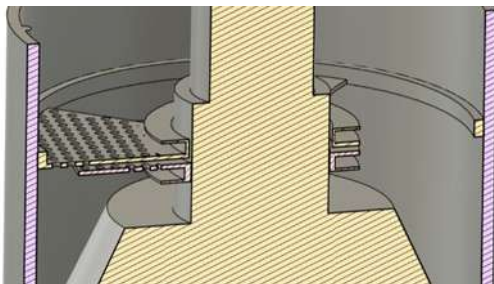


Рис. 2. Розміщення основних вузлів обертового трансформатора

Для оцінки динамічних властивостей обертового трансформатора було проведено серію вимірювань при зміні частоти вхідного П-подібного сигналу від 1,5 до 7 кГц (рис. 3). На осцилограмах жовтий канал відповідає сигналу первинної обмотки, синій – вторинної; режими неробочого ходу (вторинна обмотка розімкнена) та короткого замикання (вторинна обмотка замкнена).

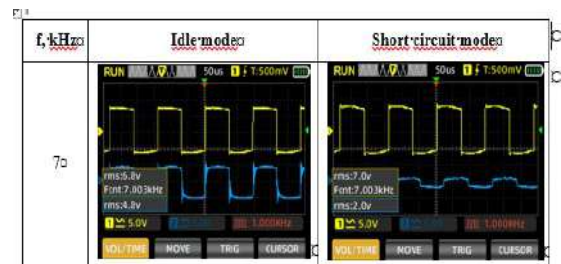


Рис. 3. Осцилограми передачі сигналів через обмотки обертового трансформатора

Розроблена експериментальна методика дозволила здійснити покрокову верифікацію працездатності системи у динаміці, виявити найкритичніші моменти енергоспоживання та переконатися у достатній стабільності електроживлення для забезпечення коректного виконання усіх функцій програмного забезпечення мікроконтролера. Зроблений аналіз дає підстави дійти висновку, що використання обертового трансформатора у запропонованій конструкції є доцільним і ефективним рішенням, що задовольняє вимоги до безконтактного живлення в умовах вибухонебезпечного середовища.

### Список літератури

- [1] Xu, Z. U., & JIANG, Q. (2019, August). Study of high frequency rotary transformer structures for contactless inductive power transfer. In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1-5). IEEE. (date of access: 19.10.2025).
- [2] Zabldskiy, N., Klendiy, P., Dudar, O., & Radko, I. (2023). Research of the Influence of the Combined Electromagnetic Field on Biogas Output. Problemele Energeticii Regionale, 58(2), 81-96. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-08> (date of access: 19.10.2025).

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ДВОМА ОБМОТКАМИ НА СТАТОРІ І ВЕНТИЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ ЗБУДЖЕННЯ

К. М. Василів<sup>1</sup>, Л. І. Мазуренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

<sup>2</sup>Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна

Одним з практично важливих напрямків розвитку електроенергетики є децентралізація: створення автономних електричних мереж, причому і не лише на суходолі, що особливо актуально під час війни, але у водному транспорті та авіації. Тому вдосконалення наявних та розробка нових автономних систем електроживлення (АСЕЖ) є актуальним, перспективним науково-практичним завданням.

Раніш в АСЕЖ джерелами генерування слугували переважно синхронні генератори, потім поширилось використання асинхронних машин (АМ). Наразі тривалий час ведеться робота пов'язана з розробкою автономних асинхронних генераторів з вентильним збудженням (ААГзВЗ) на базі трьох-обмоткової асинхронної машини (ТАМ), в якій на статорі розміщені дві обмотки [1]. Але практично не дослідженим залишається питання врахування зсуву в просторі цих статорних обмоток. Перші спроби вирішити зазначену проблему на теоретичному рівні були зроблені в працях [2, 3], в яких була розроблена математична модель трьох-обмоткової АМ та математична модель асинхронного генератора.

Наступний етап досліджень був спрямований на розробку математичної моделі автономної енергоустановки на базі асинхронного генератора з двома обмотками на статорі і вентильною системою збудження (ААГзВЗ). Математична модель складається з системи диференціальних рівнянь електричного стану в фазних координатах, диференціальне рівняння механічного стану ТАМ та система логічних рівнянь, які описують роботу вентильного комутатора. Ця модель враховує кут зсуву між першою і другою обмотками статора, взаємні впливи структурних елементів генератора, комутаційні процеси вентилів, що становить новизну та відкриває перспективу спеціальних досліджень на предмет якості генерованої електроенергії. Результатами моделювання є розрахункові залежності від часу потенціалів (напруг) та струмів, а також електромагнітний момент генератора, [4, 5]. На підставі математичної моделі розроблено програмний код мовою програмування FORTRAN, який дає змогу моделювати довільні режими роботи АСЕЖ з вентильною системою збудження.

В алгоритмі системи керування вентильним комутатором вибрано графік вмикання транзисторів з шириною зони подачі імпульсів на їх відкриття, яка дорівнює 180 градусів. З метою перевірки роботоздатності такої АСЕЖ та рівня адекватності математичної моделі виконано моделювання електромагнітних процесів, які відбуваються в піддослідній системі в режимі неробочого ходу другої обмотки статора. Такий режим дає змогу отримати напругу і струм першої обмотки та трифазну напругу другої

обмотки, а також напругу і струм з боку споживача постійної напруги.

Комп'ютерний експеримент було проведено у двох варіантах значення кута зсуву двох обмоток статора між собою: в 0 градусів, коли обмотки статора в просторі збігаються, та 90 градусів. На рис. 1 зображено розрахункові залежності миттєвих значень фазних напруг першої обмотки статора для кута зсуву обмоток статора, який дорівнює нулю. З рис. 1 видно, що форму кривих напруг визначає система керування вентильним комутатором.

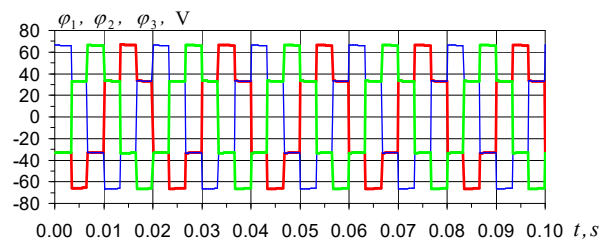


Рис. 1. Розрахункові залежності фазних напруг першої обмотки статора

При виконанні досліджень були розрахункові залежності миттєвих значень фазних струмів першої обмотки статора для кута зсуву обмоток статора, який дорівнює нулю. А також розрахункові залежності миттєвих значень фазних напруг другої обмотки статора для кута зсуву обмоток статора, який дорівнює нулю та 90 градусів.

### Список літератури

- [1] Мазуренко Л. І., Лищенко А. І. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных электроустановок. – Київ: Наукова думка, 2011. – 272 с.
- [2] Мазуренко Л. І., Василів К. М., Джура О. В. Вдосконалена математична модель триобмоткової асинхронної машини. Технічна електродинаміка. 2023. № 5. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.05.028>
- [3] Василів К. М., Мазуренко Л. І., Заболотний Р. І. Математична модель автономного триобмоткового асинхронного генератора з вентильним збудженням // Тези доп. 27-го Міжнародного симпозіуму SIEMA-2024, 24-25 жовтня 2024 р., Харків. - С. 25. URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/83415>
- [4] Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.
- [5] Фильц Р. В. Математические основы теории электро-механических преобразователей. – Київ: Наукова думка, 1979. – 208 с.

## ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ У СКЛАДІ ГРАВІТАЦІЙНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

А. М. Чернюк, С. М. Войтенко, А. В. Колесников  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Розвиток сучасних систем генерації електричної енергії на основі відновлюваних джерел енергії (сонячні електростанції, вітрові електростанції) в умовах української енергетики має суттєві обмеження які пов'язані з недостатніми обсягами маневрових потужностей електростанцій (переважно гідравлічних) та засобів накопичення електричної енергії (переважно гідроакumuлюючих електростанцій) [1,2]. Окрім цього збільшення потужності системних засобів акумулювання електричної енергії промислових масштабів є вкрай актуальним ще й з огляду на загрози воєнного стану нашої країни.

Одним з напрямків розвитку засобів акумулювання електричної енергії є створення гравітаційних накопичувачів енергії (ГНЕ). Досвід роботи гідроакumuлюючих електростанцій, які за своєю сутністю є рідинними ГНЕ, показав їх ефективність. Проте останніми тенденціями розвитку в цьому напрямку є створення систем твердотільних ГНЕ, які розраховані на меншу встановлену потужність та мають модульне виконання та властивості масштабування. В них надлишок електричної енергії витрачається на роботу електричної машини яка підіймає вантаж [3,4].

Одним з оригінальних рішень такого ГНЕ є технологічна схема фотоелектричної електростанції без інвертора, а з прямим живленням двигуна постійного струму (ДПС) безпосередньо від фотоелектричних модулів станції.

При цьому ДПС працює в умовах значних змін напруги та струму живлення та в широких межах своїх характеристик. Ціллю дослідження є визначення характеристик ДПС, який працює на сталі навантаження в залежності від змін параметрів його джерела живлення. Актуальним науково-технічним завданням є визначення діапазону можливої роботи ДПС за струмом та напругою джерела живлення. З цією метою складена відповідна математична модель яка поєднує відомі моделі ДПС та фотоелектричного модуля (рис. 1).

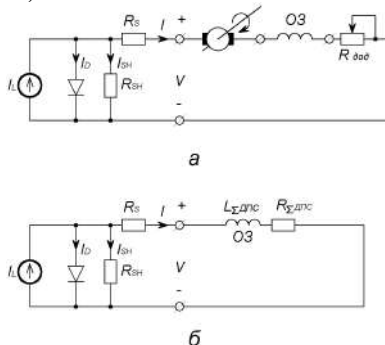


Рис. 1 Принципова схема (а), та схема заміщення (б) комплексу фотоелектричної станції з двигуном постійного струму у складі гравітаційного накопичувача електричної енергії

Відповідно до наведеної схеми параметри джерела живлення визначаються режимом роботи фотоелектричних модулів та відповідають характерним залежностям напруги від сонячної радіації (рис. 2, 3)

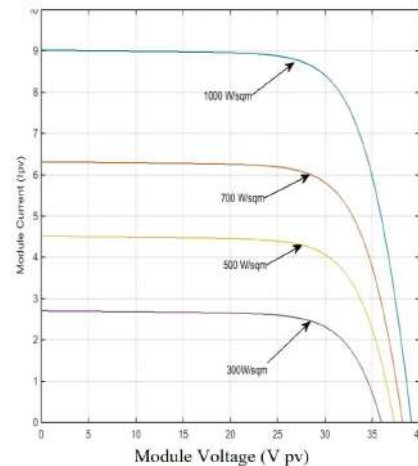


Рис. 2 Вольт-амперні характеристики фотоелектричного модуля

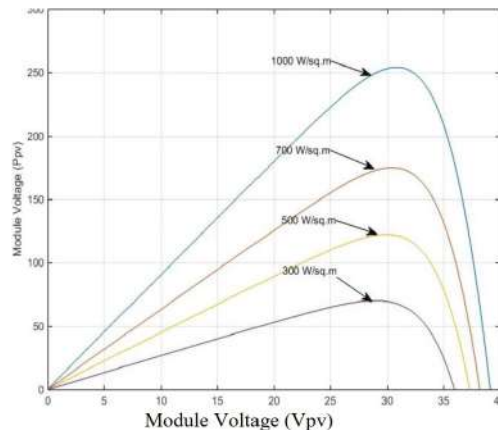


Рис. 3 Вольт-ваттні характеристики фотоелектричного модуля

### Список літератури

- [1] Чернюк А.М., Кирисов І.Г., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Енергетика Том 32 (71) № 3 2021 С. 239 – 246
- [2] Шульженко С.В., Нечаєва Т.П., НЕЧАЄВА, Буратинський І.М. Оптиміальне навантаження генеруючих потужностей енергосистеми за умови експлуатації сонячних електростанцій із системами акумулювання, The Problems of General Energy, 2021, issue 4, P. 4 – 12.
- [3] Чернюк А.М., Олійник Ю.С., Качанов Є.І., Пальваль Д.Г. Фотоелектрична станція з пневмогравітаційним накопичувачем енергії, Патент на корисну модель, UA157684U, 13.11.2024, Бюл. № 46.
- [4] Чернюк А.М., Олійник Ю.С., Качанов Є.І., Пальваль Д.Г. Хімічно-гравітаційний накопичувач енергії., Патент на корисну модель, UA157348U, 02.10.2024, Бюл. № 40.

## НАПРЯМИ СВІТОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Електричні машини залишаються ключовими елементами в енергетиці, промисловості, транспорті та побутовій техніці. За останні п'ять років спостерігається активний розвиток нових технологій, матеріалів та методів керування, що дозволяє значно підвищити ефективність, надійність і функціональність електродвигунів.

Для виявлення напрямів світових досліджень з розвитку електричних машин було обрано матеріали конференцій IEEE International Conference on Electric Machines and Drives 2021, 2023, 2025 років [1], публікації в наукових журналах «Електротехніка і електромеханіка» [2], «Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» [3] за 2021–2025 роки.

#### 1. Підвищення енергоефективності

Одним із провідних напрямків є вдосконалення електродвигунів для забезпечення енергоефективності. Впровадження стандартів IE4 та IE5 передбачає зменшення втрат енергії та підвищення ККД.

Наразі у промисловості домінують асинхронні двигуни. При підвищенні їх енергоефективності зменшується вплив на довкілля та знижуються експлуатаційні витрати.

Застосування високоефективних магнітних матеріалів, таких як неодимові магніти (NdFeB), дозволяє зменшити габарити машин при збереженні потужності. Двигуни з NdFeB магнітами досягають густини потужності понад 5 кВт/кг, що критично для електромобілів та авіації. Актуальним дослідженням є температурна стабільність магнітів, їх корозійна стійкість проблеми вартості та екології.

#### 2. Нові матеріали та конструкції

Досліджується застосування нанокристалічних сплавів та полімерних композитів, що використовуються для виготовлення магнітопроводів і ізоляційних елементів. Нанокристалічні матеріали (Fe-Si-B-Nb-Cu) забезпечують зниження втрат на вихрові струми при високих частотах (до сотень кГц), що робить їх перспективними для високошвидкісних машин і електромобільних приводів. Полімерні композити з наповнювачами (скловолокно, керамічні частинки), які забезпечують високу діелектричну міцність і термостійкість.

Активно впроваджується адитивне виробництво (3D-друк), що дозволяє створювати складні геометрії компонентів електричних машин.

3. Перерозподіл застосування різних типів електродвигунів

Серед нових типів електродвигунів особливу увагу привертають синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) та безщіткові двигуни постійного струму (BLDC). Вони характеризуються високою точністю керування, низьким рівнем шуму та тривалим терміном служби. Для забезпечення компактності, підвищення питомої потужності та ККД досліджуються різні топології конструкцій двигунів (з

внутрішнім та зовнішнім ротором, з різним розташуванням постійних магнітів) для зменшення втрат і пульсацій моменту.

Розробляються алгоритми керування без датчиків положення ротора для зниження вартості та підвищення надійності двигунів. Для зменшення пульсацій моменту використовуються методи широтно-імпульсної модуляції та оптимізації комутації для плавної роботи.

Використання електроніки на основі карбіда кремнію (SiC) та нітрида натрію (GaN) дозволяє реалізувати високочастотне керування з мінімальними втратами. Велика частота перемикавання напівпровідникових елементів дозволяє зменшити розміри інверторів і фільтрів. SiC та GaN мають невеликий опір при високих напругах, що зменшує нагрів, і не потребує складних систем охолодження. Завдяки точнішому керуванню струмом і напругою підвищується ККД електричної машини.

#### 4. Інтелектуальні системи керування

Сучасні електричні машини оснащуються сенсорами для моніторингу температури, вібрацій, струмів та інших параметрів у реальному часі. Це дозволяє реалізувати предиктивне обслуговування та уникати аварійних ситуацій. Інвертори нового покоління забезпечують гнучке керування та адаптацію до змінних навантажень.

#### 5. Застосування в нових галузях

Електричні машини активно інтегруються в електромобілі, авіацію, робототехніку та медичне обладнання. Основними вимогами до таких машин є компактність, легкість, висока надійність та здатність працювати в екстремальних умовах. Розробляються спеціалізовані конструкції, адаптовані до високих температур, магнітних полів та механічних навантажень.

Сучасні дослідження в галузі електричних машин демонструють значний прогрес у напрямку енергоефективності, матеріалознавства, керування та інтеграції в нові сфери застосування. Подальший розвиток цієї галузі буде визначатися потребами в сталому розвитку, цифровізації та автоматизації.

#### Список літератури

- [1] IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/1000223/all-proceedings> (дата звернення: 10.09.2025).
- [2] Електротехніка і електромеханіка. URL: <http://ieic.khpi.edu.ua/issue/archive> (дата звернення: 10.09.2025).
- [3] Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. URL: <http://pema.khpi.edu.ua/issue/archive> (дата звернення: 10.09.2025).

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЗАДАЧ ЗА ДОПОМОГОЮ РІВНЯНЬ ЛАГРАНЖА

Є. І. Байда

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Як показує практика, розрахунки динаміки навіть доволі простих електромеханічних систем є досить складними. Річ у тім, що вирішення такої задачі потребує одночасного вирішення декількох нестационарних задач: розрахунок електричного кола; розрахунок динаміки руху та розрахунок магнітної взаємодії частин електромеханічної системи. Одним з етапів вирішення такої задачі є отримання системи диференціальних рівнянь, що описують фізику процесів в електромеханічній системі за допомогою рівняння Лагранжа другого роду на базі методу електромеханічної аналогії, яка дає можливість описувати взаємодію між рухом точок, твердих тіл, електричних та електромагнітних явищ.

Рівняння Лагранжа, як потужний інструмент аналітичної механіки, дозволяють формалізувати динаміку складних систем з урахуванням енергетичних взаємозв'язків. Проте, застосування цього підходу до електромеханічних систем потребує адаптації та врахування специфіки електричних елементів, таких як двигуни, датчики, та елементи керування. В докладі показана узагальнена методика побудови математичних моделей електромеханічних систем (зокрема рушій Томсона ударного типу) на основі рівнянь Лагранжа, яка забезпечить точність, універсальність та зручність для подальшого аналізу та оптимізації. Так як класичні рівняння Лагранжа застосовуються до гладких (безперервних) систем, то розрахунок ударних систем являє собою не тривіальне завдання і потребують адаптації методу та врахування специфіки фізичних процесів зіткнення, що і зроблено в представленій роботі.

На основі методу Лагранжа була отримана система рівнянь, що описують рушій Томсона ударного типу, який складається з двох круглих котушок

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial m_d(x)}{\partial x} \cdot \frac{v^2}{2} + m_d(x) \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{\partial M(x)}{\partial x} \cdot i_1 \cdot i_2 = \\ - F_d - c_d \cdot x - (F_k - c_k \cdot (x - S_d)) \cdot (x \geq S_d), \\ v = \frac{dx}{dt}, \\ L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{\partial M(x)}{\partial x} \cdot v \cdot i_2 + M(x) \cdot \frac{di_2}{dt} = \\ \left( U_0 - \frac{q_1}{C} \right) \cdot \left( U_0 - \frac{q_1}{C} > 0 \right) - i_1 \cdot R_1 \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{\partial M(x)}{\partial x} \cdot v \cdot i_1 + M(x) \cdot \frac{di_1}{dt} = -i_2 \cdot R_2, \\ i_1 = \frac{dq_1}{dt}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Індуктивності котушок, взаємна індуктивність, похідна від взаємної індуктивності котушок розраховувались методом «масивного вітка» з використанням методу Монте-Карло. Деякі результати такого розрахунку наведені нижче.

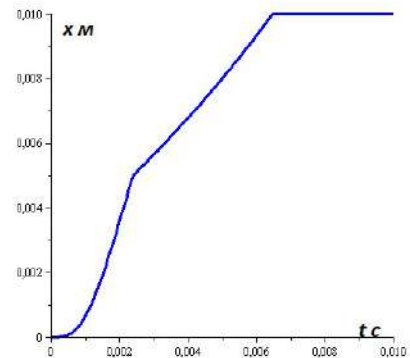


Рис. 1. Залежність ходу рухомої котушки від часу

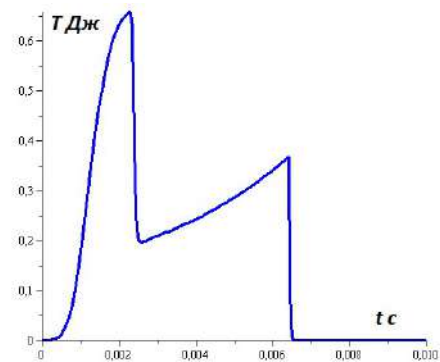


Рис. 2. Зміна кінетичної енергії системи

Рівняння Лагранжа є потужним інструментом аналітичної механіки, що дозволяють формалізувати динаміку складних електромеханічних систем з урахуванням енергетичних взаємозв'язків. Проте, застосування цього підходу до електромеханічних систем потребує його адаптації та врахування специфіки фізичних процесів зіткнення, якщо такі відбуваються. Результати досить точно співпадають з очікуваними результатами (закон збереження імпульсу системи та величини втрати кінетичною енергії при не пружному зіткненні).

### Список літератури

- [1] Zehar D., Behih K., Cherif A. Robust control of single input multi outputs systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 4, pp. 20-25. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.03>.
- [2] Landau L. D., Lifshitz E. M. *Mechanics. Volume I of Course of Theoretical Physics / Translated from the 3rd revised and enlarged edition of *Механика* by L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Nauka, Moscow, 1993.*
- [3] Є. І. Байда. Розв'язання електромеханічних задач за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду - навчальний посібник. – Харків. Електронне видання Харківський національний технічний університет «НТУ ХПІ», 2025. – 90 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/91384>
- [4] Рамо С., Уинери Дж.. *Поля та хвилі в сучасній радіотехніці*. Видання друге, перероблене. М.-Л., ГИТТЛ, 1950 р. 568 с.

## БЕЗДУГОВИЙ ВИМИКАЧ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НАДШВИДКОЇ ДІЇ

Г. М. Стрункін, А. Є. Шамрай  
ТОВ «Плутон ІС», Львів, Україна

Комутація постійного струму в тягових електромережах міського транспорту – складний процес, який створює значне навантаження на мережі та комутаційне обладнання [1]. Відключення мережі під навантаженням (з номінальними або струмами більше за номінальні) – особливо під час спрацювання захисту при аварійних ситуаціях – є серйозним викликом. Термічний та електродинамічний вплив, особливо при коротких замиканнях, може призвести до пошкодження самої тягової мережі або виходу з ладу комутатора. Розрив ланцюга з високими струмами короткого замикання часто супроводжується утворенням електричної дуги, яка генерує плазму, виділяючи значну кількість енергії та газів, що може призвести до серйозних наслідків.

На відміну від змінного струму, де періодичний перехід струму через нульове значення полегшує гасіння дуги, комутація постійного струму стикається зі значними труднощами. Відсутність природного

переходу струму через нуль у випадку постійного струму ускладнює розрив електричної дуги, а отже, і припинення струму. Для вирішення цієї проблеми використовуються спеціальні дугогасильні камери, які розділяють велику дугу на кілька менших, що значно полегшує процес гасіння. Дугогасильні камери значні розміри та обмежений ресурс.

Метою даної роботи є висвітлення концепції вимикача постійного струму надшвидкої дії, яка дозволяє відмовитися від дугогасильної камери та суттєво зменшити його габарит та надійність.

Інженерами ТОВ «Плутон ІС» було розроблено вимикач постійного струму AFB на струми 2,5 та 4 кА і напругу до 1000 В за гібридною технологією (рис. 1), в якій робота комутаційного апарату поєднана з роботою силової електроніки, завдяки чому вдалося переривати струм вимикання без виникнення дуги [2].

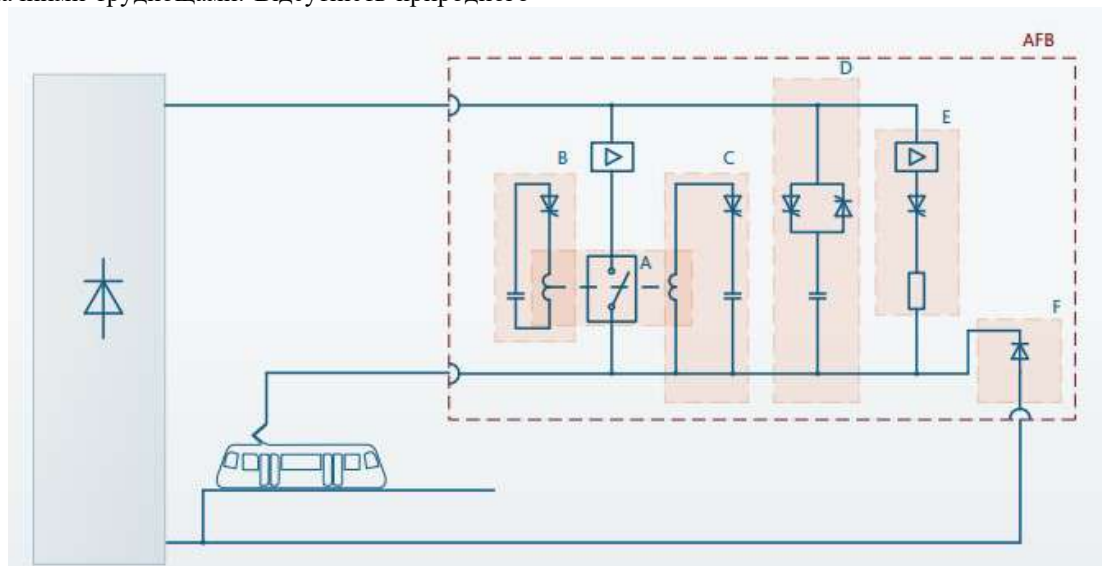


Рис. 1. Структурна схема вимикача AFB

Перед вмиканням перевіряється відсутність в контактній мережі короткого замикання ланцюгом E. Автоматичний вимикач вмикається електромагнітним приводом B. При отриманні команди на відключення, система управління активує тиристор C, пере направляючи енергію, накопичену у високовольтному конденсаторі, на відключаючу котушку. Створене магнітне поле запускає механізм розмикання контактів вакуумної камери A. Під час розмикання між контактами виникає електрична дуга, яка гаситься за допомогою енергії попередньо зарядженого конденсатора. Струм розряду конденсатора направляється у протифазі до основного струму силового кола тиристором D. В момент, коли алгебраїчна сума цих струмів досягає нуля, дуга гасне, і контакти остаточно розходяться, перериваючи живлення силового кола. Надлишок енергії контактного проводу замикається через зворотній діод F.

Власний час відключення автоматичного вимикача складає менше 1 мс.

Дана концепція дозволила створити автоматичний вимикач постійного струму українського виробництва, який було впроваджено на тягових підстанціях міського електротранспорту та метрополітенів в Україні та за її кордонами.

## Список літератури

- [1] Нем В.К. Конспект лекцій з курсу «Тягові підстанції електричного транспорту» (для студентів 5-го курсу денної і заочної форм навчання спеціальності 7.092202 (7.05070203) «Електричний транспорт») / В.К. Нем, В.І. Скуріхін, В.Ф. Сидоренко; Харк. нац. акад. міск. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 109 с.
- [2] Стрункін Г.М. Застосування пристроїв силової електроніки – Дніпро: Середняк Т. К., 2024, – 408 с. ISBN 978-617-8139-59-9. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВНОСТІ СПРАЦЬОВУВАННЯ ТОПКИХ ЗАПОБІЖНИКІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

О. М. Гречко<sup>1</sup>, В. М. Бугайчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «АВМ АМПЕР», Кременчук, Україна

**Вступ.** Аналіз сучасного стану та досвіду експлуатації електроустаткування в електричній мережі середньої напруги 6–35 кВ показав, що натеper існує актуальна проблема, яка пов'язана з низьким рівнем ефективності захисту топкими запобіжниками вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) із литою ізоляцією. В роботах [1–3] показано, що на практиці непоодинокими є випадки, коли захист ТН забезпечується за допомогою топких запобіжників, у яких номінальний струм значно перебільшує гранично-допустимий тривалий струм первинної обмотки ТН.

Ще одною проблемою при експлуатації топких запобіжників під час їх захисту ТН є випадки «умовності» спрацьовування, під яких будемо розуміти наступне. При струмах, менших за номінальний найменший струм відмикання, топкий елемент запобіжника перегоріє лише «умовно» – при певних умовах запобіжник може не перервати струм і електрична дуга може не згаснути.

Отже, метою роботи є встановлення умовності спрацьовування топких запобіжників для захисту ТН з литою ізоляцією за допомогою проведення експериментальних досліджень.

**Результати.** У дослідженні використовувалось обладнання електротехнічної лабораторії ТОВ «АВМ АМПЕР», на якому було експериментально перевірено факт «умовності» спрацьовування топких запобіжників вітчизняного виробника ТОВ «Кварц» на номінальну напругу 10 кВ та 35 кВ. Фрагмент установки для проведення експериментальних досліджень показано на рис. 1.



Рис. 1. Експериментальна перевірка топких запобіжників

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1, в якій позначено:  $I$  та  $t$  – відповідно струм та час спрацьовування запобіжника;  $R$  – опір запобіжника перед випробуванням;  $U_1$  – робоча фазна напруга на терміналах первинної обмотки ТН;  $U_2$  – напруга на терміналах вторинної обмотки ТН.

Таблиця 1. Результати досліджень

$U_n$ , кВ	№	$I$ , А	$t$ , с	$R$ , $\Omega$	$U_1$ , кВ	$U_2$ , В
10	1	2,1	40	49	6,0	1,9
	2	2,1	10	48	6,0	50
	3	2,0	20	47	5,7	40
	4	2,0	25	48	5,8	48
	5	2,0	15	49	5,6	47
	6	2,0	27	47	6,0	50
	7	2,1	15	49	5,7	42
	8	2,1	20	51	5,8	45
35	1	2,0	15	156	20,2	49
	2	2,1	25	157	20,2	47

Перевірка всіх запобіжників за допомогою низьковольтного мультиметру в режимі «продзвонки» показала їх спрацьовування, але яке виявилось «умовним», окрім першого зразка, що можна пояснити скоріше випадковістю та похибкою експериментів. Експериментально встановлено, що при подачі на затискачі запобіжника робочої фазної напруги  $U_1$  на вторинній обмотці фіксується напруга  $U_2 \approx 50$  В.

**Висновки.** Результати проведених експериментальних дослідів підтвердили проблему відключення запобіжниками незначних струмів перевантаження ТН із литою ізоляцією. Експериментально встановлено, що при відключенні топкими запобіжниками, які захищають ТН, незначних струмів перевантаження відбувається перегорання топкого елемента, але при цьому коло живлення ТН не переривається і на терміналах його вторинної обмотки залишається напруга від 42 В до 50 В, що призводить до похибок у вимірюванні та недообліку спожитої електроенергії.

### Список літератури

- [1] Bajda Y., Grechko O., Buhaichuk V., Knapek R. To the Problem of Protection of Medium Voltage Instrument Transformers with Fuses: Analytical Research. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 92-102. doi: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2021.60.3.02>.
- [2] Байда Є.І., Гречко О.М. Мультифізичний розрахунок топких запобіжників вимірювальних трансформаторів середньої напруги. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2023, № 1 (9), С. 3-10. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.01>.
- [3] Байда Є., Гречко О. Використання методу Монте-Карло для оцінки розбіжності спрацьовування топкого запобіжника в залежності від розбіжності його теплофізичних та геометричних параметрів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, 2024, № 2 (12), С. 3-7. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.01>.

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДЕТЕКТОРИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НВЧ ПОТУЖНОСТІ НА ІМПУЛЬСНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ: МОЖЛИВОСТІ ТА ОБМЕЖЕННЯ

В. В. Катречко, Д. В. Вінніков, О. М. Озеров, В. І. Ткачов, О. В. Мануйленко  
Національний науковий центр “Харківський Фізико-Технічний Інститут”

Вимірювання потужності та спектру надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання є актуальною потребою галузі радіотехніки та електроніки, враховуючи широке застосування НВЧ у таких областях, як: зв'язок, радары та медицина. Класичні термодетектори (болметри, термопари) демонструють високу інерційність (час відгуку – від мс до с) та низьку чутливість (0,1 мВ/Вт), що робить їх непридатними для аналізу сигналів тривалістю <math><100\text{ нс}</math> [1,2].

Розвиток напівпровідникових технологій дозволив перейти до діодних сенсорів на основі Si та GaAs, які мають смугу до 110 ГГц, чутливість понад 1 В/Вт та час відгуку <math><1\text{ нс}</math> [3]. Зокрема, це відкриває можливості для вимірювань НВЧ на імпульсних прискорювачах прямої дії з утворенням віркатору, де характерний час сигналу становить 40–70 нс.

У роботі апробовано сенсор Keysight U2021XA (50 МГц–18 ГГц, 80 MSa/s, мінімальна тривалість відеоімпульсу 33 нс) на експериментальному прискорювачі ДІН-2К [4]. Також створено вимірювальний стенд і відпрацьовано технологію реєстрації НВЧ-імпульсів у дальній зоні з подальшою телеметрією даних. Для придушення паразитних складових застосовано приймальні хвилеводи з частотою відсічки:  $f_c = c/2a$ , що для апертури  $a = 48\text{ мм}$  дає  $f_c \approx 3,1\text{ ГГц}$ ; приймач розміщено в дальній зоні ( $r = 0,7\text{ м}$ ), що відповідає умові Фраунгофера  $r \gtrsim 2D^2/\lambda$ . За цих умов основна енергія зареєстрована в діапазоні 3,1–3,6 ГГц, тривалість НВЧ-імпульсу склала 40–50 нс. Частота дискретизації 80 MSa/s (крок  $\sim 12,5\text{ нс}$ ) дає можливість зареєструвати 4–5 точок на імпульс, чого достатньо для оцінки амплітуди та форми з похибкою  $\leq 20\%$ .

Калібрування виконано генератором Г4-80 (2,56–4 ГГц, похибка  $\leq 0,8\text{ дБ}$ ) із побудовою діаграм спрямованості. Оцінка пікової потужності за рівнянням радіолінії (Фріса) узгодилася з експериментом (відхилення  $\leq 5\%$ ), тоді як інтегральна оцінка з урахуванням діаграми спрямованості дала розбіжність  $\sim 30\%$  (зумовлену модовим складом та невеликою відстанню між антенами відносно апертури).

Показано, що широкосмугові діодні сенсори типу U2021XA ефективні для реєстрації швидких НВЧ-імпульсів на прискорювачах прямої дії, що створює основу для стандартизації методик у прискорювальних комплексах. Додатково, розроблено дистанційну бездротову фіксацію потужності, що дозволяє знімати дані без підведення кабелю до приймача.

### Список літератури

- [1] L.A. Hocker, Microwave Bolometers and Their Applications, Proceedings of the IEEE, vol. 54, no. 10). 1466-1475, 1966.
- [2] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices," Wiley, 1981.
- [3] A.M. Krotkus, "Terahertz Detectors," and Communications, 2013.
- [4] D.V. Vinnikov, V.V. Katrechko, O.M. Ozerov, V.I. Tkachev, S.V. Marchenko, V.B. Yuferov, O.V. Manuilenko, INFLUENCE OF THE ENERGY PARAMETERS OF THE PRIMARY CIRCUIT ON THE CURRENT CHARACTERISTICS OF THE DIN-2K ACCELERATOR ISSN 1562-6016. Problems of Atomic Science and Technology. 2023. № 4(146).

## SINGLE-PHASE VOLTAGE CONTROL RELAY FOR PROTECTION OF HOUSEHOLD CONSUMERS WITH ADAPTIVE CHARACTERISTICS BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Y. Y. Zorin<sup>1</sup>, O. O. Chepelyuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Separate structural unit "Kharkiv Computer and Technological Professional College of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

The problem of voltage instability in public electrical networks requires reliable protective devices. Existing voltage control relays (VCRs) use mainly single-criterion algorithms that take into account only the amplitude of the voltage deviation ( $\delta U$ ). Such single-criteria logic often leads to false trips during short-term transients or too long delays in the event of systematic deviations in the electrical grid [1], [2].

The relevance of the research lies in the need to create an intelligent single-phase IoT-relay for voltage control of household consumers (IoT-VCR), capable for multi-criteria analysis of the network state and decision-making that adapts to specific operating conditions. The main goal of the work is to develop and implement an algorithm that replaces static protective characteristics with dynamic ones based on machine learning principles (TinyML) [3], [4], while taking into account dependent and independent protective characteristics according to IEC 60255-127:2010 [2], [5].

The proposed algorithm uses three key features to assess the network state, which are calculated in real time:

1. Deviation amplitude ( $\delta U$ ): difference between current  $U_{RMS}$  and nominal voltage  $U_{nom}$ .
2. Voltage volatility ( $\sigma U$ ): root-mean-square voltage deviation over a short time interval, which characterizes the rate of voltage change (analogous to  $dU/dt$ ).
3. Historical factor ( $H$ ): the frequency of IoT-VCR operations over a certain previous period (for example, 60 minutes), which reflects the degree of instability of the household electrical network [3].

Based on these parameters, a risk score  $R$  is calculated, which is a weighted sum of the following features:

$$R = W_{\delta U} \cdot \delta U + W_{\sigma} \cdot \sigma U + W_H \cdot H, \quad (1)$$

where:  $W$  – weight coefficients that determine the importance of each factor;  $R \in [0, 100]$  – integral hazard assessment.

The calculated estimate  $R$  is used to classify the state and dynamically select the optimal shutdown time  $t_{opt}$ :

- If  $R < R_{Low}$ : The maximum delay time  $t_{max}$  (Low Risk) is used.
- If  $R_{Low} \leq R < R_{High}$ : the dependent characteristic  $t = f(\delta U)$  (Average risk) is used.
- If  $R \geq R_{High}$ : the minimum delay time  $t_{min}$  (High risk) is used.

This approach allows IoT-VCR to independently “learn” and adapt, ensuring the optimal balance between protection reliability and power supply continuity [1], [3], [6].

The hardware implementation of the system is carried out on the ESP32-C3FH4 microcontroller, which,

thanks to the RISC-V architecture and FreeRTOS support, provides multitasking of the high-priority risk\\_assessment\\_task and Bluetooth Low Energy (BLE) communication tasks [7], [8].

The developed multi-criteria adaptive control algorithm allows achieving the following results:

- 1) Minimization of false alarms by filtering short-term spikes.
- 2) Possibility of remote calibration of weight coefficients  $W$  via mobile application (Android).
- 3) Implementation of intelligent classification principles on an embedded platform for protecting single-phase household electrical networks. Further work will focus on integrating Wi-Fi support and cloud services for long-term storage and analysis of  $R$  risk assessment data [4], [6].

### References

- [1] Y. Zorin, O. Chepelyuk, (2025). *Improved single-phase voltage control relay for household consumers with IoT and Bluetooth Low Energy support*. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improving electrical machines and devices. Theory and practice, (1 (13)), 12–16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.03>.
- [2] IEC 60255-127:2010. *Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/undervoltage protection devices*. 64 p.
- [3] M. Raza, M. H. Yousaf, and A. Ahmad, “Adaptive Protection and Machine Learning Techniques for Smart Grids,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 75632–75645, 2025. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10594237>.
- [4] A. Kim et al., “Neural Network-Based Voltage Anomaly Detection for IoT Devices,” *arXiv preprint*, arXiv:2411.07114v1, 2024. URL: <https://arxiv.org/html/2411.07114v1>.
- [5] M. L. Torres and V. Petrov, “Safety Limit Calculations to IEEE and IEC Standards,” *ELEK Technical Articles*, 2023. URL: <https://elek.com/articles/safety-limit-calculations-to-ieee-and-iec-standards/> (accessed: 09.10.2025).
- [6] D. Wei et al., “Reinforcement Learning-based Adaptive Voltage Control in Low-Voltage Networks,” *arXiv preprint*, arXiv:2509.09937v1, 2025. URL: <https://arxiv.org/html/2509.09937v1> (accessed: 09.10.2025).
- [7] FreeRTOS Kernel Documentation: Website. URL: <https://www.freertos.org> (accessed: 09.10.2025).
- [8] Espressif Systems. *ESP32-C3 Series Datasheet*. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf) (accessed: 09.10.2025).

## АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРМІСТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НАПРУГОЮ ДО 0,66 кВ

А. В. Милашич, О. О. Чепелюк

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Для температурного захисту електродвигунів широкого застосування набувають мікропроцесорні термісторні реле захисту. При розробці та програмній реалізації алгоритмів роботи таких реле актуальною є задача вибору та застосування найбільш раціональних математичних моделей залежності опору термістора від температури його нагріву.

Метою даного дослідження є аналіз існуючих математичних моделей NTC (Negative Temperature Coefficient) та PTC (Positive Temperature Coefficient) термісторів [4].

1. Експоненційна ( $\beta$ -модель, Beta-equation) - найпростіша і найпоширеніша модель для NTC-термісторів. Вона виходить із експоненційної залежності опору від температури:

$$R(T) = R_0 e^{\beta(T_1 - T_{01})}, \quad (1)$$

де:  $R(T)$  – опір при температурі  $T$  у Кельвінах;  $R_0$  – опір при опорній температурі  $T_0 = 298,15$  К ( $25^\circ\text{C}$ );  $\beta$  – матеріальний параметр, або  $\beta$ -коефіцієнт, який характеризує чутливість зміни опору.

Зворотне перетворення для визначення температури:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}, \quad (2)$$

Похибка: зростає при ширшому температурному діапазоні ( $>150$  К), бо реальна залежність має неідеальну експоненційність.

2. Рівняння Стейнхарта–Гарта (Steinhart–Hart) – точніша емпірична модель для NTC-термісторів [2], що описує поведінку в діапазоні від  $-55$  до  $+150^\circ\text{C}$ :

$$\frac{1}{T} = \alpha + b \ln R + c (\ln R)^3, \quad (3)$$

де  $\alpha$ ,  $b$ ,  $c$  – параметри, що визначаються для конкретного термістора (отримуються з трьох точок  $R-T$ ). Модель добре підходить для обчислювальних систем з плаваючою комою й застосовується у високоточних вимірюваннях (наприклад, температурна компенсація сенсорів). Для спрощення іноді використовують модифіковану форму без кубічного доданку, що знижує точність, але полегшує обчислення:

$$\frac{1}{T} = \alpha + b \ln R. \quad (4)$$

3. Моделі для PTC-термісторів (switching-type).

На відміну від NTC, PTC-термістори мають різко нелінійну “S-подібну” характеристику [3].

Нижче точки Кюрі (Curie-temperature, або  $T_{sense}$ ) опір майже сталий; після її перевищення – різко зростає в десятки й сотні разів.

Таку поведінку не можна описати аналітичною функцією на всьому діапазоні. Виробники подають табличні значення:

$$R(T_{sense} - 5^\circ\text{C}) \leq R_{cold} \max R(T_{sense} + 15^\circ\text{C}) \geq R_{hot} \min. \quad (5)$$

Для розрахунків у схемах реле або компараторів застосовується кусочно-лінійне наближення:

$$R(T) = \begin{cases} R_{cold}, & T < T_{sense} - \Delta T \\ R_{cold} + k(T - T_{sense} + \Delta T), & T_{sense} - \Delta T \leq T < T_{sense} \\ R_{cold} e^{\alpha(T - T_{sense})}, & T \geq T_{sense} \end{cases} \quad (6)$$

де  $k$ ,  $\alpha$  – коефіцієнти, що підбираються експериментально. Це дозволяє оцінити «фронт» опору для вибору порогу спрацювання реле.

4. Математична модель компанії TDK Electronics.

Компанія TDK (EPCOS), один із провідних виробників термісторів, формально застосовує різні моделі для двох типів термісторів. У технічних бюлетенях TDK, для NTC термісторів, наводить як основну модель рівняння Стейнхарта–Гарта, яке вони рекомендують для широкого діапазону температур ( $-55 \dots +150^\circ\text{C}$ ). Для швидких розрахунків компанія пропонує спрощену  $\beta$ -модель.

Для PTC-термісторів TDK використовує не рівняння, а таблично-порогову модель, що описує перехідний режим.

На відміну від більшості виробників, компанія TDK в [1] вказує два поняття:

- Rate of resistance change - відносний температурний коефіцієнт опору:

для PTC  $\alpha > 0$ , для NTC  $\alpha < 0$ .

Для PTC-перемикачів  $\alpha$  може досягати десятків відсотків / К, тобто відповідає надзвичайно крутому фронту характеристики.

- Часова швидкодія (thermal time constant  $\tau$ ): 2-5 с (у маслі – до 3 с, у повітрі – 5-10 с). Це визначає затримку спрацювання системи захисту після перегріву обмотки.

Висновок:  $\beta$ -модель і рівняння Стейнхарта–Гарта NTC-термісторів найбільш оптимальні для температурного моніторингу систем, тоді як порогова модель PTC-термісторів TDK є найефективнішою для реалізації температурного захисту асинхронних електродвигунів напругою до 0,66 кВ.

### Список літератури

- [1] TDK Electronics. General Technical Information for Thermistors (NTC/PTC), 2023 веб-сайт. URL: <https://www.tdkelectronics.tdk.com/download/531162/d78540dfe0589d2bd90cabef477c90b9/pdfgeneraltechnical-information.pdf> (дата звернення: 19.09.2025).
- [2] Steinhart, J. S. & Hart, S. R. (1968). Calibration Curves for Thermistors. Deep-Sea Research, 15(4), 497–503.
- [3] E-Power (EPower). PTC Thermistor – Principles and Applications. веб-сайт. URL: <https://eepower.com/resist> (дата звернення: 3.08.2025). IEC 60085. Electrical insulation – Thermal evaluation and designation (temperature classes of insulation systems).

## FEATURES OF MODELLING THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS BEFORE AND AFTER THEIR COMPENSATION

M. A. Leliuk, V. V. Lytvynenko, O. Hr. Sereda, O. Hen. Sereda, V. O. Zinchenko  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Any electrotechnical equipment, including electrical installations (EIs), generates an alternating external magnetic field (EMF) during operation. This field adversely affects both the performance of low-current networks of computing systems, control, communication and monitoring equipment that are sensitive to electromagnetic interference, and the health of personnel. In the first case, the issue of ensuring electromagnetic compatibility (EMC) arises, which manifests itself in reduced reliability of electrotechnical systems, such as false tripping of power transmission lines caused by malfunctions of relay equipment, increased additional energy losses associated with the generation of eddy currents, and other effects. In the second case, the problem concerns environmental safety.

Different countries worldwide are attempting to solve the problem of reducing the EMF of EIs. Most commonly, this is addressed through structural solutions based on shielding, which is ineffective at industrial frequencies. For example, shielding applied by Legrand (France) made it possible to reduce the EMF level at mains frequency by a factor of 10. In Ukraine, a more promising approach is considered to be automatic compensation of EMF using parametric automatic compensation systems (ACS). Such systems provide automatic tracking of parameters that define the EMF and generate a compensating magnetic field by means of compensating electromagnets (CEs). For example, for an automatic circuit breaker (ACB), the compensation efficiency (the ratio of maximum EMF intensity before and after compensation) reaches about 70 units. However, inside the EI, where EMF compensation is particularly critical, such high results have not yet been achieved. Therefore, mathematical modelling of the variable three-phase EMF of EIs is considered appropriate, with the aim of determining the indicators of compensation efficiency.

The sources of EMF in EIs are spatial current-carrying loops, whereas the sources of the compensating EMF are CEs consisting of a coil with current and a ferromagnetic core. The core comprises two parts forming a spatial magnetic system. The alternating magnetic field generated by these sources is considered in the external region where current-carrying loops and magnetized ferromagnetic elements of sensitive equipment (e.g., low-current networks) are located. In general, the problem of calculating such EMF cannot be solved directly because initial data about the receivers are unavailable. However, under certain assumptions, a modelling formulation of the problem becomes possible. As a first approximation, the field is calculated only in the region external to the EI, specifically in the medium free of magnetized materials. Considering the complex spatial configuration of EI conductors and CE magnetic systems, the resulting EMF is assumed to be non-uniform and three-dimensional.

The EMF was treated as quasi-stationary, and its intensity at an arbitrary point  $P$  was determined based on

the principle of superposition of fields from individual sources (current loops and concentrated CEs). The main EMF parameter is the magnetic field intensity, represented by the spatial vector  $H$ , whose magnitude and direction vary periodically.

The object of mathematical modelling is an automatic circuit breaker (ACB) equipped with a compensation unit (CU) for variable EMF (Fig. 1): 0 – geometric centre of the ACB (origin of the  $x, y, z$  coordinate system); 1 – ACB; 2 – CU; 3 – ACB terminals; 4, 5 – CU terminals for connecting the ACB and the external power circuit;  $P$  – observation plane used in the EMF modelling;  $h, h_p$  – distances from the origin to the planes of the power circuit of the ACB with CU and to the observation plane  $P$ , respectively.

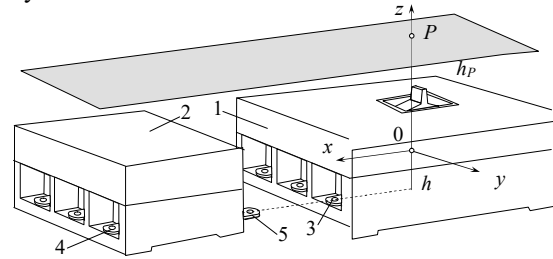


Fig. 1. Schematic representation of the ACB with CU

Figure 2 shows the power circuit scheme of the ACB with CU and the terminals  $K$  of the power circuit at the input of the ACB and the output of the CU. The loops are formed by the conductors of the ACB phases and the compensation unit. The directions of the phase currents  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ , and  $i_C(t)$  follow standard convention. The CU contains two electromagnets, CE1 and CE2, in phases  $A$  and  $C$ . The CEs are represented by circuits  $M_1(t)$  and  $M_2(t)$ .

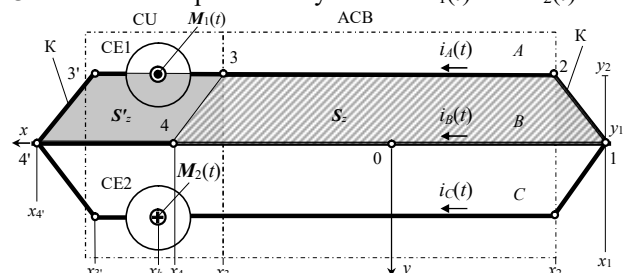


Fig. 2. Loops formed by the conductors of the ACB with CU

Computer modelling of the EMF of the three-pole ACB demonstrated specific features associated with the choice of direction for tracing loops carrying phase currents. The calculation of the magnetic field intensity vector and the magnetic moment of a loop with phase current must account for pulsating components.

The use of an external CE block for the ACB enables a reduction of EMF influence on microprocessor-based control units by 28 units along the  $x$ -axis and by 70 units along the  $z$ -axis, thereby preventing false triggering of relay protection devices.

## ПРИСТРІЙ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ З КОНТРОЛЕМ ЦІЛІСНОСТІ ФАЗНОГО ПРОВІДНИКА

М. А. Лелюк, Олександр Г. Серета, Олена Г. Серета, М. М. Яловенко, Ф. О. Кашеев  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

При захисті асинхронних електродвигунів (АД) від теплової дії надструмів через перевантаження ще й на сьогодні застосовують запобіжники у поєднанні з магнітними пускачами. Запобіжники є надійними апаратами теплового захисту, але й першопричиною іншого виду пошкодження – обрив фази.

Захист від надструму забезпечують також теплові реле магнітних пускачів, увімкнені в коло живлення АД. Проте такий захисний пристрій вимагає постійного налаштування через зміну температури довкілля, а також додаткового підбору нагрівальних елементів відповідно до потужності АД, що захищається.

Недоліками мікропроцесорних реле захисту АД є висока вартість, вразливість до електромагнітних збурень та проблеми з програмним забезпеченням, що може призвести до помилкових спрацьовувань або відмов. Ці недоліки потребують ретельного вибору обладнання та професійного налаштування.

Автоматичний пристрій, що описується нижче (рис. 1), дозволяє захистити АД як при перевантаженні надструмом, так і при обриві фази. В кожній фазі вимірюється струм й порівнюється найбільше з вимірних значень із встановленою межею (уставкою) спрацьовування.

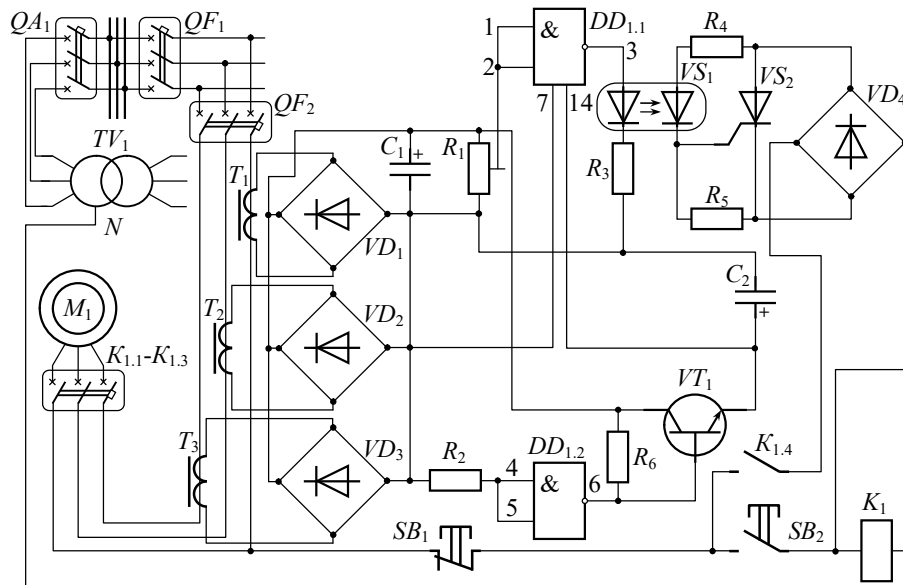


Рисунок 1 – Пристрій теплового захисту асинхронних електродвигунів

Пристрій містить три однакові трансформатори струму (ТС)  $T_1$ - $T_3$ , первинні обмотки яких увімкнені у фазні провідники. Напряга з вторинних обмоток ТС надходить на вхід вузла порівняння, функції якого виконує логічний елемент  $DD_{1.1}$ . Стабілізатор напруги, що живить мікросхему  $DD_1$  виконаний на транзисторі  $VT_1$ , а елемент  $DD_{1.2}$  використаний тут як джерело опорної напруги. Вихідну напругу стабілізатора можна змінювати через опір резистора  $R_2$ . Вмикання й вимикання АД  $M_1$  здійснюється кнопками  $SB_2$  й  $SB_1$ , відповідно. При натисканні на кнопку  $SB_2$  напруга мережі надійде на обмотку  $K_1$  магнітного пускача, який спрацює і своїми контактами  $K_{1.1}$ - $K_{1.3}$  увімкне АД. Кнопку  $SB_2$  потрібно тримати натиснутою поки ротор АД не досягне номінальної частоти обертання. Інакше пристрій може спрацювати від пускового струму. Зміну напругу вторинних обмоток трансформаторів  $T_1$ - $T_3$  випрямляють діодні мости  $VD_1$ - $VD_3$ . Напряга на конденсаторі  $C_2$  підведена до входу порівняльного вузла. Вона ж використана для живлення мікросхеми через стабілізатор  $VT_1$ . Резистор  $R_1$  встановлює струм спрацьовування захисту при пере-

вантаженні, обриві фази й КЗ. За нормальної роботи АД на виході  $DD_{1.1}$  буде сигнал високого рівня, світлодіод оптрона  $VS_1$  увімкнений,  $VS_1$  й  $VS_2$  відкриті.  $VS_2$  блокує кнопку  $SB_2$ , тому АД залишається увімкненим після її відпускання. При перевантаженні, КЗ або неповнофазному режимі підвищується напруга на одній або більше вторинних обмотках ТС. Отже, на виході  $DD_{1.1}$  з'явиться сигнал 0. Світлодіод  $VS_1$  гасне,  $VS_2$  закривається і обмотка  $K_1$  пускача буде знеструмлена. Контакти  $K_{1.1}$ - $K_{1.3}$  розмикають коло живлення АД. Знову запустити його можна лише після усунення причин спрацьовування захисту. Трансформатори ідентичні, намотані кожен на кільцевому магнітопроводі. Первинною обмоткою є фазний провідник, пропущений через отвір магнітопроводу. Число витків вторинної обмотки ТС залежить від потужності АД. Його слід підібрати таким, щоб при нормальному струмі АД напруга на вторинній обмотці трансформатора дорівнювала 7-8 В. Налаштування пристрою зводиться до встановлення потрібного порога спрацьовування резистором  $R_1$ .

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПОБУТОВИХ КОНДИЦІОНЕРІВ У РЕЖИМІ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ

М. А. Лелюк, О. Гр. Серета, О. Ген. Серета, Д. А. Рубежин, А. О. Жадько  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

На тепер понад 90% енергії, необхідної люду, одержують через спалювання органічного палива, запаси якого неухильно зменшуються. За прогнозами запасів нафти вистачить на 35 років, газу – 60 років, вугілля – 300 років. Отже проблема економії паливно-енергетичних ресурсів в контексті сталого розвитку є актуальною для усіх країн.

Одним з ефективних заходів економії палива та захисту довкілля є використання теплових насосів (ТН) для опалення та гарячого водопостачання. Можливість використання приладів, що здійснюють зворотний термодинамічний цикл, з'ясована ще у 1852 році. Нині масове виробництво та впровадження ТН здійснюють у США, Японії, Швеції, Данії, Канаді [1, 2]. Фахівці вважають, що у найближчій перспективі ТН знайдуть повсюдне застосування й займуть основне місце в низькотемпературних системах теплопостачання.

Принцип роботи ТН аналогічний до холодильної машини (ХМ), але здійснюється в іншому інтервалі температур. Найбільш поширені пароконденсійні ТН. В результаті підведення низькопотенційної теплоти у випарник ТН відбувається кипіння робочого тіла, пари якого стискуються в компресорі з підвищенням ентальпії та температури за рахунок роботи стиснення. У конденсаторі теплота фазового переходу робочого тіла передається теплоносію. Ефективність ХМ в режимі ТН оцінюється коефіцієнтом перетворення  $\mu$ :

$$\mu = Q/N_{\text{Ад}}, \quad (1)$$

де:  $N_{\text{Ад}}$  – потужність, що споживається електродвигуном (ЕД) компресора, кВт;  $Q$  – теплопродуктивність кондиціонера, кВт:

$$Q = Q_0 + N_{\text{Ад}} \cdot k + Q_{\text{Ад}}; \quad (2)$$

$Q_0$  – холодопродуктивність – теплопритоки від стін, підлоги, стелі, вікон (обчислюються з урахуванням площі та висоти приміщення), людей (залежить від активності людей у приміщенні), побутових електроприладів та освітлення;  $Q_{\text{Ад}}$  – тепловий еквівалент потужності електровентилятора, кВт;  $k$  – коефіцієнт, що враховує втрати тепла компресором та його ЕД.

При роботі кондиціонера в режимі ТН  $\mu = 2,5-5$ . При цьому вартість отриманого тепла, приблизно в 2-4 рази менша від вартості підігріву повітря [1, 2]. Щодо центрального опалення, то при  $\mu = 2,5$  вартість виробництва теплоти в ТН буде дешевшою, ніж у будь-якої котельні, що працює на мазуті, вугіллі або газі [1, 2]. Крім того, використання кондиціонера як ТН, для обігріву приміщень в районах з помірним кліматом дозволяє встановлювати комфортний режим його роботи, що неможливе при центральному опаленні (ЦО).

При роботі ТН, коли як джерело низькопотенційної теплоти використовується повітря, його ефективність досягається при температурі зовнішнього повітря не нижче  $-5...-7$  °С, оскільки за такої температури докілька коефіцієнт  $\mu$  ТН вищий за три.

Оцінка ефективності роботи кондиціонера в режимі ТН в Україні здійснювалась для клімату на прикладі міста Харків. Аналіз середньомісячної температури за останні 20 років показує, що холодний період із середньомісячною температурою нижче  $-5$  °С триває три місяці, теплий період із середньомісячною температурою понад  $12$  °С триває п'ять місяців. Чотири місяці є перехідним періодом, коли з'являється можливість використовувати ХМ кондиціонера як ТН.

Особливістю літнього сезону в Харкові є висока вологість, що призводить до різкого коливання температури протягом доби. Отже виникає потреба в обігріві будівель та споруд міста за відсутності ЦО у літній період. Останнє можна здійснити за допомогою кондиціонера, що працює в режимі ТН.

Таким чином, для міста Харків кондиціонер у режимі ТН можна використовувати весь осінній та весняний періоди, взимку в денний годинник та влітку в нічний та ранковий годинник, що в середньому становить близько 40% усієї пори року.

Для оцінки ефективності використання даного способу обігріву будівель та споруд було проведено порівняння двох способів: роботи побутового кондиціонера у режимі ТН та за допомогою електрообігріву електрокалорифером. Як вихідні дані приймали загальну витрату повітря в кондиціонері  $V_{\text{заг}} = 600$  м<sup>3</sup>/год, а холодопродуктивність  $Q_0 = 3$  кВт. Для порівняльного аналізу розглядалися три найбільш характерні місяці: вересень, жовтень та листопад.

### Висновки.

Використання ХМ кондиціонера як ТН в умовах клімату міста Харкова є одним з ефективних способів економії електроенергії.

За три місяці, з вересня по листопад, витрачається 644 кВт·год електроенергії з урахуванням того, що нагрівається 600 м<sup>3</sup>/год повітря. У перерахунку на питому кількість електроенергії, що витрачається на нагрівання повітря, особливо помітні переваги використання ТН для обігріву приміщень. Так, у листопаді питома кількість електроенергії у 10,5 рази менша, ніж при використанні електрокалорифера, у жовтні – у 9 разів та у вересні – у 6 разів.

Незважаючи на те, що при роботі в режимі ТН ускладнюється система автоматики кондиціонера, ХМ доповнюється чотириходовим клапаном, а також, як наслідок, зростають капітальні витрати, вигода, пов'язана з істотним зменшенням витрат електроенергії в ТН, дозволяє отримати економічний ефект.

### Список літератури

- [1] Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.
- [2] Кондиціонування та вентиляція повітря [Текст]: текст лекцій / Е. Г. Братута, А. М. Ганжа, О. В. Круглякова, В. В. Чубарова. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 128 с.

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСКОРЮВАЧА ПРЯМОЇ ДІЇ НА ДИНАМІКУ РОЗМИКАННЯ ПЛАЗМОВОГО КОМУТАТОРУ СТРУМУ

Д. В. Вінніков<sup>1,2</sup>, О. М. Озеров<sup>1</sup>, В. І. Ткачов<sup>1</sup>, В. В. Катречко<sup>1</sup>, Б. О. Бровкін<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усікова НАН України, Харків, Україна

Для збільшення коефіцієнту множення напруги у малогабаритному прискорювачі електронів прямої дії з індуктивним накопичувачем енергії та плазмовим комутатором струму ДІН-2К, з метою одержання вибухової емісії електронів, формування електронно-го пучка та віртуального катоду, необхідно забезпечити підвищення швидкості зміни струму та його амплітуду під час розмикання плазмового комутатора. Однак процес розмикання залежить від багатьох електротехнічних параметрів установки, що потребує визначення їх спільного і окремого впливу на його динаміку. Метою роботи є дослідження та визначення впливу електротехнічних параметрів, в тому числі розрядних напруг контурів повної електричної схеми прискорювача на динаміку плазмового комутатора струму: швидкість розмикання, амплітуди струму, час розмикання. Надання рекомендації щодо оптимізації роботи прискорювачів даного типу та можливих шляхів збільшення коефіцієнту множення напруги.

В ННЦ ХФТІ, ведеться розроблення та вдосконалення малогабаритних прискорювачів електронів прямої дії (МППД), робота яких заснована на принципі індуктивного накопичення енергії (ІНЕ) та її вивільненні при розмиканні плазмового комутатора струму (ПКС), [1]. В роботі експерименти проведено на прискорювачі ДІН-2К, що є сильнострумовою, високовольтною установкою. Основними перевагами даного типу прискорювачів є значно менші маса та габарити, конструктивна простота та компактність. Відсутністю зазвичай громіздкого генератора Маркса в якості системи живлення, та відсутністю необхідності магнітної системи для фокусування електронного пучка. Ці переваги обумовлені використанням принципу швидкого розмикання струмового шнура в плазмі (ПКС) для отримання високої напруги на діоді прискорювача, замість імпульсних генераторів високовольтних напруг. Загальна схема прискорювача зображена на рис. 1.

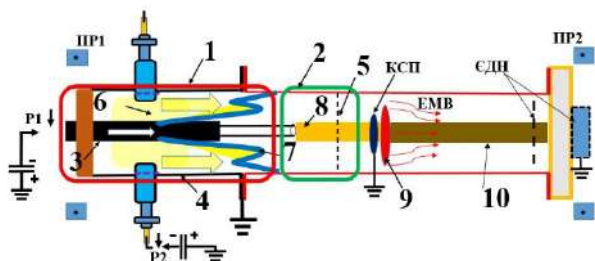


Рис. 1. Загальна схема МППД: 1 – блок індуктивного накопичувача енергії ІНЕ, 2 – вакуумний діод; 3 – катод; 4 – анодний корпус; 5 – анодна сітка; 6 – інжектвана плазма; 7 – струмовий шнур (ПКС); 8 – електронний пучок; 9 – віртуальний катод; 10 – пучково-плазмовий потік; P1, P2 – повітряні керовані розрядники, PP1, PP2 – пояси Роговського; EMV – електромагнітне випромінювання, КСП – колектор струму пучка; ЄДН – смісний дільник напруги

Збільшення ККД та оптимізацію роботи МППД з ІНЕ та ПКС можна забезпечити за рахунок регулювання параметрів розрядних контурів блоку плазмових гармат (ПП) та основного розрядного контуру, що живить коаксціальний вакуумний діод. Оптиміальними є параметри, що забезпечують максимальні за амплітудою та найкоротші за часом значення струму розмикання ПКС, що призводить до індуктування збільшеної напруги, яка подається на прискорюючий діод.

Згідно аналізу ділянки осцилограми струму де виникає розмикання ПКС, одержано залежності швидкості зміни струму від розрядної напруги ГС основного контуру, від напруги на плазмових гарматах, кількості гармат та кількості високовольтних з'єднувальних кабелів, що характеризують індуктивність розрядного контуру.

Встановлено, що підвищення напруги призводить до забезпечення скорочення часу накопичення енергії в індуктивному накопичувачі та до зростання швидкості розмикання. Збільшення кількості плазмових гармат дозволяє пропускати через утворену ними плазму більші значення струму й збільшує швидкість розмикання ПКС. Зменшення загальної індуктивності розрядного контуру призводить до збільшення швидкості розмикання. На прикладі прискорювача ДІН-2К вдалось забезпечити збільшення вихідних параметрів щодо максимального розрядного струму, швидкості розмикання, індукованої напруги та таким чином забезпечити надійні умови стабільної роботи прискорювача та одержання сильнострумових пучків електронів. Установки подібного класу можуть бути затребуваними для використання у багатьох промислових галузях, та сфері новітніх наукових досліджень, зокрема для одержання електромагнітного випромінювання [2-4].

### Список літератури

- [1] D.V. Vinnikov, O.M. Ozerov, V.V. Katrechko, V.I. Tkachov, S.V. Marchenko, B.O. Brovkin, V.B. Yuferov, O.V. Manuilenko, I.N. Onishchenko. Conditions ensuring maximum voltage multiplication factors for the din-2k accelerator. Problems of Atomic Science and Technology. 2025. №1(155) Series: Plasma Physics (31), p. 69-74. DOI: 10.46813/2025-155-069
- [2] J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu. High power microwaves. CRC Press, 2015, 447 p.
- [3] James Benford, Edl Schamiloglu, Jacob Coty Stephens, John A. Swegle, Peng Zhang. High Power Microwaves. Engineering & Technology, Physical Sciences. pp. 510, 2024. DOI: 10.1201/9781003287704
- [4] S. Mumtaz, H.S. Uhm, E.H. Choi. Progress in vircators towards high efficiency: Present state and future prospects // Physics Reports. 2024, v. 1069, p. 1-46. DOI: 10.1016/j.physrep.2024.03.003

## ПЕРЕШКОДОЗАХИСТ НА МАЛОГАБАРИТНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОНІВ ПРЯМОЇ ДІЇ З ПЛАЗМОВИМ КОМУТАТОРОМ СТРУМУ

Д. В. Вінніков<sup>1,2</sup>, О. М. Озеров<sup>1</sup>, В. І. Ткачов<sup>1</sup>, В. В. Катречко<sup>1</sup>, Б. О. Бровкін<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усікова НАН України, Харків, Україна

На даному етапі розвитку прискорювальної техніки, актуальною залишається задача забезпечення електромагнітної сумісності та перешкодозахисту від електромагнітного випромінювання, що утворюються при роботі установок даного типу. Імпульсні електронні прискорювачі прямої дії є високовольтники сильнострумівими установками що утворюють високо інтенсивні потужні короткі та над короткі за часом електромагнітні хвилі. Малогабаритний прискорювач електронів прямої дії (МППД) ДІН-2К з індуктивним накопичувачем енергії та плазмовим комутатором струму здатен утворювати потужне електромагнітне випромінювання у широкосмуговому діапазоні частот. Особливий інтерес представляють частоти в діапазонах від 300MHz до 8GHz. Великий об'єм електронної техніки, зокрема БПЛА, дрони, сучасне електро-технічне обладнання, мікросхеми працюють у НВЧ діапазонах частот для забезпечення передачі відеосигналів, сигналів GPS навігації, керування тощо. Для відокремлення корисних сигналів від іноді більш потужних за інтенсивністю сигналів в цьому ж діапазоні частот або сигналів перешкод у більш низькому діапазоні частот необхідно зробити захист, що забезпечать виконання функціональних задач вище вказаних об'єктів. У зв'язку з розвитком систем що працюють в GHz та THz діапазонах актуальною є задача забезпечення якості даних сигналів без втрати їх користі.

В ННЦ ХФТІ, ведеться розроблення та вдосконалення МППД, робота яких заснована на принципі індуктивного накопичення енергії в коаксіальній системі та її вивільнення при розмиканні плазмового комутатора струму. Дані прискорювачі є джерелом електромагнітного НВЧ випромінювання [1].

Окрім досліджуваних корисних сигналів, що знаходяться в гігагерцовому діапазоні частот на установці є вузли та процеси, що є джерелами перешкод. Виникнення коронуючих розрядів, що виникають під час заряджання генераторів імпульсних струмів, передпробійні струми у розрядниках, індуквані струми, що йдуть через заземлення, високовольтні розрядники електричного контуру плазмових гармат та основного розрядного контуру під час їх спрацьовування, розряд по поверхні плазмових гармат, що інжектують плазму у прискорювач, розмикання ПКС, всі ці процеси є перешкодоутворюючими центрами. Сукупність перешкод широкого діапазону спектру частот від 50 Hz до десятків і сотень MHz утворюються за декілька мікросекунд до виникнення корисного сигналу і можуть розповсюджуватись і існувати у просторі одночасно з ним. Корисний сигнал створюється явищем під назвою віртуальний катод, котрий генерує НВЧ складову спектру, час існування котрого складає близько 100 ns.

Загальний вигляд хвилевода прискорювача з діагностичними засобами, об'єктом впливу, що розташовані у безеховій камері [2] зображено на рис. 1.



Рис.1. Загальний вигляд випромінюючого хвилевода з рупорною антеною та об'єктом впливу в безеховій камері

Метою даної роботи є дослідження ефективності розроблених методик та засобів що забезпечують захист корисних досліджуваних сигналів, котрі утворюються на МППД ДІН-2К, від електромагнітних перешкод.

Основою перешкодозахисту стало застосування пірамідальних поглиначів на основі фериту, металевих екранів, рупорних антен прийому та передачі сигналу, використання засобів безперебійного живлення діагностичного обладнання та засобів бездротової передачі даних.

Розглянуті практичні заходи, дозволили зменшити, або позбавитись впливу перешкод на вимірювані корисні сигнали.

Встановлено, що установки подібного типу за умови виконання комплексу перешкодозахисних відомих та розроблених заходів можуть бути затребуваними в сферах новітніх наукових досліджень, зокрема для одержання електромагнітного випромінювання, в тому числі НВЧ діапазону. [3, 4].

### Список літератури

- [1] D.V. Vinnikov, O.M. Ozerov, V.V. Katrechko, V.I. Tkachov, S.V. Marchenko, B.O. Brovkin, V.B. Yuferov, O.V. Manuilenko, I.N. Onishchenko. Conditions ensuring maximum voltage multiplication factors for the din-2k accelerator. Problems of Atomic Science and Technology. 2025. №1(155) Series: Plasma Physics (31), p. 69-74. DOI: 10.46813/2025-155-069
- [2] Yinfeng Zhou, Ming Chen, Yu Tian, Xun Zhou, Pei Shen. Study on EMC and OTA Anechoic Chamber Compatibility. Journal of Electronic Research and Application, 2025, Volume 9, Issue 4., p.87-96. DOI: 10.26689/jera.v9i4.11450
- [3] James Benford, Edl Schamiloglu, Jacob Coty Stephens, John A. Swegle, Peng Zhang. High Power Microwaves. Engineering & Technology, Physical Sciences. pp. 510, 2024. DOI: 10.1201/9781003287704
- [4] S. Mumtaz, H.S. Uhm, E.H. Choi. Progress in vircators towards high efficiency: Present state and future prospects // Physics Reports. 2024, v. 1069, p. 1-46. DOI: 10.1016/j.physrep.2024.03.003

## ІНГІБУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ БІОЦІДНО ЗАБРУДНЕНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

Г. В. Таран<sup>1</sup>, О. О. Замурієв<sup>1</sup>, П. О. Опалєв<sup>1</sup>, С. В. Родіонов<sup>1</sup>, О. В. Кольчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ННЦ «Харківський Фізико-Технічний Інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup>ННЦ «Інститут експериментальної і клінічної ветеринарної медицини», Харків, Україна

У зв'язку з необхідністю пошуку альтернативних методів очищення хімічно- та біологічно- забрудненої питної води проведено дослідження щодо визначення біоцидного впливу плазмохімічних чинників (зокрема, озону, газового розряду над поверхнею води та їх сумісної дії) на штучно контамінований водний розчин об'єднаним інокулюмом робочих суспензій тест-культур музейних штамів кишкової палички *Escherichia coli* № 12 та грибів *Aspergillus flavus*. Показано, що застосування окремо озону або газового розряду над поверхнею розчину проявило незначні фунгістатичні дії щодо тест-культури *Aspergillus flavus* та бактеріостатичні властивості відносно *Escherichia coli* № 12 за експозиції 2; 2,5 та 3 години на рівні 64 %. Встановлено, що сумісна обробка озonom та плазмохімічним розрядом води, яка штучно забруднена асоціацією із музейних штамів бактерій *Escherichia coli* № 12 та патогенних грибів *Aspergillus flavus* з експозицією 2,5 – 3 години інгібує мікроорганізми, викликаючи руйнування мембран та генетичного матеріалу, що призводить до 95 % загибелі клітин та дозволяє підвищити якість питної води за мікробіологічними показниками.

Проведення дослідження виконувалось на двох спеціально розроблених і виготовлених експериментальних стендах озонувальної та електро-розрядної обробки розчинів. Озон в лабораторному повітрі синтезували в безбар'єрному генераторі озону «StreamOzone» максимальною потужністю 150 Вт. Концентрація озону в озono-повітряної суміші становила 5 г/м<sup>3</sup> при витраті суміші 8 л/хв. Отримана повітряно-озонова суміш барботувалася через розчин. В експериментальному стенді електро-розрядної обробки розчинів, газовий розряд запалювався безпосередньо над поверхнею розчину (розчин був анодом). Використовувалось високовольтне імпульсне джерело живлення, яке формує однополярні високовольтні імпульси (тривалість імпульсу до 1 мкс, амплітуда високовольтного імпульсу 5-12 кВ, струм у імпульсі до 10А, частота повторення імпульсів 1-20кГц) на резистивно-ємнісному навантаженні. Максимальна споживана потужність високовольтного імпульсного джерела живлення 150Вт. Потужність вимірювалася вимірювачем потужності РМ-200.

Проведені дослідження щодо впливу озону у різних дозах сумісно з розрядом над поверхнею розчину на життєздатність бактерій (загальна мікробна забрудненість), що знаходяться у експериментально контамінованому водному середовищі, показали наявність руйнування бактеріальних клітин. Інактивація мікроорганізмів за експозиції 180 хвилин під дією озону з концентрацією у газовій суміші 5 мг/л проявлялась на 78,0%, при концентрації 10 мг/л – на 79,3% і найбільш ефективною виявилась обробка розчину при концентрації озону 20 мг/л з руйнуванням бакте-

рій на 83,5% і з повною загибеллю супутньої мікрофлори (*E. coli*, *Enterococcus*, *Citrobacter*, *Enterobacter*) протягом 5 діб. Відновлення росту мікроорганізмів відмічали на 6-ту добу після обробки з концентрацією озону 5 мг/л у 1,6 рази, 10 мг/л - у 1,5 рази і 20 мг/л - у 1,3 рази відповідно.

Висунуто припущення, що сумісне застосування розряду над поверхнею водного розчину, основними чинниками впливу якого є ультрафіолетове випромінювання та утворення активних радикалів (зокрема радикалів ОН), і озону має синергічний ефект повного руйнування планктонних форм (поодиноких бактерій) і бактеріостатичну дію на асоціантів у мікробній біоплівці. Це пов'язано з тим, що бактеріальна клітина захищена від зовнішнього середовища клітинною стінкою. Основним структурним компонентом клітинної стінки являється муреїн (пептидоглікан), що складається із залишків, що чергуються N-ацетил-N-глюкозаміну і N-ацетилмурамової кислоти, з'єднаних глікозидними зв'язками. Клітинна стінка бактерій щільно прилягає до цитоплазматичної мембрани, яка представляє собою комплекс білків і ліпідів. Ультрафіолет під час дії на мікробну клітину (*E. coli*) пошкоджує клітинну стінку за рахунок розриву глікозидних зв'язків і окислення білків і ліпідів у цитоплазматичній мембрані, дозволяючи озону проникати в цитоплазму клітини. Далі озон викликає інактивацію ферментів і деградацію генетичного матеріалу ДНК, що призводить до витоку клітинного вмісту та лізису клітини (розчинення).

### Список літератури

- [1] Jones A. , Joshi T. Biocide. Use in the Antimicrobial Era: A Review. *Molecules* 2021 April Vol. 14, № 26(8):2276.
- [2] Ledakowicz S., Aya R., Padzior K., J Wratmbiak, Sójka-Ledakowicz Integration of Ozonation and Biological Treatment of Industrial Wastewater from Dyehouse. *Ozone: Science & Engineering* 2017, № 39, p. 357–365.
- [3] Taran G.V., Kudin D.V., Zamuriev O.O., Opaliev P.O., Yaroshenko M.O., Korniykov O. M., Arefiev, V.L., Kalashnik, M.V. Studying the influence of plasma-chemical and ozone treatment on artificially implemented microflora in model aqueous solutions. *Problems of Atomic Science and Technology* 2021, № 134(4), p. 177–182.

## АГРОВОЛЬТАІКА – ПОТЕНЦІАЛ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОГО СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Л. А. Лютенко<sup>1</sup>, Я. А. Бондаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківська державна академія дизайну і мистецтв, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Сучасні виклики в енергетичному та аграрному секторах України зумовлюють необхідність пошуку інноваційних рішень, спрямованих на одночасне забезпечення продовольчої та енергетичної безпеки [1, 5]. Руйнування енергетичної інфраструктури внаслідок воєнних дій актуалізувало проблему децентралізації генерації та підвищення стійкості енергосистеми. Водночас Україна має значний аграрний потенціал і високий рівень сонячної інсоляції, що створює сприятливі умови для розвитку агровольтаїки як інноваційного напрямку поєднання відновлюваної енергетики та сільського господарства [2,3].

Метою роботи є оцінка потенціалу агровольтаїки в Україні, зокрема в Харківській області, та визначення можливості використання сонячної енергії для сільського господарства.

Агровольтаїка передбачає розміщення сонячних панелей над сільськогосподарськими угіддями з метою одночасного вирощування культур та виробництва електроенергії. Технологія базується на використанні піднятих конструкцій із можливістю регулювання кута нахилу, що забезпечує оптимальні умови як для генерації, так і для розвитку рослин. Часткове затінення сприяє збереженню вологи у ґрунті, що має важливе значення за умов кліматичних змін. Міжнародний досвід демонструє ефективність цієї моделі: у Німеччині агровольтаїку застосовують у виноградарстві, у Франції – в овочівництві, у Японії – на рисових полях, у США – для ягідних культур [4].

Для оцінки потенціалу агровольтаїки в Україні розглянемо приклад Харківської області. Середньорічна сонячна інсоляція тут становить близько 3,2–3,4 кВт·год/м<sup>2</sup>/день [2]. За використання стандартних сонячних панелей із ККД близько 18% можна отримати з 1 м<sup>2</sup> близько 215 кВт·год електроенергії на рік (див. табл.1).

Таблиця 1. Річна генерація електроенергії з 1 м<sup>2</sup> сонячної панелі в Харківській області

Показник	Значення
Середня інсоляція (кВт·год/м <sup>2</sup> /день)	3,3
ККД сонячних панелей (%)	18
Добова генерація (кВт·год/м <sup>2</sup> )	0,59
Річна генерація (кВт·год/м <sup>2</sup> )	~215

Це еквівалентно, наприклад, роботі холодильника класу А++ упродовж року або забезпеченню освітлення фермерського господарства за допомогою LED-ламп.

Використання агровольтаїки в сільському господарстві України може бути спрямоване на: енергозабезпечення систем краплинного зрошення та насосних станцій; живлення холодильних установок для зберігання овочів, фруктів і ягід; забезпечення електроенергією теплиць і аграрних кооперативів; живлення об'єктів критичної інфраструктури у сільській

місцевості (шкіл, амбулаторій, адміністративних будівель) [1,5].

Для України впровадження агровольтаїки відкриває широкі можливості. Поєднання аграрного виробництва з відновлюваною енергетикою дозволяє підвищити ефективність землекористування без зниження врожайності, створює додаткові джерела доходів для фермерів, сприяє енергетичній незалежності сільських громад і формуванню нових робочих місць. У післявоєнний період агровольтаїка може стати важливим елементом відновлення та децентралізації енергосистеми, забезпечуючи безперебійне живлення об'єктів критичної інфраструктури [4].

Разом з тим розвиток цього напрямку в Україні потребує подолання низки бар'єрів: удосконалення нормативно-правової бази щодо використання земель сільськогосподарського призначення для енергетичних об'єктів, залучення інвестицій, адаптації технологій до кліматичних умов та аграрної специфіки.

Отже, агровольтаїка є перспективною технологією, що поєднує аграрні та енергетичні інновації. Україна має всі передумови для її успішного розвитку, зокрема сприятливі природні ресурси, аграрний досвід та нагальну потребу в енергетичній децентралізації. Розвиток агровольтаїки сприятиме підвищенню продовольчої й енергетичної безпеки, а також інтеграції України у світові тенденції "зеленої" економіки [2,3].

### Список літератури

- [1] Karpchuk, H., Budko, V., Lysenko, O. Technical achievable potential of photovoltaic conversion of solar radiation for the conditions of Ukraine. *EPJ Photovoltaics*, 15, 30 (2024). <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024016>
- [2] European Commission, Joint Research Centre. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)
- [3] World Bank, Solargis. *Global Solar Atlas* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://globalsolaratlas.info/map?c=46.316584%2C63.1054+69%2C3&r=UKR>
- [4] Redko, I., Redko, O. I., Redko, A., Bakumenko, N., Ujma, A., Zadiranov, V. Оцінка енергетичного потенціалу сонячної радіації та порівняння з нормативними даними для України. *Метеорологія, гідрологія та водне господарство*, 13(1), 60–73 (2025). <https://doi.org/10.26491/mhwm/208954>
- [5] Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J. M., Linßen, J., Stolten, D. High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for a resilient energy system in Ukraine. *Energy Conversion and Management*: X, 28, 101242 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101242>

## ЕЛЕКТРОФІЗИЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРЯДІВ ІЗ СУБНАНОСЕКУНДНИМ ФРОНТОМ В ГАЗОВИХ БУЛЬКАХ

М. І. Бойко<sup>1</sup>, А. В. Макогон<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup>Інститут електрофізики і радіаційних технологій Національної академії наук України, Харків, Україна

При використанні високовольтних наносекундних розрядних імпульсів можливо отримати об'ємну стримерну плазму у розрядному проміжку без переходу у контрагований (шнуровий) розряд. Це дозволяє отримати високоінтенсивні знезаражуючі фактори (швидкі електрони, радикали ОН, атомарний кисень, перекис водню, озон та інші) в об'ємі всього розрядного проміжку. Час життя радикалів ОН не перевищує 1 мс, завдяки їх великій активності. Вперше експериментально таку можливість ми реалізували в розрядному проміжку тригатронів на робочу напругу до 400 кВ при тривалостях фронтів імпульсів в одиниці наносекунд. Пізніше різні автори з Європи та Азії розрахунковим шляхом підтвердили наявність об'ємних стримерів (первинної об'ємної зони іонізації) в розрядних проміжках величиною порядку 1 см при фронтах імпульсів в одиниці наносекунд і ще більш коротких.

Електрофізична технологія знезараження води наносекундними розрядами із субнаносекундним фронтом в газових бульбках усередині води полягає в створенні за долі наносекунди в цих бульбках об'ємної стримерної плазми, в якій напрацьовуються високоінтенсивні знезаражуючі фактори (в тому числі широкосмугове випромінювання) завдяки протіканню плазмохімічних реакцій. Щоб створити первинну об'ємну зону іонізації в газовій бульбці за час, менший ніж 1 наносекунда, треба забезпечити наявність пробивної напруженості електричного поля в бульбці за цей час. Пробивна напруженість із зменшенням часу наростання напруги на розрядному проміжку (на газовій бульбці) суттєво зростає порівняно з величиною статичної пробивної напруги і може складати більше 100 кВ/см. Тому при робочій напрузі генератора високовольтних імпульсів 50 кВ характерний розмір розрядного проміжку, в якому треба отримати об'ємну іонізацію, не повинний перевищувати 0,5 см. При створенні первинної зони об'ємної іонізації в таких сильних імпульсних електричних полях важливу роль відіграють тікаючі електрони (runaway electrons). Вони можуть набрати енергію більше 10 еВ і ефективно дисоціювати молекули, іонізувати атоми і молекули, запускаючи низку плазмохімічних реакцій в газових бульбках. В таких реакціях створюються різноманітні знезаражуючі фактори, включаючи радикали ОН, атомарний кисень та озон. Тікаючі електрони можуть проникнути і в оточуючу газову бульбку воду, створюючи безпосередньо у воді високоінтенсивні знезаражуючі фактори, тобто фактори, які інактивують мікроорганізми у воді. Після створення первинної об'ємної зони іонізації усередині газової бульбки велика частина прикладеної до реактора зі знезаражуваною водою напруги падає не на бульбці, а на воді, що оточує бульбку, заповнену об'ємною стримерною плазмою. Таким чином, при

такій технології знезараження води на оброблювану воду діє весь комплекс факторів від об'ємного стримера (або дифузного розряду) в початково газовій бульбці, а також сильне імпульсне електричне поле з напруженістю, яка перевищує 100 кВ/см. Частота проходження високовольтних наносекундних імпульсів може сягати десятка тисяч імпульсів за секунду. Ця частота обмежується часом розпаду газової плазми в бульбці і часом відновлення електричної міцності газу, що його пропускають крізь воду у вигляді газових бульбок. Треба також мати на увазі, що вода може мати досить малий питомий опір (менше 5 Ом\*м) і має високу відносну діелектричну проникність  $\epsilon \approx 81$ , що може призвести до розряду генератора високовольтних імпульсів через воду за декілька наносекунд.

Основні переваги технології знезараження води за допомогою розрядів із субнаносекундним фронтом в газових бульбках порівняно з класичною технологією озонування води.

1. Вода знезаражується усім комплексом факторів від розрядів в газових бульбках і високою напруженістю сильного імпульсного електричного поля, а також високою густиною струму зміщення і активного струму.

2. Усі знезаражуючі фактори отримуються у газових бульбках у воді і безпосередньо у воді під час виникнення об'ємного стримера в газовій бульбці, а не десь в іншому місці, як це відбувається при одержанні озону, а потім при транспортуванні його по відповідним трубопроводам до місця його змішування з оброблюваною водою.

3. Не потрібні деструктори високоінтенсивних факторів при використанні даної технології, тому що час життя переважної більшості з цих факторів суттєво менше 1 секунди. А озон, який теж є в складі комплексу високоінтенсивних факторів, має незначну початкову концентрацію, тому теж не потребує деструкторів.

Завдяки дії цілого комплексу високоінтенсивних факторів ефективність знезараження і очищення води при використанні даної технології суттєво вища, ніж при класичному озонуванні, а питомі енерговитрати і вартість знезараження - суттєво нижчі.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОАКСІАЛЬНОГО ПЛАЗМОВОГО ПАЛЬНИКА З ТАНГЕНЦІАЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ

М. М. Заблодський, О. І. Ковальчук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності теплотехнічних установок є використання плазмових коаксіальних пальників, які поєднують електричний розряд з аеродинамічним завихренням паливно-повітряної суміші, забезпечуючи інтенсивне перемішування компонентів, стабільне горіння та зниження шкідливих викидів [1]. Метою роботи є дослідження впливу кута тангенціальної подачі повітря на стабільність плазми та формування факела в коаксіальному пальнику для його подальшої оптимізації.

Експериментальний стенд включав коаксіальний плазмовий пальник (рис. 1). Завихрення потоку забезпечувалося чотирма тангенціальними каналами подачі повітря під кутом  $15^\circ$  відносно горизонталі. Повітря нагніталось регульованим відцентровим вентилятором, що забезпечувало середню швидкість потоку на вході близько 5 м/с. Суміш пропану з повітрям використовувалася як паливо, причому повітря одночасно виконувало роль окиснювача та агента завихрення. Запалювання дуги здійснювалося високочастотним генератором із напругою 14 кВ та частотою 15 кГц.

Методика дослідження передбачала два етапи: стабілізацію обертового стримерного розряду в потоці повітря (Рис. 2а) та формування завихреного факела у газоповітряній суміші (Рис. 2б).

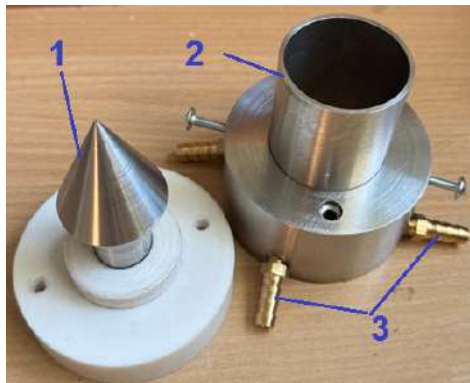


Рис. 1. Схема КПП:

1 – катод; 2 – анод; 3 – тангенціальні інжектори

Експерименти показали формування обертової дуги та стійкого факела із зоною рециркуляції біля вершини катода. Збільшення швидкості повітряного потоку з 5 до 6 м/с сприяло подовженню факела на 15–20 % та рівномірнішому розподілу світіння по аноду. Для детального аналізу структури потоку виконано чисельне моделювання в COMSOL Multiphysics® [2] (модель турбулентності RANS  $k-\omega$  SST), результати якого узгоджуються з експериментальними спостереженнями і підтверджують наявність центральної рециркуляційної зони (рис. 3).

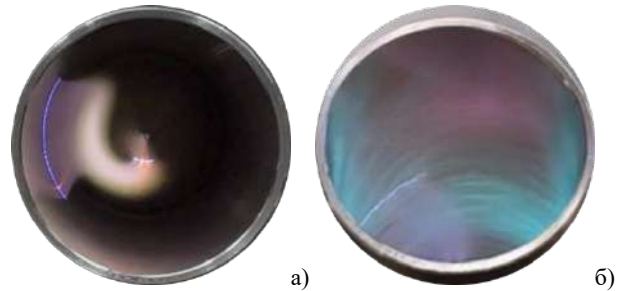


Рис. 2. Фото експериментальних результатів:  
а – обертовий стримерний розряд; б – горіння завихреного факела

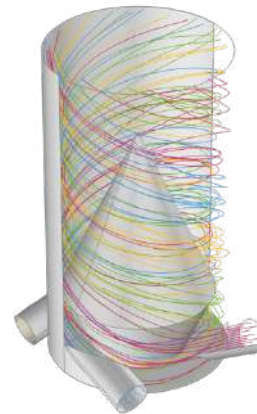


Рис. 3. CFD-візуалізація рециркуляційної зони

Отримані результати підтверджують ефективність тангенціальної подачі під кутом  $15^\circ$  для стабілізації плазми та формування стійкого факела. Запропонована конструкція може бути використана як основа для подальшої оптимізації плазмових пальників, у тому числі для роботи на воднево-вуглеводневих сумішах.

### Список літератури

- [1] Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes / N. Zablodskiy et al. 2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024. 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556> (date of access: 05.10.2025).
- [2] Comsol Multiphysics: website. URL: <https://www.comsol.com/> (date of access: 05.10.2025).

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ МАСИВНОГО ФЕРОМАГНІТНОГО ПРОВІДНИКА

С. П. Мостовий, С. А. Князєв, О. В. Бахвалов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Одним з основних напрямків технології фізичного зміцнення виробів є магнітно-імпульсна обробка матеріалів. Під магнітною дією речовина змінює свої фізико-механічні властивості. Відомо, що поліпшення властивостей феромагнітних частин, які піддаються імпульсній магнітній обробці, пов'язане з спрямованою орієнтацією вільних електронів речовини на зовнішнє поле, тим самим збільшуючи тепло і електропровідність матеріалу. Взаємодія імпульсного магнітного поля з оброблюваним виробом з провідного матеріалу відбувається тим інтенсивніше, чим вище структурна та енергетична неоднорідність речовини.

Процеси, які призводять до зміцненню поверхневих шарів сталей виробів під впливом імпульсу магнітного поля, окрім деформацій, які викликають ущільнення структури поблизу поверхні, відносяться також явища фазових перетворень аустеніт-мартенсит, міграції домішок та дефектів виникнення дрібнодисперсної структури на поверхні заготовки, пов'язане з утворенням нових кордонів між зернами і дробленням пластинок цементиту. Здійснення цих процесів безпосередньо пов'язане з неоднорідністю матеріалу сталі, локальним виділенням теплоти поблизу зерен при протіканні індукційних струмів і магнітострикційними ефектами (у випадку виробів, виконаних з магнітних сталей) [1-3].

Метою даної роботи є дослідження впливу імпульсного магнітного поля на структуру матеріалу та визначення можливості зміцнення поверхневого шару масивного феромагнітного виробу прикладним магнітним полем високої інтенсивності.

Методами сучасного фізичного матеріалознавства проведено порівняльний аналіз структури та механічних властивостей (мікротвердості) поверхневого шару масивного феромагнітного виробу у вигляді кільця з площею прямокутного перерізу  $5 \text{ cm}^2$ , середнім діаметром 121 мм зі сталі марки Р6М5. Зразок мав магнітні властивості, відносна магнітна проникливість складала 630. Магнітно-імпульсна обробка поверхні проводилася за допомогою плоскої індукторної системи (спіральної котушки) при значенні енергії магнітного поля ємнісного накопичувача 4-6 кДж, кількості імпульсів 10-40, тривалості імпульсу 400-510 мкс при амплітудних значеннях імпульсу струму 11-14 кА (для різних режимів обробки)..

Вплив на поверхню виробу на імпульсного магнітного поля призвів до утворення в поверхневому шарі виробу шару неоднорідності товщиною 40-60 мікрон, нерівномірно розподіленого по товщині аксіально вздовж поверхні зразка. Після магнітно-імпульсного впливу значення мікротвердості на глибині 50 мкм складало 9469 МПа (зростання на 31 % від початкової мікротвердості 7220 МПа, рис.1). Перевищення значень отриманої мікротвердості над початковою спостерігалось до глибин 300 мкм. В подальшому той же зразок виробу оброблювався імпуль-

сами магнітного поля тієї ж амплітуди та при збільшеній в тричі тривалості імпульсу магнітного поля. В цьому випадку структура матеріалу характеризувалася зникненням поверхневого шару з мікротвердістю 9469 МПа, проте підвищення значень мікротвердості по відношенню до початкового складало 8060 МПа - 7360 МПа (відповідно для глибини шару 50 мкм - 400 мкм) при повільно спадаючому та рівномірному розподілі цієї величини по товщині зразка.

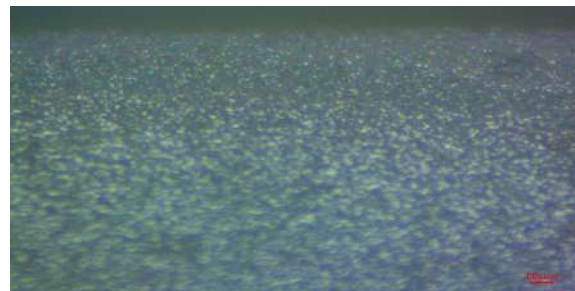


Рис. 1. Зразок поверхні виробу з шаром зміцнення

Зауважимо, що товщини шарів зміцнення окрім вказаного вище механізму утворення, також опосередковано можуть бути пов'язані з так званим тепловим скін - шаром, який викликає локальні термічні впливи на мікроструктуру зразка і в кількісному виразі для масивних феромагнітних тіл (по аналогії з скін - шаром у плоскому масивному немагнітному провіднику) може складати близько однієї десятої від величини скін-шару електромагнітного поля, розрахованого класичним способом [4].

### Список літератури

- [1] Alifanov A. V., Tsionenko D. A., Miljukova A. M., Tsionenko N. M. Magnitostriktionnyj mehanizm obrazovanija melkodiesper snoj struktury v stal'nyh izdelijah pri magnitno-impul'snom vozdejstvii [Magnetostrictive mechanism of the formation of a fine-dispersed structure in steel products under magnetic-pulse action] . Vesti NAN Belarusi, Ser. fiz.-mat. navuk Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus . Ser . fiz .-mat. Sciences, 2016, no . 4, pp . 31–36
- [2] Wang Y., Mao B., Chu S., Chen S., Xing H., Zhao H., Wang S., Wang Y., Zhang J., Sun B. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, micro-structural evolution, and engineering performance. Journal of Materials Research and Technology. 2023; 24 : 8198–8240.
- [3] Volodin T., Nevskii S., Gromov V., Bashchenko L., Shamsutdinova D. Structural-phase states and properties of high-speed steel after pulsed energy effects. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2024;(2):43-52. (In Russ.) [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-43-51](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-43-51)
- [4] Baranov M.I. Calculation of the penetration depth of the temperature field into a massive conductor with alternating current (In Russ.) Electrical engineering & Electromechanics. – 2004. – № 2. – p. 74-79.

## ДУГОВИЙ СИНТЕЗ ВПОРЯДКОВАНИХ СТРУКТУР З ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ДЛЯ ТЕРМОЕМІСІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

В. Г. Удовицький, В. В. Литвиненко

Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, Україна

Термоемісійні перетворювачі теплової енергії в електричну (ТЕП) привертають значну увагу спеціалістів як один з перспективних напрямків вирішення проблеми енергетичного переходу. Їх робота базується на явищі термоелектронної емісії електронів з поверхні нагрітих матеріалів. Такі ТЕП, які були створені і досліджувалися в минулому столітті, потребували нагріву матеріалів катоду до високих температур для забезпечення достатньої емісії електронів з них. Прогрес в створенні нових матеріалів відкрив нові можливості створення ТЕП, які працюють при значно нижчих температурах, зокрема, використовуючи нагрів концентрованим сонячним випромінюванням або теплоносієм з зовнішнього контуру охолодження ядерного реактора. До таких матеріалів належать вуглецеві нанотрубки (ВНТ), які мають багато унікальних властивостей – високі механічну міцність, електро- та теплопровідність, високу хімічну і термічну стійкість, високу авто- і термоелектронну емісію, велике аспектне відношення їх будови та ін. Завдяки своїй будові і унікальним властивостям вони вже знайшли і ще мають багато потенційних можливостей широкого використання, зокрема в електроніці, машинобудуванні (створення нових матеріалів), енергетиці, тощо. В енергетиці ВНТ і матеріали на їх основі, наприклад, представляють значний інтерес для створення пристроїв (акумуляторів) для зберігання водню оскільки саме проблема зберігання водню є однією з головних на шляху успішного розвитку водневої енергетики, яка є перспективним напрямком вирішення енергетичної проблеми [1]. Перелічені вище унікальні властивості ВНТ роблять їх перспективним матеріалом також для виготовлення термоемісійних катодів ТЕП. Особливо цікавим і перспективним представляється використання для цього не окремих ВНТ, а вертикально впорядкованих масивів (лісу) з ВНТ. Це обумовлюється тим, що такий масив (ліс) ВНТ є хорошою тепловою пасткою і в цьому масиві тепло і струм передаються в одному напрямку вдовж нанотрубки, а на її кінці відбувається ефективна термо- і автоелектронна емісія електронів [2,3].

Для синтезу впорядкованих структур (лісу) з ВНТ можна використовувати різні методи, з яких найчастіше використовуються хімічне нанесення ВНТ з парів вуглецю (CVD, chemical vapour deposition), а також синтез в дуговому розряді між двома графітовими електродами (ARC synthesis). Нами для синтезу лісу ВНТ досліджувався і використовувався модифікований дуговий синтез з використанням активуючої та орієнтуючої дії електричних і магнітних полів. Для цього металічну підкладку з каталітичного металу, на якій вирощували масив з ВНТ, в спеціальному пристрої поміщали в електричне і магнітне поле. В залежності від орієнтації підкладки відносно прикладених полів впорядковані масиви ВНТ можна

наносити як перпендикулярно до підкладки, так і паралельно підкладці. Деякі знімки таких структур, отримані методом скануючої електронної мікроскопії, приведені на рис. 1 і 2.

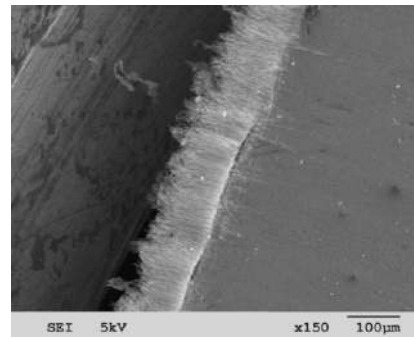


Рис. 1. ВНТ орієнтовані по нормалі до підкладки

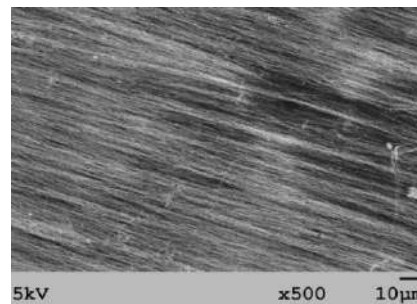


Рис. 2. ВНТ, які стеляться по підкладці

Дуговий синтез ВНТ з використанням активуючої дії електричних і магнітних полів, таким чином, дозволяє отримувати мікро- і макроструктури з ВНТ, які можуть бути використані для різних цілей, зокрема і для використання в термоемісійних перетворювачах енергії.

### Список літератури

- [1] Удовицький В.Г., Литвиненко В.В. Зберігання водню з використанням твердотільних сорбентів на основі вуглецевих нанотрубок // II Міжн. науково-технічна конференція імені В. Восводіна «Проблеми сучасної ядерної енергетики» (16–18 квітня 2025 р., м. Харків): Збірник тез доповідей. С.25.
- [2] Hassan, M. O. Planarization of Vertically Aligned Carbon Nanotube Forests for Electron-Emission Devices. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2.7: 4594.
- [3] Nojeh, A. Heat Localization and Thermionic Emission from Carbon Nanotubes. In: *Nanostructured Carbon Electron Emitters and Their Applications*. Jenny Stanford Publishing, 2022. p. 107-125.

## ВПЛИВ СКІН-ЕФЕКТУ НА ПОВЕРХНЕВИЙ ТИСК ПРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ФОРМУВАННІ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК

М. П. Петренко, В. Є. Марценюк, Є. М. Тейберман, Д. Я. Томчук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Магнітно імпульсна обробка металів (МІОМ) – це імпульсна технологія, що використовує короткочасні магнітні поля для деформування металевих заготовок [1]. Під дією імпульсного струму в індукторі виникає електромагнітне поле, яке індуктує вихрові струми у заготовці. Взаємодія цих струмів із магнітним полем створює електродинамічні сили, що швидко формують метал у потрібну форму. Метод має переваги над механічним формоутворенням: вищі границі деформації, відсутність контакту з інструментом і можливість отримання складних форм.

Типовий діапазон робочих частот у МІОМ становить 1-100 кГц, у якому електромагнітні процеси супроводжуються помітним скін-ефектом. У багатьох аналітичних моделях для спрощення приймають припущення ідеального скін-ефекту, коли струм протікає лише по поверхні провідника.

У цій роботі досліджується вплив реального розподілу густини струму за товщиною матеріалу на електромагнітне поле та електродинамічний тиск під час МІОМ. Особливу увагу приділено випадкам, коли припущення ідеального скін-ефекту не може бути застосоване, оскільки товщина скін-шару є порівняною або більшою за товщину провідників.

У своїх розрахунках ми використовували метод скінченних елементів (МСЕ), який є поширеним інструментом для розв'язання інженерних задач, зокрема для розрахунку змінних магнітних полів [1]. У роботі застосовано відкриту програму Finite Element Method Magnetics (FEMM) [2], оптимізовану для аналізу низькочастотних електромагнітних процесів, що дозволяє враховувати нерівномірний розподіл струму за глибиною провідників. Для підвищення достовірності результатів додатково використано програму ElmerFEM [3].

Для порівняння різних комбінацій параметрів частоти і товщини заготовки була використана система індуктора-заготовки (рис. 1). Ця конструкція подібна до тієї, що досліджувалася у статті [4], де запропоновано інший аналітичний підхід до обчислень і наведено експериментальні дані швидкості деформації заготовки і пікового поверхневого тиску.

Параметри заготовки: радіус  $R_w = 12.7$  мм, товщина стінки  $a_w = 0.89$  мм.

Параметри індуктора:  $R_1 = 13.21$  мм,  $R_2 = 28.31$  мм,  $R_3 = 102.81$  мм,  $l_1 = 7.9$  мм,  $l_2 = 38.1$  мм,  $I = 300$  кА.

Для визначення електродинамічного тиску використано вираз (1).

$$P(z,t) = \frac{1}{R_w} \int_{R_w - a_w}^{R_w} J_\theta(r,z,t) B_z(r,z,t) r dr, \quad (1)$$

де:  $J_\theta$ ,  $B_z$  – проекції густини струму в заготовці та індукції магнітного поля на відповідні осі циліндричної системи координат;  $r$ ,  $z$  – поточні координати,  $t$  – час.

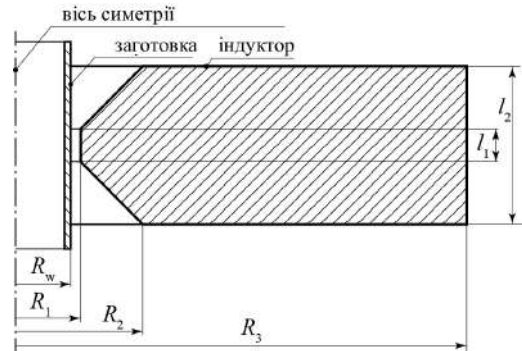


Рис. 1. Поперечний переріз осесиметричного одновиткового індуктора із трубчастою заготовкою

Інтегрування за формулою (1) виконувалося чисельно під час постобробки результатів за допомогою спеціально розробленого Lua-скрипта.

Розрахунки показали, що зі зменшенням частоти пікові стискаючі електродинамічні зусилля очікувано зменшуються, а також з'являються періодичні розширюючі зусилля, які при частотах вище 10 кГц майже не спостерігаються.

Вплив товщини стінки заготовки виявився менш вираженим. У розрахунках товщину зменшували утричі – до значень 2.25 мм, 1.5 мм та 0.89 мм. Проте це не призвело до суттєвої зміни пікових зусиль при однаковій частоті. Зокрема, при частоті 10 кГц, де очікувалися ефекти, пов'язані з недостатньо вираженим скін-ефектом у тонкій заготовці (0.89 мм), отримане значення тиску 165.4 МПа навіть перевищило показник для товстішої заготовки (2.25 мм) – 160.3 МПа, що суперечить попереднім очікуванням. При частотах 50 кГц і вище спостерігається очікувана тенденція – збільшення тиску зі зростанням товщини стінки.

У випадках низьких частот і тонких заготовок глибина скін-шару не може розглядатися як єдиний критерій оцінки ефективності процесу формування. Окрім глибини проникнення поля, необхідно враховувати також геометричні параметри системи та взаємне розташування провідників, які істотно впливають на розподіл і величину електромагнітних зусиль.

### Список літератури

- [1] Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., et al. Electromagnetic forming - a review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No 5, 2011, 787-829.
- [2] Meeker, D. C. Finite element method magnetics: Веб сайт. URL: <http://www.femm.info>. (дата звернення: 01.10.2025).
- [3] Malinen, M., & Råback, P. Elmer finite element solver for multiphysics and multiscale problems. *Multiscale Model. Methods Appl. Mater. Sci.*, No 19, 2013, 101-113.
- [4] Nassiri, Ali, et al. Analytical model and experimental validation of single turn, axi-symmetric coil for electromagnetic forming and welding. *Procedia Manufacturing*, No 1, 2015, 814-827.

## ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ІМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА НА ІМПУЛЬС НАПРУГИ НА НАВАНТАЖЕННІ

К. В. Коритченко<sup>1</sup>, В. Ф. Болух<sup>1</sup>, Д. М. Тіщенко<sup>2</sup>, В. Ю. Титов<sup>2</sup>, І. О. Чертіщев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

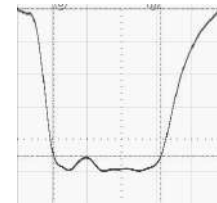
<sup>2</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна

Високовольтні імпульсні модулятори використовуються в якості джерела живлення в багатьох установках, випробувальних стендах та в технологічних прискорювачах [1,2]. Актуальним постає питання дослідження процесу формування імпульсу напруги на виході імпульсного модулятора. На експлуатуємих пристроях в якості навантаження використовуються здебільшого імпульсні клістри (іноді активне навантаження). В результаті розряду накопичувача на навантаженні формується високовольтний імпульс заданої форми [3].

Метою даної роботи є експериментальне дослідження та подальше створення математичної моделі для аналізу впливу елементів схеми імпульсного модулятора на результатний високовольтний імпульс. В роботі розглядається вплив окремих елементів схеми на імпульс на виході модулятора, і зворотна задача виходячи з форми імпульсу дається оцінка параметрів схеми. Основними елементами модулятора що впливають на форму вихідного сигналу є накопичувач, імпульсний трансформатор та власне навантаження. При цьому тільки імпульсний трансформатор має нелінійні властивості що може дещо ускладнити розрахунки.

На рис 1 наведено імпульси на виході імпульсного модулятора при використанні в якості накопичувача формувальної лінії з хвильовим опором 8 Ом. Навантаженням в даному випадку є клістрон з опором променю перерахованому до первинної обмотки імпульсного трансформатора 8 Ом, таким чином маємо узгоджений режим роботи імпульсного модулятора.

З рис 1 витікає що за допомогою внесення змін в схему модулятора можливо коригування імпульсів на навантаженні. За допомогою аналізу впливу окремих вузлів модулятора на високовольтний імпульс на навантаженні можливо давати оцінку працездатності кожного окремого вузла модулятора. Математична модель формування високовольтних імпульсів була реалізована за допомогою розрахункових програм (Electronic Work Bench). Експериментальні імпульси напруги та струму пучка подавались на емнісні та омичні дільники та вимірювались за допомогою цифрових осцилографів та комп'ютерно-вимірювальної системи. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання роботи модуляторів проводився шляхом порівняння розрахункових та експериментальних результатів. Він продемонстрував прийнятну точність запропонованої математичної моделі.



а



б



в

Рис 1. Імпульси напруги на виході імпульсного модулятора при узгодженому режимі роботи з  
а) одним некоректно налаштованим осередком,  
б) декількома некоректно налаштованими осередками  
в) правильно налаштованим імпульс.  
1 мкс/клітка, 20 кВ/клітка

Проведені розрахунки та експерименти аналіз також доводить можливість формування високовольтних імпульсів для живлення елементів технологічних прискорювачів заданої форми необхідної для стабільної та надійної роботи приладів. Виходячи з форми імпульсів на окремих елементах модулятора маємо можливість прогнозувати та коригувати високовольтні імпульси на виході модулятора.

### Список літератури

- [1] Бандуров С. О., Ложкін Р. С., Шишкін Г. О. Analysis of areas of application of medium – energy electron accelerators. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, № 29 (1354) 2019 р 3-8.
- [2] N. P. Dikiy, A. N. Dovbnya, Yu. V. Lyashko, E. P. Medvedeva, Yu.D. Tur, V.L. Uvarov Production of medical isotopes at electron accelerators // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”. 2000, № 2, p. 58-61
- [3] I. O. Chertishchev, O. I. Kosoy, V. O. Mats, Yu. O. Titarenko Estimation of parametrs of high-voltage modulators electron accelerator // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Nuclear Physics Investigations”. 2024, № 5, p. 81-84. <https://doi.org/10.46813/2024-153-08>

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ РЕЗОНАТОРИ ДЛЯ АКТИВАЦІЇ КВАНТОВИХ СЕНСОРІВ НА NV-ЦЕНТРАХ

О. Л. Резинкін, М. М. Резинкіна

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Негативно заряджені центри азотних вакансій (NV) у алмазах [1] використовуються як квантові сенсори для різних фізичних величин, включаючи магнітне поле [2], електричне поле [3], температуру [4], та інші. Електромагнітні поля (ЕМП) мікрохвильового діапазону (MW) використовуються для маніпулювання спінами цих квантових центрів. Для формування імпульсів магнітного поля, що маніпулюють спінами квантових ансамблів NV, необхідно створювати MW S-band антени ближньої зони з рядом дуже специфічних вимог щодо однорідності розподілу магнітного поля та амплітудно-частотних параметрів. Узгодженість з MW генератором та пов'язані з нею рівні магнітної індукції суттєво впливають на амплітуду керуючих імпульсів, яка є у свою чергу є пропорційною частоті квантових осциляцій Рабі.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів MW резонаторів для утворення ЕМП у квантових сенсорах на NV-центрах та вибір їх параметрів, що забезпечують більші рівні магнітної індукції завдяки узгодженню їх імпедансу у необхідному діапазоні частот.

Відомі омега-подібні форми антен [5,6], побудованих за технологією двошарових друкованих плат, які були розроблені для поверхневих ансамблів NV-центрів. Однак проблема одночасного забезпечення високого рівня магнітної індукції, та частотної узгодженості імпедансу резонатора у S-band MW потребує подальшого дослідження.

У [5] описано плоский резонатор (рис. 1а), який дозволяє отримати необхідну щільність магнітного потоку для активації кольорових центрів NV (300 мкТл при потужності MW генератора 1 Вт). За допомогою пакету Comsol Multiphysics було проведено моделювання електромагнітних процесів у цій системі. Порівняння даних моделювання з результатами вимірювань, представленими в [5], а також власними вимірюваннями у такій виготовленій нами системі показало їх збіг у межах експериментальної похибки. Однак, ця система є електрично неузгодженою, оскільки її імпеданс у необхідному діапазоні частот значно відрізняється від характеристичного імпедансу 50 Ом. Отже, значна частина електромагнітних хвиль відбивається від системи полегнення і не вся енергія джерела використовується для отримання магнітної індукції.

Для забезпечення узгодження системи формування поля з джерелом живлення може бути використана альтернативна конфігурація, подібна до описаної в [6] (рис. 1б). При відповідному виборі параметрів така система формування поля забезпечує електричне узгодження з фідером 50 Ом, однак рівні щільності магнітного потоку у ній у декілька разів менші ніж для [5]. Проте, проведене математичне моделювання показало, що навіть оптимізована конструкція, яка повністю узгоджена з джерелом живлення, не дозволяє отримати високих рівнів магнітної індукції.

Ми пропонуємо комбіновану систему (рис. 1с), яка поєднує переваги цих двох типів резонаторів. Зберігаючи приблизно ті ж рівні щільності магнітного потоку, що й перший резонатор, ця система має вхідний опір 50 Ом на резонансній частоті 2.87 ГГц (рис. 1д). Резонанс на частоті 2.87 ГГц був досягнутий шляхом зміни довжини та ширини смужкової лінії, а також форми екрану, із задньої сторони. Зміна конфігурації резонатора призводить до того, що діаграма Смита (рис. 1д) для такої системи проходить через центр на резонансній частоті, тож система практично ідеально узгоджена.

Як показали дослідження, запропоновані параметри резонатора дозволяють значно підвищити енергоефективність формування MW поля для маніпулювання поверхневими NV-ансамблями, що є особливо важливим для мобільних застосувань квантових вимірювань.

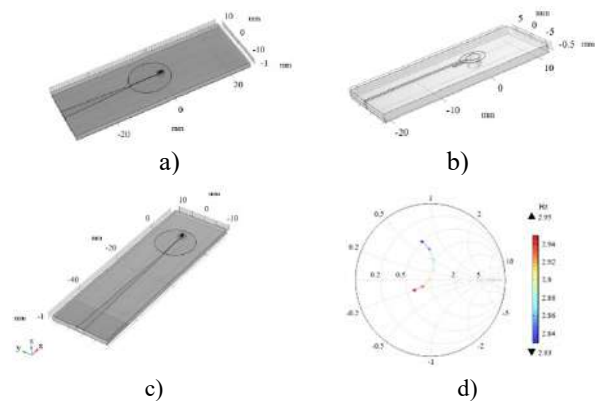


Рис. 1. а), б), с) – MW резонатори, д) – діаграма Смита для системи с)

### Список літератури

- [1] Savage, N. Quantum diamond sensors. *Nature* 2021 591 (7851), 37.
- [2] Rondin L., Tetienne J.-P., Hingant T., Roch J.-F., Malietinsky P., and Jacques V., Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond. *Reports on Progress in Physics* 2014, 77, 05650.
- [3] Dolde, F., Fedder, H., Doherty, M. et al. Electric-field sensing using single diamond spins. *Nature Phys*, 2011, 7, 459–463.
- [4] Choe S., Yoon J., Lee M., Oh J., Lee D., Kang H., Lee C.-H., and Lee D. Precise temperature sensing with nanoscale thermal sensors based on diamond NV centers. *Current Applied Physics* 2018, 18, 1066–1070.
- [5] Sasaki K., Monnai Y., Saijo S., Fujita R., Watanabe H., Ishi-Hayase J., Itoh K. M., and Abe E. Broadband Large-Area Microwave Antenna for Optically Detected Magnetic Resonance of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond. *Rev. Sci. Instrum.* 2016, 87, 1.
- [6] Zhao M., Lin Q., Zhu L., Zhao L., and Jiang Z. Antenna for microwave manipulation of NV colour centres. *Micro Nano Lett.* 2020, 15, 793.

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ КАБЕЛІВ З ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМИ НАДПРОВІДНИКАМИ

В. В. Шевченко, А. М. Андрієнко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Останні роки світ стоїть перед глобальними проблемами: значне зростання споживання електроенергії, необхідність підвищення енергоефективності та обов'язкова декарбонізація джерел через безперервне зростання проблем екології. Сучасна електроенергетика переживає глибоку трансформацію: зростають навантаження на мережі, збільшується частка відновлюваних джерел, зростають вимоги до надійності та енергоефективності на фоні війни, загально-світової економічної кризи, значного зношення електрообладнання всіх типів на всіх етапах енергопостачання. У цих умовах класичні кабельні лінії зі струмонесучими жилами з міді або алюмінію досягають своїх технічних обмежень. До основних проблем традиційних кабелів можна віднести: значні електричні втрати при передачі великих струмів (до 5–7 % на ділянках великої довжини); обмеження пропускної здатності кабелів через обмеження допустимої щільності струму; необхідність збільшення перерізу струмонесучої жили кабелю при підвищенні потужності, відповідне, маси і вартості кабелю. Ще слід відмітити значні труднощі з прокладанням у щільній міській забудові, де місце під кабельні траси обмежене. У цьому контексті високотемпературні надпровідники (ВТНП) пропонують рішення до проблем транспортування електроенергії. Це робить дослідження, розробку та втілення в практичне використання актуальним та перспективним. Їхня перспективність обумовлена тим, що технологія знаходиться на піку своєї розробки: вартість надпровідників, через спрощення технології виготовлення, знижується, зростає номенклатура, якість і доступність матеріалів. За останні 10 років собівартість зменшилась більш ніж утричі, і ця тенденція триває.

Високотемпературні надпровідники (ВТНП), такі як куприти YBCO (ітрій-барій-мідь-оксид) або BSCCO (вісмут-стронцій-кальцій-мідь-оксид), мають надпровідні властивості при температурах 70–77 К, тому для охолодження достатнє рідкого азоту – надійного, доступного, дешевого і, головне, неагресивного холодоагенту. Дослідники вважають, що використання ВТНП це не лише інноваційна технологія, а й практичний інструмент розв'язання критичних проблем сучасних електромереж В табл. 1 наведені переваги та напрямки використання ВТНП у силових кабелях.

Використання ВТНП дозволяє суттєво підвищити ефективність, надійність і пропускну здатність кабельних мереж, робить перспективним для модернізації енергосистем наступних поколінь. Звичайно використання ВТНП провідників для кабелів привносить багато особливостей на всіх етапах: створення, прокладання, контролю, діагностики. Особливих досліджень потребує вибір постійного або змінного струму для ВТНП кабелів.

Таблиця 1. Переваги та перспективи використання ВТНП у силових кабелях

№	Перевага аргумент	Пояснення	Вплив на кабельні мережі
1	Мінімальні втрати енергії	У НП-ному стані $R=0$ , то електричні втрати майже відсутні	Підвищення ККД передачі, зменшення втрат на 70–90 %.
2	Висока пропускна здатність	ВТНП-жила пропускає у 3–5 разів більший струм при тому ж перерізі	Передача більшої потужності без збільшення кількості або розмірів кабелю
3	Компактність і менша маса	Майже повна відсутність втрат дозволяє зменшити діаметр жили	Легше прокласти у щільній міській забудові, менші обсяги земляних робіт
4	Менший тепловий вплив на ізоляцію	Уповільнюється старіння ізоляції	Збільшення строку експлуатації, зменшення аварійності
5	Більш безпечні для екології	Рідкий азот – недорогий, безпечний та екологічний	Менше вплив на довкілля, вища безпека експлуатації
6	Сумісність із <i>Smart Grid</i>	Мають стабільні параметри, тому інтегруються з цифровими системами	Підвищення керованості, автоматизації та моніторингу мереж
7	Перспективність для систем постійного струму	Висока ефективність у надпровідних системах постійного струму	Підвищення ефективності мереж постійного струму великої потужності
8	Зниження габаритів підстанцій і трас	Більша щільність струму, тому кабелі менші	Оптимізація структури підстанцій
9	Довговічність, легше обслуговування	Менше тепла та механічних навантажень уповільнює старіння	Зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт

Для України впровадження ВТНП кабелів не лише підвищить надійність та ефективність енергосистеми, але забезпечить стратегію відновлення та модернізації післявоєнних мереж, підготує до інтеграції з європейськими мережами та з інтелектуальними технологіями *Smart Grid*.

## КАБЕЛЬНА ПРОДУКЦІЯ ЯК БУДІВЕЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ

С. Ю. Атріхалов, А. М. Богославець, В. В. Чернова  
ПАТ «Одескабель», Одеса, Україна

З червня 2022 року наша країна є кандидатом на членство у Європейському союзі. В рамках цього Україна наближається до виконання норм та правил що виконуються у ЄС. Однією з цих норм є регламент «Regulation (EU) № 305/2011 Construction products (CPD/CPR)» [1].

Європейський ринок є досить великим та привабливим для українських виробників будівельної продукції. Але для її допуску і вільного переміщення на ринку ЄС, необхідно пройти сертифікацію і підтвердити відповідність Регламенту ЄС 305/2011. Цей регламент набув чинності 09 березня 2011 року та встановлює гармонізовані вимоги щодо випуску і збуту будівельної продукції. Дія регламенту поширюється на всю будівельну продукцію і матеріали, вироблені або розміщені на ринку для використання в будівництві. Виконання вищезазначених вимог забезпечується через введення гармонізованих стандартів, що публікуються в Офіційному журналі Європейського Союзу «Official Journal of the European Union». Єврокомісія публікує будь-які оновлення цього списку стандартів.

В Україні 02 вересня 2020 року Верховною Радою прийнято Закон України № 850-IX «Про надання будівельної продукції на ринку». Цей Закон є технічним регламентом і визначає правові та організаційні засади введення в обіг або надання будівельної продукції на ринку шляхом встановлення правил для вираження показників, пов'язаних із суттєвими експлуатаційними характеристиками такої продукції зі встановленням до неї знака відповідності технічним регламентам.

Відповідно до статті 17, для цілей застосування цього Закону розробляються та приймаються національні стандарти, що є ідентичними відповідним гармонізованим європейським стандартам. Перелік таких стандартів затверджено Міністерством розвитку громад, територій та інфраструктури України від 19 серпня 2024 року № 879.

Так, за номером 531 цього переліку вказано стандарт на кабельну продукцію ДСТУ EN 50575 «Кабелі силові, контрольні та зв'язку. Кабелі для загального використання в будівельних спорудах згідно з вимогами щодо реакції на вогонь» [2]. Стандарт є чинним в Україні та прийнято методом перекладу. Через вимоги стандарту ДСТУ EN 50575, також як і в Євросоюзі, додано посилання на ряд інших стандартів, що пов'язані з тематикою пожежної безпеки та прийняті в Україні методом перекладу або підтвердження (тобто без національних відхилень та правок).

Проведені аналітичні дослідження стандартів доводять, що із введенням в дію Закону України № 850-IX, кількість пожежних показників для кабелів, як категорії будівельної продукції, значно збільшується.

Для досягнення певних значень за деякими показниками потрібно підбирати матеріали, що викори-

стовуються для виробництва кожного конструктивного елемента кабелю. Пожежна безпека кабелів визначається застосованими кабельними композиціями та суттєво залежить від конструктивного виконання кабелів. Відповідно до ефективності розповсюдження вогню та тепловиділення визначено 7 класів кабелів: Аса, В1са, В2са, Сса, Дса, Еса, Fса [3].

Актуальною є проблема визначення впливу застосованих матеріалів на пожежні показники кабелів за результатами випробувань.

Незважаючи на складність питання на ПАТ Одескабель проведено широкий комплекс експериментальних досліджень матеріалів щодо підтвердження відповідності розроблених конструкцій кабелів регламенту ЄС «Regulation (EU) № 305/2011 Construction products (CPD/CPR)» і Закону України № 850-IX «Про надання будівельної продукції на ринку».

Так, в межах вимог стандарту EN 50575 [2] отримано науково-обґрунтовані позитивні результати на конструкціях кабелів локальних обчислювальних мереж (LAN) різних категорій, що відрізняються конструктивним виконанням:

- кабелі класу Еса (виконання кабелів U/UTP; F/UTP; F/FTP; S/FTP -cat.5E(6)(6A) (7)(7A));
- кабелі класу Дса (виконання кабелів U/UTP; F/UTP; F/FTP; S/FTP -cat.5E(6)(6A) (7)(7A));
- кабелі класу Сса (виконання кабелів S/FTP-cat.6A(7)(7A));
- кабелі класу В2са (виконання кабелів F/UTP-cat.5E; U/UTP-cat.6; U/FTP-cat.6A).

У 2024-2025 роках в Єдиній державній електронній системі у сфері будівництва зареєстровані конструкції LAN кабелів класу:

- Fса (виконання кабелів U/UTP-cat.3(5)(5E)(6)(6A); F/UTP-cat.3(5)(5E) (6)(6A); U/UTP-cat.5E patch; SF/UTP-cat.5E(6); U/FTP-cat.6A; F/FTP-cat.6A(7) (7A); S/FTP-cat.6A(7)(7A));
- Еса (виконання кабелів U/UTP-cat.3(5)(5E)(6); F/UTP-cat.3(5)(5E)(6); U/UTP-cat.5E patch).

## Список літератури

- [1] Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC (Text with EEA relevance) (consolidated text).
- [2] ДСТУ EN 50575: 2018 (EN 50575:2014+A1: 2016, IDT) Кабелі силові, контрольні та зв'язку. Кабелі для загального використання в будівельних спорудах згідно з вимогами щодо реакції на вогонь
- [3] ДСТУ EN 13501-6:2019 Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 6. Класифікація за результатами випробування щодо реакції на вогонь кабелів силових, контрольних та зв'язку (EN 13501-6:2018, IDT).

## ПІДВОДНІ КАМЕНІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО ЕКРАНУ ДЛЯ ЗПЕ КАБЕЛІВ

Т. Ю. Антоненко, Р. В. Білянін  
ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», Харків, Україна

Останнім часом з'являються проекти кабельних ліній, у яких закладено кабелі з алюмінієвим екраном. Затвердження та реалізація таких проектів відбувається з низки причин. Насамперед, це, звичайно, у зв'язку зі зменшенням вартості проекту. Ціна кабелю з алюмінієвим екраном відносно нижча, що робить його економічно більш привабливим для споживачів. а

Але головною причиною, через яку споживач погоджується на кабель з алюмінієвим екраном, є нестача знань та нерозуміння можливих катастрофічних наслідків. Щоб застерегти проектні інститути від неправильних технічних рішень, а експлуатуючі компанії від додаткових фінансових затрат, нижче розглянуто особливості та основні недоліки кабелів з алюмінієвим екраном.

1. Металевий екран окрім вирівнювання електричного поля в ізоляції виконує ще одну дуже важливу функцію – це відведення струмів короткого замикання (КЗ) [1]. Для цього екран кабелю повинен мати певну термічну стійкість, яка залежить від електrofізичних властивостей матеріалу екрану.

Електричний опір алюмінію на 60 % вищий, а теплопровідність майже вдвічі гірша, ніж у міді! Це означає, що під дією струмів КЗ, які можуть сягати кількох тисяч Ампер, алюмінієвий екран не зможе витримати такий тепловий удар, який витримує мідний екран [2]. Тому при першому аварійному режимі алюмінієвий екран може розплавитися, а кабель вийти з ладу.

2. Алюмінієві дроти є досить схильними до зламів, що часто стає проблемою при монтажі муфт. Так, щоб вивести екран із транспозиційної муфти, дроти екрану, що зібрані в пучок, необхідно згинати кілька разів. Такі маніпуляції призводять до того, що деякі із дротів відламуються, і ділянка від муфти до транспозиційної коробки або заземлювального пристрою виходить із зменшеним перерізом екрану!

Це одна особливість алюмінію – це його повзучість, схильність деформуватися з часом від прикладеного механічного навантаження (саме тому у випадку з алюмінієвою проводкою з часом доводиться постійно підкручувати притискні болти на клемниках). Через повзучість алюмінію відбувається збільшення перехідного опору на місці з'єднання і, як наслідок, відгоряння контакту.

3. Алюміній схильний до окислення та електrolізних процесів. Саме через корозію алюмінію нормативні документи забороняють прокладання кабелів з алюмінієвою оболонкою в агресивних грунтах та вологій місцевості [3, 4].

В процесі роботи кабелю алюмінієвий екран неминуче руйнуватиметься. Порушення цілісності контуру екрана зрештою призведе до електричного пробоя кабелю.

4. Не слід також забувати, що алюміній утворює з міддю гальванічну пару. Тому алюмінієвий

екран, з'єднаний через наконечник з мідною шиною, з часом відгоряє внаслідок електрохімічної корозії.

Зарубіжний досвід застосування кабелів з алюмінієвими екранами також підтверджує сказане вище. Наприклад, на одній з кабельних ліній на напругу 110 кВ, вже за рік роботи відбулося відгоряння двох фаз у коробці заземлення на перехідній опорі повітряної лінії.

Екран третьої фази залишався заземленим. Наведений у ньому струм потрапляв на корпус коробки і йшов у заземлювальний контур опори. Через погане заземлення корпусу коробки, пов'язаного з її фарбуванням, струм йшов у опору через дугу. Цей режим існував довгі місяці, створюючи загрозу як для людей (крокова напруга), так і для обладнання (корозія опори та фундаменту повітряної лінії). Ще один випадок пошкодження кабелю 10 кВ стався в одній із ліній розподіленої мережі. Через недостатню термічну стійкість алюмінієвого екрану під час короткого замикання відбувся надмірний перегрів і вплавлення дротів екрану в ізоляцію, тобто фактично пошкодження кабелю. Внаслідок цього довелося міняти одну будівельну довжину кабелю.

### Висновки.

Під час будівництва нових кабельних ліній проектні компанії часто нехтують тими технічними аспектами, які пов'язані з надійністю та безпекою роботи лінії. Всі ризики та відповідальність за нормальну роботу кабелю протягом усього терміну служби лягають на плечі організацій, які експлуатують кабельні лінії. Аварії у таких лініях можуть коштувати дуже дорого. Тому дуже важливо, щоб фахівці знали про можливі наслідки застосування того чи іншого виду продукції.

### Список літератури

- [1] МЭК 60949-2009 Розрахунок термічно допустимих струмів короткого замикання з урахуванням неадиабатичного нагріву.
- [2] МЭК 60986-2009 Граничні температури електричних кабелів на напругу від 6 до 30 кВ за умов короткого замикання.
- [3] СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (у редакції наказу від 26.01.2017 № 82).
- [4] СОУ МЕВ ЕЕ 40.1-00100227-02:2016. Стандарт операційної безпеки функціонування Об'єднаної енергетичної системи України. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Частина 2. Технічна політика у сфері побудови та експлуатації розподільних електричних мереж.

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ДЕФЕКТИ У ТЕРМОРЕАКТИВНІЙ ВИСОКОВОЛЬТНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА ТЕХНІКА ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

Г. В. Безпрозванних<sup>1</sup>, Є. С. Москвітін<sup>1</sup>, В. О. Рогинський<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУ «ХП», Харків, Україна,

<sup>2</sup>АТ «Українські електричні машини», Харків, Україна

Електрична ізоляція, як пасивний компонент, відіграє важливу роль в підвищенні вихідної потужності та терміну експлуатації електричних машин [1]. Так, епоксидна смола з наповненням обробленими наночастинками діоксиду кремнію дозволяє підвищити строк експлуатації високовольтних електричних машин з термоактивною ізоляцією, виготовленою методом вакуумно-нагнітального просочення [2]. Застосування плаского скло-волокнистого підкладкового матеріалу з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру призводить до зменшення товщини слюдяної стрічки на 15% та підвищенню електричної міцності високовольтної термоактивної композитної ізоляції на (8-16)% [3].

Налаштування технологічного процесу просочення під вакуумним тиском повинно забезпечувати найменшу кількість газових порожнин, вологи, розшарувань та інших дефектів з глибоким проникненням компаунду в композитну тверду ізоляцію для забезпечення високої електричної міцності гетерогенної високовольтної електроізоляційної системи [3].

Ефективне виявлення дефектів на технологічній стадії виготовлення високовольтних електричних машин з термоактивною ізоляцією є важливим для запобігання та мінімізації наслідків відмов стратегічних електричних машин. Техніка виявлення технологічних дефектів базується, зокрема, на електричних випробуваннях при прикладенні високої напруги промислової частоти [3]. До випробувань відносяться вимірювання: опору ізоляції [3] та параметрів діелектричної абсорбції – індексу поглинання (швидкості діелектричної абсорбції – DAR) та індексу поляризації (PI) [4], тангенсу кута діелектричних втрат та амплітуди імпульсів часткових розрядів [3].

Сучасний метод вимірювання відновлюваної напруги (рис.1) з високою точністю дозволяє проводити оцінку стану високовольтної ізоляції [5], у тому числі і її зволоження [5-6]. Об'єкт контролю заряджається постійною напругою  $U_z$  до 1 кВ тривалістю від 1 до 15 хв. Потім відбувається короткочасний розряд тривалістю 2 с з наступним періодом спостереження амплітуди  $U_{rec}$  напруги відновлюваної напруги тривалістю до 30 хв. Так, для силових кабелів отримано інтегральні показники з визначенням значень граничного технічного стану паперової просоченої ізоляції [5]. Нормоване значення амплітуди  $U_{rec}/U_z$  – відношення напруги  $U_{rec}$ , що відновлюється, до зарядної  $U_z$ , характеризує неоднорідність ізоляції: максимальне значення цього параметру – критеріальне для оцінки стану електричної ізоляції [5].

На рис. 1 в рівномірному (рис. 1, а) та в напівлогарифмічному (рис. 1, б) масштабах представлено експериментальні часові залежності нормованого значення амплітуди відновлюваної напруги термоактивної електроізоляційної системи статорів двох трифазних асинхронних двигунів напруги 6 кВ.

Діапазон змінення амплітудних значень в часі кривих 1, 2 та 3 для першого двигуна і 4, 5 та 6 для другого двигуна надає уявлення про налаштування технологічного процесу просочення та запікання корпусної ізоляції електричних машин. Для першого двигуна максимальне значення параметру  $U_{rec}/U_z$  для всіх трьох обмоток не перевищує 0,1. Характер часових залежностей  $U_{rec}/U_z(\tau)$  відтворює один одне. Для другого спостерігається суттєвий розкид значення параметру  $U_{rec}/U_z$  для всіх трьох обмоток: від 0,09 до 0,14 з суттєвим спотворенням характеру часових залежностей (криві 4, 5 та 6 рис.1). Це є опосередкованим свідченням технологічних дефектів у вигляді розшарування корпусної ізоляції обмоток 5 та 6 з одночасним зволоженням обмоток 6 та 4.

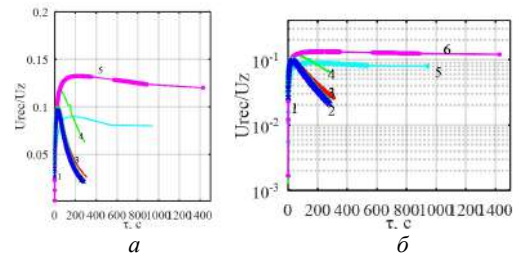


Рис.1. Криві відновлюваної напруги корпусної ізоляції статорів асинхронних двигунів

Цей експериментальний аналіз з відповідною технічною реалізацією методу відновлюваної напруги може бути представлено як нова системна платформа для виявлення технологічних дефектів в термоактивній ізоляції високовольтних електричних машин.

### Список літератури

- [1] Palka R., Wardach M. Design and Application of Electrical Machines. *Energies*, 2022, vol. 15, p. 523. <https://doi.org/10.3390/en15020523>.
- [2] Gröpper P., Hildinger T., Pohlmann F., Weidner J.R. Nanotechnology in high voltage insulation systems for large electrical machinery - First results. Conference: CIGRE, 2012. 16 p. <https://www.researchgate.net/publication/307918654>.
- [3] Безпрозванних Г.В., Рогинський О.В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. - Монографія, Харків, 2023, 138 с.
- [4] IEEE Standard, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. 43-2000. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.91301>
- [5] Безпрозванних Г.В. Фізична інтерпретація кривих відновлюваної напруги на основі схем заміщення неоднорідних діелектриків. *Технічна електродинаміка*, 2009, № 6, С. 23-27.
- [6] Безпрозванних Г.В., Костюков І.О., Москвітін Є.С. Розділення абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції за кривими відновлюваної напруги силових високовольтних кабелів. *Технічна електродинаміка*, 2021, №6, с. 13-19. <https://doi.org/10.15407/techned2021.06.013>

## МОНІТОРИНГ ЗВОЛОЖЕНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ОЛИВИ МЕТОДАМИ ЧАСТОТНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ТА РЕФРАКТОМЕТРІЇ

Г. В. Безпрозваних, В. І. Мошенський, Д. О. Сіятовський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Детальний аналіз впливу режимів відмови та критичності силових трансформаторів доводить, що пошкодження ізоляції є значною причиною їх відмови [1]. При цьому 75% відмов виникають через деградацію трансформаторної оливи, яка виконує функції охолодження, гасіння дуги та електричної ізоляції. Трансформаторна олива, як і будь-який діелектрик, діє як носій інформації, надаючи діагностичну інформацію як про свій стан, так і технічний стан трансформатора у цілому.

Техніка діелектричної спектроскопії в частотній області розглядається як перспективний інструментарій для виявлення вологи у силових трансформаторах [2] – [3] та широко використовується для виявлення, наприклад, водяних тріантів в твердій полімерній ізоляції силових кабелів, зволоженості композитної терморезистивної ізоляції електричних машин [4].

Зволоження діелектрика, так само як і інші чинники, призводить до змінення діелектричного відклику в частотній області, тобто до змінення комплексної діелектричної проникності  $\varepsilon^*$  від циклічної частоти  $\omega=2\pi f$  [5]:

$$\varepsilon \cdot (\omega) = \varepsilon' \cdot (\omega) - j\varepsilon'' \cdot (\omega), \quad \operatorname{tg}\delta = (\gamma + \omega\varepsilon''\varepsilon_0) / \omega\varepsilon'\varepsilon_0, \quad (1)$$

де:  $\varepsilon'$  – дійсна частина комплексної діелектричної проникності (визначає електричну ємність діелектрика);  $\varepsilon''$  – уявна частина (визначає втрати електричної енергії в діелектрику);  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала;  $\gamma$  – питома провідність діелектрика, См/м;  $\operatorname{tg}\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат (визначає втрати на електропровідність та поляризацію).

У неполярних рідинах, до яких відноситься трансформаторна олива, електропровідність обумовлена наявністю дисоційованих домішок, особливо вологи. Питома провідність та вміст вологи у високоякісній трансформаторній оливі не перевищують 3 пСм/м та 2,2% відповідно [3].

Сучасні цифрові прилади дозволяють вимірювати електричну ємність,  $\operatorname{tg}\delta$  у широкому діапазоні частоти в області слабких електричних полів для зменшення нелінійного відгуку на діелектричні параметри з виявленням вологи за отриманими результатами.

На рис.1 представлено експериментальні залежності електричної ємності  $C$  (рис. 1,а),  $\operatorname{tg}\delta$  (рис. 1,б) та визначених значень діелектричної проникності (рис. 1,в) за результатами вимірювань  $C$  та відомих геометричних розмірів циліндричних електродів вимірювальної комірки з досліджуваними рідкими діелектриками. Крива 1 відповідає зволоженій рідині, крива 2 – з меншим вмістом вологи. Значення діелектричної проникності для частоти 100 Гц надає підстави оцінити перевищення вмісту вологи у зразку 1 відповідно до теорії поляризації Максвелла-Вагнера: у зразку 1 на 26% більше, ніж у зразку 2.

Вода, як сильно полярний діелектрик, обумовлює нелінійну залежність  $C$  та  $\varepsilon'$  в діапазоні проведених вимірювань з проявом характерного дипольно-

го максимуму  $\operatorname{tg}\delta$  в діапазоні частоти 500 кГц (рис.1,б). Точками на кривих 1 та 2 рис. 1,а,б показані експериментальні значення. Суцільні криві для  $\operatorname{tg}\delta$  відповідають апроксимації поліномом 2-о ступеню. Зменшення діелектричних втрат в діапазоні частоти від 100 Гц до 100 кГц обумовлено процесами електропровідності в трансформаторній оливі. Для зволоженого зразка (крива 1, рис.1,б) відмічаються більші значення  $\operatorname{tg}\delta$ , що пов'язано з більшим вмістом води.

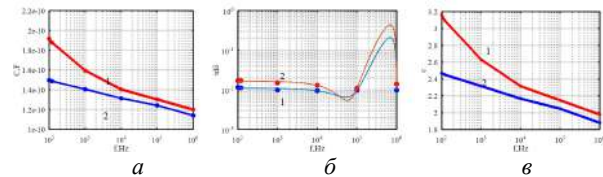


Рис.1 Динаміка змінення діелектричних параметрів трансформаторної оливи у широкому діапазоні частоти

Додатково проведено дослідження визначення показника заломлення трансформаторної оливи рефрактометричним методом за допомогою рефрактометра [5]. Вимірювання виконано у білому прохідному світлі. Значення показників заломлення становлять 1,452 та 1,512 для зразків 2 та 1 відповідно. Показник заломлення трансформаторної оливи не повинен перевищувати значення 1,505, для конденсаторного – 1,479. Отримані результати у оптичному діапазоні підтверджують зволоженість трансформаторної оливи зразка 1.

Таким чином, діелектрична спектроскопія у широкому діапазоні частоти (від звукового до оптичного) є ефективним інструментарієм виявлення вологи у трансформаторній оливі.

### Список літератури

- [1] Beheshti Asl M., Fofana I., Meghnefi F. Review of Various Sensor Technologies in Monitoring the Condition of Power Transformers. *Energies*, 2024, issue 17(14), p. 3533. doi: <https://doi.org/10.3390/en17143533>
- [2] Raetzke S., Koch M., Krueger M., Talib A. Condition assessment of instrument transformers using dielectric response analysis. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/s00502-012-0112-2>
- [3] Gutten M., Korenciak D., Konarik R., Kanuch J. Comparative Analysis of Distribution Transformers with Varying Ratings and Insulation States via Frequency Domain Spectroscopy and Capacitance Ratio. *Applied Sciences*, 2025, issue 15(9), p. 4715. doi: <https://doi.org/10.3390/app15094715>
- [4] Безпрозваних Г.В., Рогинський О.В. Конструктивно-технологічні рішення підвищення електричних характеристик високовольтної композитної електроізоляційної системи електричних машин. Монографія, 2023, Харків, 192 с.
- [5] Безпрозваних Г.В., Кессаев О.Г., Москвітін Є.С. *Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика діелектриків» для студентів денної та заочної форми навчання*. Харків: НТУ «ХПІ». – 2024. – 100 с.

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

І. В. Бойко, О. Г. Кессаєв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Надійність систем електропостачання значною мірою визначається технічним станом високовольтних кабельних ліній. Одним з основних чинників деградації поліетиленової ізоляції є розвиток часткових розрядів (ЧР), які з часом призводять до часткової. Сучасні системи діагностики дозволяють виявляти наявність ЧР, однак обмежуються лише констатацією факту дефекту. Це не забезпечує можливості своєчасного планування ремонтів та модернізацій. Тому актуальним є завдання прогнозування технічного стану кабельних ліній за параметрами ЧР [1], [3].

Метою роботи є розробка методики прогнозування залишкового ресурсу кабельних ліній на основі комплексного аналізу параметрів часткових розрядів.

Для прогнозування технічного стану ізоляції кабельних ліній здійснювався збір параметрів ЧР у процесі випробувань та моніторингу (рис. 1).

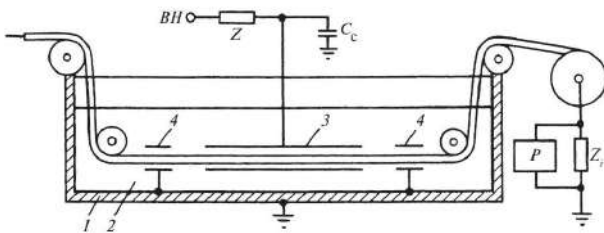


Рис. 1 - Схема вимірювання ЧР у кабелі:

1 – металева ванна, 2 – вода (очищена від іонів за допомогою іонообмінних смол); 3 – електрод (з підведеною високою напругою), 4 – заземлені електроди

Жилу кабелю під'єднано до заземлення через вимірювальний опір  $Z_i$ . Через високу діелектричну проникність води практично вся прикладена напруга припадає на кабельну ізоляцію. Оскільки між ізоляцією та електродом 3 відсутні газові включення, часткові розряди можуть виникати лише всередині кабелю. Протягування відрізка кабелю будівельної довжини крізь таку ванну дає змогу визначити місце появи ЧР.

Основними параметрами, що враховувалися, були: амплітуда, заряд імпульсу, частота повторення імпульсів, напруга початку (PDIV) та напруга затування (PDEV) ЧР [1], [4].

Видимий заряд імпульсу визначався інтегруванням струму:

$$q = \int i(t) \cdot dt, \quad (1)$$

де:  $q$  – заряд імпульсу, Кл;  $i(t)$  – миттєве значення струму ЧР, А.

На основі цих параметрів будувалися трендові характеристики та статистичні залежності, що відображають динаміку старіння ізоляції. Для прикладу, залежність між середнім рівнем заряду ЧР та ймовірністю відмови може бути апроксимована експоненційною функцією:

$$P_f(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot q(t)}, \quad (2)$$

де:  $P_f(t)$  – ймовірність відмови ізоляції у момент часу  $t$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт, що залежить від типу дефекту та умов експлуатації [2], [5].

Таблиця 1 – Порівняння традиційної діагностики та прогнозного підходу

Критерій	Традиційна діагностика	Прогнозування за ЧР
Виявлення дефектів	Так	Так
Локалізація пошкоджень	Частково	Так
Оцінка ризику відмови	Обмежена	Розширена
Планування ремонтів	Реактивне	Превентивне
Прогноз залишкового ресурсу	Немає	Є

Дослідження показали, що тренд-аналіз заряду ЧР та частоти їх появи дозволяє виявити ранні стадії деградації ізоляції, що є недоступним для традиційних методів [2], [3]. Встановлено, що використання комплексного підходу з урахуванням PDIV/PDEV дає можливість розраховувати прогнозований строк досягнення критичних рівнів ЧР, а також визначати залишковий ресурс кабельної лінії.

Прогнозування технічного стану кабельних ліній за параметрами часткових розрядів є перспективним напрямом розвитку діагностичних технологій. Запропонована методика дозволяє перейти від реактивного до превентивного технічного обслуговування, знизити ризик аварійних відмов і підвищити ефективність експлуатації енергетичних мереж.

### Список літератури

- [1] ДСТУ EN 60270:2016 Методи високовольтних випробувань. Вимірювання часткових розрядів (EN 60270:2001/A1:2016, IDT; IEC 60270:2000/A1:2015, IDT). Зміна № 1:2022
- [2] Кессаєв О. Г. Водяні триєтри в силових кабелях при дії сильного електричного поля та техніка їх виявлення [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.13 / Олександр Геннадійович Кессаєв ; [наук. керівник Безпрозванних Г. В.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2017. – 22 с. – Бібліогр.: с. 16-18. – укр
- [3] Ray Bartnikas. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement / Ray Bartnikas. IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation 9.5 (2002), pp. 763–808.
- [4] IEC 60060-2:2010 High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems. – Geneva: IEC, 2010.
- [5] IEEE Std 400.3-2006: IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems. – IEEE Standards, 2006.

## ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ В КОНТЕКСТІ ІНДУСТРІЇ 4.0: ТЕНДЕНЦІЇ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Ю. Г. Гонтар, О. Г. Кессаєв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Швидка глобалізація диктує урядам країн формування нових стратегій розвитку, які повинні включати впровадження Індустрії 4.0. Зміни в Україні сприяють швидкому впровадженню цифрових технологій, штучного інтелекту та Smart-рішень у повсякденне життя. Наразі триває епоха 4-ї промислової революції, в яку вступив увесь світ. Це тенденція, що базується на автоматизованому та технологічному підході. Індустрія 4.0 відкриває можливості для інтеграції інтелектуальних систем, автоматизації та штучного інтелекту у розробку та використання матеріалів нового покоління.

Водночас виникають виклики, які змушують переглянути традиційні підходи до вибору, виробництва та утилізації електротехнічних матеріалів:

- дефіцит певних матеріалів;
- проблеми екологічної безпеки;
- утилізація та переробка електронних відходів

(утилізація електротехнічних відходів може призвести до викиду шкідливих хімічних речовин у навколишнє середовище). Це створює потребу в матеріалах, які легко переробляються та біорозкладаються.

Серед перспективних рішень – заміна гексафториду сірки (SF<sub>6</sub>), одного з найпотужніших парникових газів, новими діелектриками. Зокрема, газові суміші на основі Novac 4710 і CO<sub>2</sub> («g<sup>3</sup>») демонструють високу ефективність і низьку токсичність.

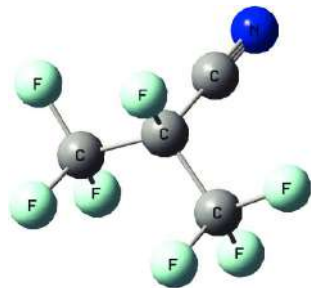


Рис. 1. Газ Novac 4710, що складається з ізо-C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN

Важливу роль відіграють також смарт матеріали: п'єзоелектрики для енергоавтономних сенсорів; наноматеріали; магнітострикційні матеріали для виконавчих механізмів; сплави з пам'яттю форми (SMA) для адаптивних конструкцій; волоконно-оптичні сенсори для точного моніторингу (рис. 2).



Рис. 2. Волоконно-оптичний датчик тиску

Індустрія 4.0 створює нові інструменти для її розвитку. Використання штучного інтелекту та цифрового моделювання дає можливість прогнозувати поведінку матеріалів, оптимізувати полімерні суміші та скорочувати витрати на експерименти. Технологія «цифрових двійників» дозволяє відтворювати властивості матеріалів у віртуальному середовищі та виявляти дефекти ще до виготовлення прототипів.

Таким чином, розвиток електротехнічних матеріалів у добу Індустрії 4.0 базується на поєднанні екологічності, інтелектуальних властивостей і цифрових технологій. Це визначає не лише нові наукові та промислові тренди, а й потребу модернізації освітніх програм.

Модернізація дисципліни «Електротехнічні матеріали» в контексті Індустрії 4.0 є актуальним кроком у підготовці фахівців, здатних вирішувати проблеми сталого розвитку, енергоефективності та цифровізації електроенергетики і має базуватися на таких ключових принципах:

- інтеграція міждисциплінарних знань;
- орієнтація на практичну значущість;
- вивчення інноваційних рішень;
- цифровізація навчальних процесів;
- формування критичного мислення та інженерної відповідальності;
- сприяння енергетичній безпеці.

Такий стратегічний підхід сприятиме підготовці спеціалістів, здатних не лише ефективно працювати в умовах Індустрії 4.0, а й активно впливати на розвиток енергетичної незалежності та сталого розвитку країн.

### Список літератури

- [1] Yannick Kieffel, Todd Irwin, Philippe Ponchon, and John Owens. Green Gas to Replace SF<sub>6</sub> in Electrical Grids / Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7450928>
- [2] Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky: Trends in globally-averaged CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and SF<sub>6</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-05, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- [3] L. Loizou, L. Chen, Q. Liu and M. Waldron, "Lightning impulse breakdown characteristics of SF<sub>6</sub> and 20% C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN / 80% CO<sub>2</sub> mixture under weakly non-uniform electric fields," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 3, pp. 848-856, June 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008762.
- [4] Jean-Ruel, Hubert, and Jacques Albert. "Recent Advances and Current Trends in Optical Fiber Biosensors Based on Tilted Fiber Bragg Gratings." *TrAC, Trends in analytical chemistry (Regular ed.)* 174 (2024): 117663-. Web.
- [5] G. V. Bezprozvannyh, V. M. Zolotaryov and Y. A. Antonets, "High Voltage Cable Systems with Integrated Optical Fiber for Monitoring Cable Lines," *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 407-410, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250174.

## ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ З ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

М. В. Гринишина  
ІНТЕРКАБЕЛЬ КИЇВ, Київ, Україна

Стан і функціонування розподільних електричних мереж безпосередньо впливає на показники ефективності роботи енергетичної системи України [1]. Силові кабелі середньої напруги є одним із важливих компонентів та відіграють вирішальну роль у забезпеченні функціональності електроенергетичної системи. Сфери застосування кабелів можна розділити на сфери забезпечення, зберігання, розподілу та використання електричної енергії [1].

Очікується, що обсяг ринку кабелів середньої напруги зросте до 109,58 мільярда доларів США у 2027 році при середньорічному темпі зростання 27,9%. Ринок має потужний потенціал зростання завдяки збільшенню попиту на розподільні мережі через збільшення потужності для відновлюваної енергії. Це стимулює випуск кабелів середньої напруги. Збільшення інвестицій у інтелектуальну модернізацію і інфраструктуру систем передачі та розподілу електроенергії і розвитку розумних мереж також сприятиме зростанню ринку силових кабелів середньої напруги. Попит на мобільні телефони та ноутбуки призвів до зростання провідних зарядних пристроїв, які є головним руйнівним фактором для ринку. Зарядка електромобілів від мережі та впровадження теплових насосів збільшать попит на електроенергію та потребу в покращенні інфраструктури розподілу, що сприятиме зростанню сегмента силових кабелів напруги (15-30) кВ.

Швидке розширення і проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) підкреслює необхідність модернізації розподільних мереж [2]. Крім того, оскільки потужність ВДЕ, таких як фотоелектричні установки, продовжує зростати, занепокоєння щодо якості мережі стає все більш актуальним. Такі проблеми, як гармоніки та порушення напруги, заслуговують особливої уваги в цьому контексті і можуть негативно вплинути на силові кабелі. Дослідження показали, що спотворені піки напруги, пов'язані з гармоніками, можуть значно скоротити термін служби ізоляції кабелів зі зшитого поліетилену та поліпропілену [3]. Європейські виробники силових кабелів середньої напруги при розробці та виготовленні закладають не тільки номінальну фазну і лінійну напругу, а і більше значення напруги з урахуванням експлуатації в електричних мережах [4].

Кабелі середньої напруги працюють, як правило, при змінному струмі частоти 50 Гц. У зв'язку із розвитком мереж для зарядки електромобілів та фотоелектричних станцій існує нагальна проблема у розробці кабелів постійного струму [5].

Силові кабелі постійного струму високої та надвисокої напруги з ізоляцією на основі терморезистивної зшитої поліетиленової ізоляції та сучасних високоефективних термопластичних полімерних композицій на основі поліпропілену випускаються європейськими виробниками [4] та експлуатуються у Європі. Втрати електричної енергії у кабелях постійного струму суттєво менші за причини відсутності скін-

ефекту та ефекту близькості, пов'язаних з нерівномірністю розподілу струму в струмопровідній жилі при роботі кабелів на частоті 50 Гц. Системи постійного струму реалізовано у високовольтній передачі постійного струму для електрифікації залізниці.

Системи постійного струму низької напруги можна знайти в деяких громадських і промислових програмах, включаючи власні джерела живлення постійного струму та навантаження (центри обробки даних, освітлення, електроприводи, зарядка електромобілів тощо) та широко досліджено.

Системи постійного струму середньої напруги досліджено та реалізовано в деяких пілотних проєктах. Можна вважати, що ці на даний момент незалежні системи будуть зрештою з'єднані для формування мережі середньої напруги. Ключовою базовою технологією для такої мережі є трансформатор стану струму постійного струму. Менший і легший за звичайний такий трансформатор забезпечує повний контроль потужності, відключає струми пошкодження.

Удосконалення кабельної продукції в даний час здійснюється в основному завдяки використанню нових електроізоляційних матеріалів, які надають можливості створювати і виробляти силові кабелі, що відповідають сучасним вимогам за пожежною стійкістю, нормам на виділення при горінні, диму, токсичних та корозійнеактивних речовин, стійкості до утворення водяних трингів. Технологічні інновації формують збільшення струмового навантаження кабелів середньої напруги, що потребує застосування полімерної ізоляції з більш високою довготривалою робочою температурою. Проведений аналіз доводить важливість застосування сучасних кабельних композицій з нанорозмірними домішками для поліпшення електричних та теплових характеристик силових кабелів середньої напруги.

### Список літератури

- [1] Про схвалення Концепції впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року. Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 14 жовтня 2022 р. № 908-р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-p#Text>
- [2] Renewables 2023. Analysis and forecasts to 2028. Publications International Energy Agency. IEA: Paris, France, 2024, 143 p.
- [3] Pereira J.L.M., Leal A.F.R., Almeida G.O.d., Tostes M.E.d.L. Harmonic Effects Due to the High Penetration of Photovoltaic Generation into a Distribution System. *Energies*. 2021, vol. 14, pp. 4021. doi: <https://doi.org/10.3390/en14134021>
- [4] 6-36kV Medium Voltage Underground Power Cables XLPE insulated cables. Режим доступу до ресурсу: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2016/12/Nexans-6-33kV-Medium-High-Voltage-Underground-Power-Cables.pdf>
- [5] Tasnim M.N., Akter S., Shahjalal M., Shams T., Davari P., Iqbal A. A critical review of the effect of light duty electric vehicle charging on the power grid. *Energy Reports*. 2023, vol. 10, pp. 4126-4147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.075>



## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ АБСОРБЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОСЦИЛОГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ

І. О. Костюков

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Значення електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) ізоляції широко використовуються в практиці діелектричної спектроскопії з метою діагностики технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання а також дослідження процесів електропровідності та поляризації в діелектричних матеріалах [1–3]. При застосуванні методів діелектричної спектроскопії в частотній області в переважній більшості випадків частотний діапазон вимірювань не обмежується лише промисловою частотою прикладеної напруги. Так, в практиці контролю технічного стану силових кабелів зі зшитого поліетиленовою ізоляцією часто використовуються результати вимірювань  $\text{tg}\delta$  в діапазоні частот від  $10^{-2}$  Гц до 10 Гц [4]. Зазначена особливість методів діелектричної спектроскопії в частотній області визначає актуальність проблеми адекватного вибору апаратного забезпечення, що використовується для вимірювань електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ .

Актуальність зазначеної проблеми пов'язана з тим, що переважна більшість сучасних цифрових вимірювачів імітансу дозволяє проводити вимірювання лише за обмеженої кількості частот прикладеної до діелектрика тестової напруги. Це, в свою чергу, дає можливість проводити вимірювання діагностичних параметрів лише за обмеженої роздільної здатності по частоті. При цьому, в переважній більшості випадків, вимірювання в необхідному частотному діапазоні є неможливими. Один із шляхів вирішення вказаної задачі полягає у застосуванні осцилографічних методів в практиці вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  ізоляції електротехнічного обладнання. В такому випадку результати вимірювань отримують шляхом відповідної обробки попередньо зареєстрованих сигналів струму через досліджуваний діелектрик та прикладеної до цього діелектрика напруги. Так, вимірювання  $\text{tg}\delta$  можуть бути проведені шляхом використання кореляційного методу вимірювання фазового зсуву, що забезпечує високий рівень завадостійкості для ємнісних об'єктів контролю з високим рівнем добротності. В той же час, застосування осцилографічних методів вимагає розробки схемотехнічних рішень, що дозволяють усунути похибки вимірювань, зумовлені зменшеним вхідним опором осцилографа у порівнянні з імпедансом досліджуваного ємнісного об'єкта контролю в частотному діапазоні від  $10^{-2}$  Гц до 10 Гц.

Метою роботи є розробка схемотехнічних рішень, що дозволяють усунути вплив кінцевого опору осцилографа на результати вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ .

Розроблені схемотехнічні рішення були засновані на застосуванні конфігурації схеми вимірювання

імпедансу, що передбачає використання виконаного на основі резистору перетворювача струму в напругу, включеного послідовно з імпедансом досліджуваного ємнісного об'єкта контролю [5].

Для вибраної конфігурації схеми вимірювання проведено дослідження впливу співвідношення між імпедансом досліджуваного об'єкта контролю та опором перетворювача струму в напругу. Показано, що достатній рівень точності вимірювань електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  може бути досягнуто у випадку, коли квадратурна складова струму через досліджуваний діелектрик не залежить від шунтуючого опору, що зумовлений діелектричними втратами на електропровідність та поляризацію. При цьому, згідно з результатами проведеного моделювання, відсутність зазначеної залежності досягається у випадку, коли імпеданс об'єкта контролю набагато перевищує опір включеного послідовно з об'єктом контролю перетворювача струму в напругу. Усунення впливу кінцевого вхідного опору осцилографа забезпечується за рахунок застосування включених паралельно по відношенню до перетворювача струму в напругу та імпедансу досліджуваного об'єкта контролю повторювачів напруги, виконаних на основі операційних підсилювачів AD711JNZ. Крім того, встановлена доцільність виконання повторювачів на пруги на основі електрометричних підсилювачів із збільшеним вхідним опором.

### Список літератури

- [1] Костюков, І. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Український Метрологічний Журнал* 2021, № 1, 124 – 132.
- [2] Костюков, І., Борисенко, А., Литвиненко, С., Ільчакова, Я. Діагностика ізоляції силових кабелів із застосуванням методів діелектричної спектроскопії: огляд фізичних основ та особливостей практичного застосування. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2024, № 1, 79 – 84.
- [3] Dai, X., Hao, J., Jian, Z., Liao, R., Zheng, X., Zhang Y. High voltage frequency domain spectroscopy analysis of a thermally aged XLPE submarine cable under continuous and cyclic voltage based on carrier transport and polarization characteristics. *High Voltage*, 2022, No. 7, 473 – 482.
- [4] Cheng, X., Ye, G., Sun, H., Li, T., Sun, C. Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model. *AIP Advances*, 2021, No. 11, 085103.
- [5] Ramos, P., Janeiro, F., Tlemkani, M., Serra, C. Recent developments on impedance measurements with DSP-based ellipse-fitting algorithms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, Vol. 58, No. 5, 1680 – 1689.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОКОМПОНЕНТНОГО ПОЛІУРЕТАНОВОГО ГЕРМЕТИКУ

І. А. Мірчук

Приватне акціонерне товариство «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості», Бердянськ, Україна

Нерідко трапляються випадки, коли необхідно виконати ремонт кабелів вже змонтованих на об'єктах. Для цього використовують різні типи електроізоляційних матеріалів, як правило, у вигляді стрічок, якими обмотують пошкоджені ділянки кабелів.

Проте не завжди такий спосіб ремонту може бути оптимальним, наприклад, у випадку можливого впливу на ділянку з ремонтом, в процесі подальшої експлуатації кабелю, специфічних механічних, атмосферних чи хімічних зовнішніх факторів.

В таких випадках необхідне використання для ремонту міцних і зносостійких матеріалів, які б мали високу адгезію до ізоляційних матеріалів кабелю, додатково заповнювали б у ньому внутрішні порожнини і забезпечували подальший надійний монтаж кабелю у спеціальних кріпленнях та кабельних вводах.

Для таких цілей, серед інших матеріалів, можуть використовуватись герметики на основі поліуретану – полімеру, який поєднує високі фізико-механічні властивості, довговічність та зносостійкість. Однак, такі герметики переважно є двокомпонентними і, у вихідному стані, знаходяться у вигляді густої рідини, що значно ускладнює визначення їх властивостей. Тому в загальному доступі, і навіть у виробника, відсутні дані щодо електричних, пожежних чи адгезивних характеристик таких герметиків, базуючись на яких, можна було б оцінити можливість їх використання для ремонту чи з'єднання певних типів кабелів.

Досліджено електричні і фізико-механічні характеристики двокомпонентного поліуретанового герметика марки LOCTITE CR6127 SB15/CR4300.

Враховуючи фізичний стан вихідного об'єкта випробувань – густа рідина у вигляді пасти, і обмежений час до початку полімеризації, розроблено методу підготовки зразків належної якості (постійна товщина по всій площині, гладка поверхня) у вигляді пластин, яка відрізняється від звичайних методів підготовки (вальцевий, вальцево-пресовий чи пресовий методи) стандартних полімерних матеріалів, таких як ПВХ пластикат, поліетилен, гума.

Також визначено адгезивні властивості герметика до найбільш поширених електроізоляційних кабельних матеріалів до і після дії зовнішніх факторів впливу (ЗФВ) впродовж 24 годин кожен – підвищеної температури навколишнього середовища (+45 °C), зниженої температури (-30 °C) і підвищеної вологості (до 98 %) за температури 40 °C.

В таблиці 1 наведені результати випробувань поліуретанового герметика, а також, для порівняння, типові нормовані значення для основних кабельних електроізоляційних матеріалів [1-3].

Таблиця 1. Результати випробувань

Характеристика	Величина параметра				
	CR6127	ПВХ		ПЕ	гума*
		ізоляція	оболонка	ізоляція	ізоляція
Питомий об'ємний електричний опір при 20 °C, Ом·см	$2 \times 10^{12}$	$\geq 10^{13}$	$\geq 10^{10}$	$\geq 10^{16}$	$\geq 10^{14}$
Діелектрична міцність, кВ/мм	23	30	-	35-40	20-25
Міцність при розтягу, МПа	19,5	12,5	12,5	12,5	4,2
Відносне подовження при розриві, %	360	150	150	200	200
Міцність зв'язку герметик/матеріал, кН/м	-	4,3	4,1	3,5	5,2
Міцність зв'язку герметик/матеріал після дЗФВ, відхил, %	-	-15	-10	+5	-12

\* Гумова ізоляція на основі EPDM каучуку

За результатами досліджень розроблено методу виготовлення зразків для випробувань з рідкої двокомпонентної герметизуючої суміші на основі поліуретану, а також визначено її електричні, фізико-механічні і адгезивні характеристики після зшивки.

На основі отриманих даних, підтверджена можливість використання поліуретанового герметика LOCTITE CR6127 SB15/CR4300 для ремонту кабелів низької напруги (до 1,0 кВ).

### Список літератури

- [1] ДСТУ ІЕС 60502-1:2009 Кабелі силові з екструдованою ізоляцією й арматура до них на номінальну напругу від 1 кВ ( $U_m=1,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m=36$  кВ). Частина 1. Кабелі на номінальну напругу 1 кВ ( $U_m=1,2$  кВ) і 3 кВ ( $U_m=3,6$  кВ). 44 с.
- [2] IEC 60227-1. Polyvinyl Chloride Insulated Cable for rated voltages upto 450/750V – Part 1. General requirements. Edition 4.0 2024-02. 14 p.
- [3] ASTM D4363-22 Standard Specification for Thermoplastic Chlorinated Polyethylene (CPE) Jacket for Wire and Cable. 01-May-2022.

## АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ЩОДО ВИПРОБУВАНЬ ІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИГНАЛЬНО-БЛОКУВАЛЬНИХ КАБЕЛІВ

Д. П. Мукосяєв, О. Г. Кессаєв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Сигнально-блокувальні кабелі активно експлуатуються в умовах підвищених механічних навантажень, зокрема у зонах з високою вібраційною активністю, наприклад, на залізницях. Механічна стійкість оболонки кабелю є критичним фактором, що впливає на надійність використання, довговічність кабельної лінії та якість зв'язку. Сучасні сигнально-блокувальні кабелі відповідно до умов експлуатації мають широкий вибір виконання та конфігурацій, що викликає потребу в пошуках нових рішень.

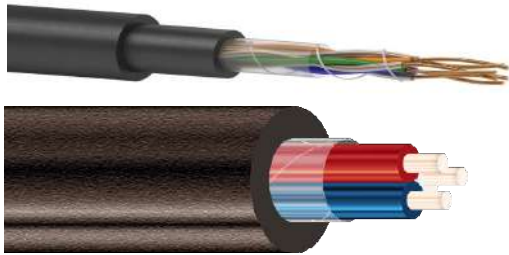


Рис. 1 Варіанти виконання сигнально-блокувальних кабелів різними виробниками

Сьогодні виклики зумовлюють шукати нові ізоляційні композиції на основі давно відомих пластиків з додаванням нових властивостей та усуненням попередніх недоліків. Однак процес пошуку так званої «ідеальної» ізоляції для певних умов використання відбувається з обов'язковими випробуваннями як самого матеріалу, так і у складі вже готової кабельної конструкції. Особливу увагу треба приділити властивостям матеріалів оболонки та ізоляції при дії статичних і динамічних навантажень впливом електричного та магнітного полів, тобто при експлуатації. Сучасні стандарти випробувань, діючі в Україні, показують, що кабельно-провідникова продукція не досліджується під час експлуатації або після неї, оскільки це є руйнівним методом контролю стану оболонки та ізоляції [1].

Сучасний стан документації свідчить про те, що українські нормативи діють згідно українського та європейського законодавства. Проте, оскільки продукція вітчизняних виробників експортується не тільки в країни Європи, має забезпечуватись відповідність і закордонній нормативній документації. Як правило ці документи розробляються організаціями з відповідної практичної та наукової сфери діяльності, а саме: Американська спілка випробування матеріалів (ASTM International), Європейський комітет із стандартизації по електротехніці (CENELEC), Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) тощо [2-5].

Було проаналізовано нормативну документацію, що регламентує вимоги до ізоляційних матеріалів та їх випробувань в Україні та за кордоном. Аналіз дозволив систематизувати стандарти ASTM та ДСТУ EN на методи випробування пластиків в умовах впливу різних факторів за основними властивостями

ПВХ ізоляції. В табл. 1 наведено міжнародні та гармонізовані стандарти, які регламентують вимоги щодо якості ізоляції кабелів з точки зору механічних властивостей [6].

Таблиця 1. Аналіз нормативної документації

Позначення нормативного документу	Зміст
ASTM D638–14	Метод випробування методом розтягу
ASTM D790–15e2	Метод випробування на згин неармованих та армованих пластмас та електроізоляційних матеріалів
ДСТУ EN 60811–505:2014	Метод випробування ізоляції та оболонок за низької температури
ДСТУ EN 60811–504:2014	Метод випробування на згинання ізоляції та оболонок за низької температури
ДСТУ EN 60811–501:2014	Метод випробування на визначення механічних властивостей ізолюючих та оболонкових компаундів

На основі проведеного аналізу нормативної бази України на методи контролю якості електроізоляційних матеріалів електричних кабелів встановлено перелік змін чинних національних стандартів на методи випробування полівілхлоридної ізоляції.

### Список літератури

- [1] Капрушенко В.П. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: підручник / В.П. Капрушенко, Л.А. Щепенюк, Ю.О. Антоненко, О.А. Науменко. – Харків, 2000. – 376 с.
- [2] ASTM International [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.astm.org/> (дата звернення: 21.08.2025).
- [3] CENELEC [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.cenelec.eu/> (дата звернення: 21.08.2025).
- [4] IEC [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.iec.ch/> (дата звернення: 21.08.2025).
- [5] ISO [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iso.org/home.html> (дата звернення: 21.08.2025).
- [6] Сокотун Ж.В. Нормативне забезпечення методів контролю якості полівілхлоридної ізоляції електричних кабелів / Ж.В. Сокотун, О.Б. Кошелева, Ю.М. Пилипенко, Н.А. Зубрецька. *Системи обробки інформації*, випуск 5 (151), 2017, С. 158–166. DOI: 10.30748/soi.2017.151.21

## КАТЕГОРІЇ ТА КРИТЕРІЇ КАБЕЛІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

І. А. Пушкар

Науково-виробниче підприємство “Алай”, Київ, Україна

Атомна енергетика в Україні відіграє ключову роль в державній енергосистемі, забезпечуючи стабільне, екологічно чисте та незалежне джерело електроенергії. Атомні електростанції (АЕС) виробляють близько 50-60% всієї електроенергії України, що робить їх найважливішим компонентом енергосистеми. Довгострокові цілі розширення виробництва електроенергії на атомних електростанціях відіграють важливу роль у переході до низьковуглецевої енергетики [1]. До 2030 року прогнозується збільшення світових потужностей ядерної енергетики на 25%, що обумовлює розроблення та виготовлення сучасних кабелів, які відповідають суворим нормативним стандартам та посилюють протоколи безпеки. Модернізація АЕС України та будівництво нових реакторів потребує значних капіталовкладень, впровадження інноваційних технологій та компонентів, до яких відносяться і кабелі [2].

За призначенням кабелі на АЕС поділяються на п'ять основних категорій: електричні силові середньої напруги та кабелі живлення, контрольні, управління, спеціальні вимірювальні кабелі для радіаційного контролю та кабелі зв'язку, у тому числі і оптичні. На АЕС обов'язково забезпечується фізичне розділення між кабелями відповідно до класів електричної напруги: кабелі контрольно-вимірювальні та контрольні; силові кабелі низької напруги (до 1 кВ); силові кабелі середньої напруги (від 1 кВ до 35 кВ); силові кабелі високої напруги (понад 35 кВ). Силові кабелі високої напруги зазвичай не використовуються в локальних системах живлення. Лише кабелі одного класу напруги повинні розміщуватися в одному каналі (лотку або трубопроводі). Кабелі та канали різних класів напруги повинні бути розділені відповідно до класу спеціальними засобами (бар'єрами) або просторового поділу для зменшення, в першу чергу, теплового та електромагнітного впливів один на одне [3].

Кабелі повинні мати не тільки загальні характеристики звичайних, загальнопромислових, кабелів, але й особливі характеристики, такі як низьке виділення диму, вогнестійкість і специфічна стійкість до навколишнього середовища (стійкість до радіації, сейсмостійкість тощо) [4]. Характерною особливістю спеціальних кабельних виробів для АЕС є використання в їх конструкціях нових електроізоляційних кабельних композицій, що забезпечують високу пожежну безпеку з відповідними діелектричними властивостями.

Кабелі, призначені для реакторів типу EPR (розвинутий енергетичний реактор) і PWR (ВВЕР – водородяний енергетичний реактор), повинні відповідати вимогам Європейські норми REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals – Реєстрація, оцінка та авторизація хімічних речовин) і ROHS (Restriction of Hazardous Substances – обмеження використання небезпечних речовин: обмеження вмісту шкідливих речовин у електротехнічному та електронному обладнанні).

Узагальнені критерії та вимоги до кабелів АЕС в залежності від класу безпеки розміщення наступні.

**1. В ядерній зоні (всередині ядерної оболонки):** стійкість до термічного старіння відповідно до міжнародних стандартів; працездатність за температури навколишнього середовища 70°C на протязі 60 років; радіаційна стійкість до гамма-променів; перевірка стійкості до аварії з розривом паропроводу (SLBA); перевірка стійкості до проектної аварії (DBA). Радіаційно та вогнестійкі кабелі без вмісту галогенів з доведеним тестуванням щодо малої проектної аварії (LOCA) [4].

**2. В допоміжних приміщеннях та системах безпеки АЕС, турбінному відсіку:** працездатність за температури навколишнього середовища 70°C на протязі 60 років; стійкість до вертикального поширення полум'я, з вмістом галогенів, низька щільність диму, низький показник токсичності продуктів горіння, масло стійкі.

**3. В системах не безпеки:** стійкість до вертикального поширення полум'я, з вмістом галогенів, низька щільність диму, низький показник токсичності продуктів горіння.

До кабелів не вимагаються вимоги щодо стійкості до термічного та радіаційного старіння. Повинні відповідати Національним стандартам, що застосовуються до цивільних будівель та інфраструктури. Це силові кабелі низької напруги для з'єднання електричних шаф, коаксіальні, волоконно-оптичні кабелі тощо.

Необхідно підкреслити, що силові кабелі середньої та низької напруги, що не є значущими для систем безпеки та не пов'язаними з безпекою, повинні відповідати вимогам об'єктів атомної енергетики з терміном експлуатації 60 років і більше [2].

Зосередження уваги на цифровізації та розумних мережах створює попит на передові, інтелектуальні кабельні системи, що пропонують моніторинг стану та продуктивності кабелів у режимі реального часу на АЕС.

## Список літератури

- [1] Advancing the Robustness of Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants. Nuclear Energy Agency. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. NEA/CSNI/ R(2020)8. 2023. - 38 p.
- [2] Безпрозваних Г.В., Гонтар Ю.Г., Пушкар І.А. Розподілення електростатичного поля у неекраниваних силових кабелях з різною конфігурацією струмопровідних жил. Технічна електродинаміка. 2025, № 4, с. 29-41. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2025.04.029>
- [3] НП 306.2.245-2024 Загальні положення безпеки атомних станцій. Із змінами і доповненнями, внесеним наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 30 квітня 2024 року № 422.
- [4] IEEE 741-2022 - IEEE Standard for Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations. 2022. - 67 p.

## ПАРАМЕТРИ ДЛЯ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ КАБЕЛІВ ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖ ДО ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВПЛИВІВ

О. А. Пушкар

Науково-виробниче підприємство "Алай", Київ, Україна

Проблема електромагнітної сумісності окремих електричних пристроїв не втрачає своєї актуальності вже тривалий час. Найбільші проблеми викликають ті зовнішні завади, що діють на кабелі промислових мереж і призводять до відмови системи. На обладнанні промислових мереж в частотному діапазоні 80,0 МГц – 2,0 ГГц діє велика кількість різних джерел.

Електромагнітні завади з більшої частини носять несиметричний характер. Симетричні кабелі з витими парами ефективно зменшують електромагнітну заваду незалежно від природи її виникнення, якщо тільки завада діє на обох провідниках пари, що передається однаковим способом.

Ідеальна симетрія скрученої пари означає, що складові завади виділяються з іншої та компенсуються. В реальності повна компенсація не відбувається, наприклад, за причини відхилення кроку скручування пари від номінальних значень на технологічній стадії виготовлення нескрутованих кабелів.

Для чисельної оцінки міри відхилення від ідеального випадку встановлено спеціальний інтегральний параметр – згасання несиметричних завод (Transverse Conversion Loss, *TCL*) [1]. Параметр згасання несиметричних завод *TCL*, аналогічно багатьом іншим параметрам електромагнітного впливу (перехідного згасання на ближньому *NEXT* та дальньому *FEXT* кінцях, захищеності *ACR*) у витих парах, визначається на ближньому *LCL* (longitudinal conversion loss – «втрати поздовжнього перетворення») і дальньому *LCTL* (longitudinal conversion transfer loss – «відділені втрати поздовжнього перетворення») кінцях кабелю відповідно (табл. 1):

$$LCL = 20 \lg \left| \frac{U}{U_3 - U_4} \right|, \quad LCTL = 20 \lg \left| \frac{U}{U_5 - U_6} \right|, \quad \text{дБ} \quad (1)$$

де:  $U$  – напруга, яка генерується генератором;  $U_3, U_4$  – напруга на початку (ближньому кінці);  $U_5, U_6$  – напруга у кінці (на дальньому кінці) першої та другої витих пар відповідно.

Таблиця 1 – Значення параметрів згасання *LCL* і *LCTL* (дБ) для кабелів і ліній різних класів [1]

Частота, МГц	Клас А	Клас В	Клас С	Клас D
0,1	30	45	45	45
1,0	-	20	30	40
10	-	-	25	30

Граничне значення *TCL* обмежене 40 дБ, що для практично важливих випадків виявляється недостат-

нім. Для доведення ступеня *TCL* до необхідного значення використовується екран, виготовлений у вигляді обплетення, що забезпечує необхідний захист і майже не обмежує гнучкість кабелю.

Визначення ефективності екранування базується на класичному частотне-залежному параметрі – опорі зв'язку *ZT*: менші абсолютні значення відповідають меншим значенням напруги, що наведена струмом зовнішньої завади, яка протікає в екрані. Так, наприклад, на частоті 10 МГц звичайні плівкові екрани мають значення цього параметра приблизно 30 мОм/м, тоді як для комбінованих екранів  $ZT < 25$  мОм/м.

Конструктивні виконання електромагнітних екранів – різноманітні і розрахунковій оцінці піддається незначна частина. В основному, це екрани, що мають конструкцію у вигляді суцільної металевої трубки і не ламінованих стрічок, покладених спірально або повздовж з перекриттям, які мають замкнутий електричний контакт по всьому периметру перерізу. Всі інші типи екранів, що містять у своїй конструкції обплетення або комбінації з фольгою, що ламінує, оцінити розрахунковим способом вкрай важко. Для дослідження необхідні експериментальні методи оцінки ефективності екранування, що стандартизовані Міжнародною електротехнічною комісією: метод «інжекційної лінії» дозволяє визначити опір зв'язку кабелю; метод затискачів, що поглинають, для визначення згасання екранування; метод триаксіальної лінії; метод вимірювання згасання екранування захищеного екрана для визначення як опорі зв'язку, так і згасання екранування (в діапазоні високих частот) на одній випробувальній установці.

Таблиця 2 – Рівні екранування в залежності від нормованих значень опорі зв'язку кабелів [2]

Частота, МГц	Опір зв'язку $Z_T$ , мОм/м, не більше	
	Рівень екранування	
	1	2
1		50
10	10	100
30	30	200
100	100	1000

Опір зв'язку залежить виключно від конструкції кабелю (табл. 2), але не враховує умов навколишнього середовища і схеми включення та не визначено для нескрутованих систем та кабелів.

Список літератури

- [1] ISO/IEC 11801-1:2017 Information technology – Generic cabling for customer premises – Part 1: General requirements. 149 p.
- [2] MEC 61196-1:1995/AMD1:1999 Amendment 1 – Radio-frequency cables - Part 1: Generic specification - General, definitions, requirements and test methods.

## ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

А. І. Котиш, К. О. Балаєнко, Я. В. Василенко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

Сучасні електричні та електроенергетичні системи набагато складніші тих які були 20-30 років назад [1], окрім того тенденції розвитку сучасного електричного обладнання визначаються швидким прогресом науки, техніки та потребами енергетики й промисловості [2]. Основні напрями можна сформулювати так:

1. Підвищення енергоефективності:
  - застосування матеріалів із меншими втратами;
  - оптимізація конструкцій електродвигунів, трансформаторів, кабелів;
  - впровадження технологій енергозбереження.
2. Інтелектуалізація обладнання:
  - використання вбудованих мікропроцесорних систем керування;
  - можливість дистанційного моніторингу, діагностики та керування;
  - підтримка роботи у «розумних» електричних мережах (Smart Grid).
3. Мініатюризація та компактність:
  - зменшення масогабаритних параметрів при збереженні або підвищенні потужності;
  - застосування нових матеріалів (напівпровідникових, наноструктурованих, композиційних).
4. Підвищення надійності та довговічності:
  - вдосконалення ізоляційних систем;
  - впровадження захисту від перевантажень, коротких замикань та перенапруг;
  - застосування самодіагностики та попереджувального технічного обслуговування.
5. Екологічність та безпечність:
  - скорочення використання токсичних матеріалів (наприклад, SF<sub>6</sub>-газу у вимикачах);
  - перехід на екологічно чисті технології охолодження та ізоляції;
  - дотримання міжнародних стандартів енергетичної безпеки.
6. Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії:
  - обладнання, здатне ефективно працювати у децентралізованих енергосистемах;
  - розвиток накопичувачів енергії (акумуляторів, суперконденсаторів);
  - адаптація обладнання до роботи з нестабільними джерелами (сонячними, вітровими).
7. Цифровізація та автоматизація:
  - впровадження технологій Інтернету речей (IoT);
  - застосування штучного інтелекту для прогнозування аварій та оптимізації режимів роботи;
  - інтеграція з системами енергоменеджменту підприємств і міст.

На рисунку 1 показано структуру основних напрямів, зазначених вище.

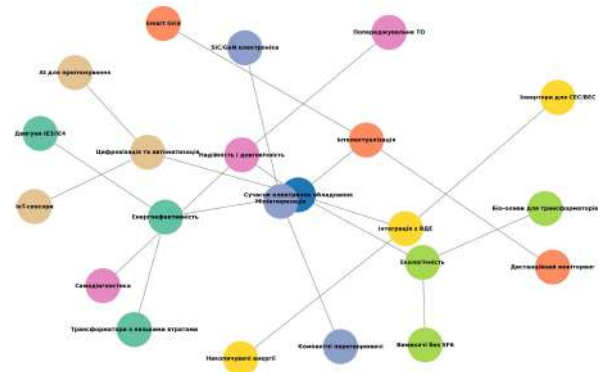


Рис. 1. Тенденції розвитку сучасного електричного обладнання

Дослідження сучасних тенденцій розвитку електричного та електроенергетичного обладнання України показує наявність значного потенціалу та високої інвестиційної привабливості [3]. Водночас, у зв'язку з негативними економічними чинниками, що впливають на господарську діяльність, зокрема електротехнічного профілю, потребують більш обґрунтованого й зваженого підходу до ухвалення рішень щодо реалізації інвестиційних та розробкових проєктів.

### Список літератури

- [1] Олійник Ю.С. Нові тенденції в енергетиці / Ю.С. Олійник, Л.М. Лазарчук, І.В. Сук // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 32 (71) Ч.2 №2, 2021. – С. 74-78.
- [2] Будяев М.О. Сучасні тенденції функціонування та розвитку електротехнічної промисловості в машинобудівному комплексі України / Глобальні та національні проблеми економіки. Наукове видання Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського. – випуск 11, 2016. – С 286-290.
- [3] Аналіз тенденцій ринку електротехнічного обладнання: інтелект і сталий розвиток стають основою майбутнього розвитку: веб-сайт. URL: <https://ua.contactrivet.com/news/analysis-of-electrical-hardware-market-trends-81918824.html> (дата звернення: 12.09.2025).

## ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБІННОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

В. О. Сліпченко, М. О. Поляков

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

Сучасні енергосистеми дедалі частіше працюють у режимах із високою часткою розподіленої генерації та малою інерційністю. В таких умовах зростає роль газотурбінних електростанцій (ГТЕС), які завдяки мобільності та помірним капітальним витратам залишаються основними джерелами резервного та автономного живлення. Водночас газотурбінні установки (ГТУ) мають обмежені динамічні властивості – повільну реакцію на стрибки навантаження, нестабільність частоти та напруги, а також переваження регуляторів, що знижує надійність мікромереж. Мета роботи – дослідити вплив інтеграції суперконденсаторного накопичувача енергії (SCES) на динамічні характеристики ГТУ.

Для аналізу обрано три характерні режими, що визначають граничні стани системи:

Коротке замикання (до спрацювання автомата,  $\approx 0,29$  с) – оцінює здатність SCES підтримувати напругу, обмежувати струми та стабілізувати параметри мережі.

Пуск асинхронного двигуна потужністю 40 % від номінальної – демонструє ефективність SCES у зменшенні пускових струмів ( $5-7 \times I_n$ ), обмеженні просядкі напруги та зниженні навантаження на ГТУ.

Раптове скидання навантаження, характерне для автономних і офгрід-систем, дозволяє оцінити стабільність ГТЕС при надлишку потужності.

Вибір цих режимів зумовлений їх критичністю: коротке замикання відображає миттєву реакцію системи на аварію, пуск АД – її здатність підтримувати стабільність при зміні потужності, а скидання навантаження – поведінку в умовах надлишкової генерації. Комплексний аналіз цих сценаріїв дає змогу оцінити ефективність застосування SCES для підвищення динамічної стійкості ГТЕС у промислових та автономних режимах.

Мінімальну кількість енергії необхідну для компенсації втрат у кожному з цих режимів вираховують за формулою:

$$E = \int_0^T \Delta P(t) dt \approx \Delta P_{max} \cdot T, \quad (1)$$

де:  $\Delta P$  – частина потужності, яку має покрити SCES протягом події;  $T$  – час перехідного режиму.

Необхідну ємність батареї суперконденсаторів розраховують за формулою:

$$C = \frac{2E}{\eta \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)}, \quad (2)$$

де:  $V_{max}$  та  $V_{min}$  – максимальне (1000 В) та мінімальне (600 В) значення напруги на виводах батареї;  $\eta$  – ККД батареї.

В табл. 1 наведені результати моделювання та розрахунку необхідних характеристик для оцінки можливості створення батареї суперконденсаторів.

Таблиця 1. Результати розрахунків

Потужність, МВт	1.0	1.6	2.5
Енергія КЗ, МДж	0.078	0.125	0.196
Енергія АД, МДж	0.140	0.225	0.351
Енергія СН, МДж	0.965	1.544	2.413
Струм Н сер, А	1443	2309	3608
Струм КЗ сер, А	5774	9238	14434
Струм КЗ пік, А	14697	23515	36742
Струм АД, А	4075	6521	10189
Струм АД пік, А	5762	9220	14406
Ємність, Ф	4.5	6	8

Для визначення пікових струмів короткого замикання а також струму пуску асинхронного двигуна використовувалась модель ГТЕС у середовищі MatLAB. Отримані результати дали змогу визначити діапазони енергетичних параметрів для SCES, необхідні для забезпечення стабільності електричних величин під час перехідних процесів.

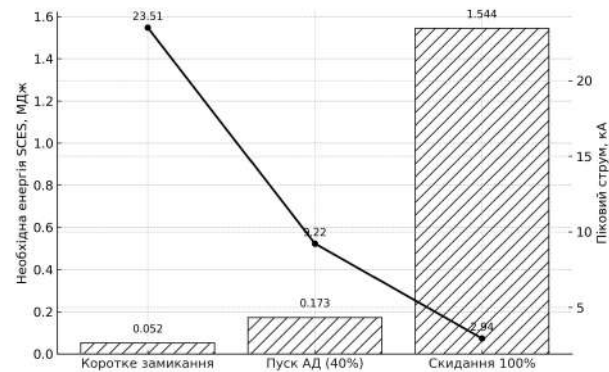


Рис. 1. Діаграма співвідношення основних параметрів у розглянутих режимах роботи

Отримані залежності між параметрами дизель-генератора, тривалістю перехідного процесу та характеристиками SCES формують основу для подальшого детального проектування конструктивних елементів накопичувача – вибору типу суперконденсаторних модулів, кількості послідовних ланцюгів, струмових шин і елементів охолодження.

### Список літератури

- [1] Adeyinka, A. M., Esan, O. C., Ijaola, A. O., & Farayibi, P. K. Advancements in hybrid energy storage systems for enhancing renewable energy-to-grid integration. Sustainable Energy Research, 2024. URL: <https://sustainenergyres.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-024-00120-4> (дата звернення: 09.10.2025).
- [2] Citalingam, K., & Go, Y. I. Hybrid energy storage design and dispatch strategy evaluation with sensitivity analysis: Techno-economic-environmental assessment. Energy Storage, 2022. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/est2.353> (дата звернення: 09.10.2025).

## ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ BESS В ЯКОСТІ РЕЗЕРВУ ПІДТРИМКИ ЧАСТОТИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

Н. В. Крюкова, В. С. Марков, Є. В. Гончаров, С. С. Логвиненко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Генерація сонячної та вітрової енергії, будучи переривчастою, створює більш часті електричні коливання, які мережа має достатньо швидко компенсувати. З іншого боку за рахунок відновлюваних джерел електроенергії знижується інерційність мережі. Зростання споживання енергії, що викликано широким поширенням електромобілів, систем управління кліматом у будівлях та зростанням центрів обробки даних на базі штучного інтелекту, робить попит на електроенергію дедалі все менш передбачуваним. Ця подвійна зміна динаміки як пропозиції, так і попиту створює безпрецедентне навантаження на системи регулювання частоти мережі.

Резерв енергії для підтримки частоти є першою лінією захисту енергосистеми від електричних коливань. Тому у мережі потрібен автоматичний стабілізатор, який активується протягом кількох секунд, коли у мережі надто багато чи надто мало електроенергії. Необхідно підтримувати стабільну електричну частоту 50 Гц у енергосистемі.

При виникненні непередбачуваної події, наприклад, раптового відключення електростанції, треба автоматично регулювати потужність мережі, збільшуючи або зменшуючи її. Тоді підтримується стабільна робота мережі, яка запобіє потенційним відключенням електроенергії та пошкодженню обладнання. Резерв підтримки частоти діє як основний механізм захисту від відхилень частоти мережі, автоматично реагуючи протягом кількох секунд для відновлення балансу між постачанням та споживанням електроенергії.

Системи накопичення енергії на основі акумуляторних батарей Battery Energy Storage Systems (BESS) забезпечують неперевершену швидкість відгуку (сотні мілісекунд) при коливаннях частоти мережі, що робить їх ідеальним рішенням для підтримки стабільності електроживлення (рис. 1).

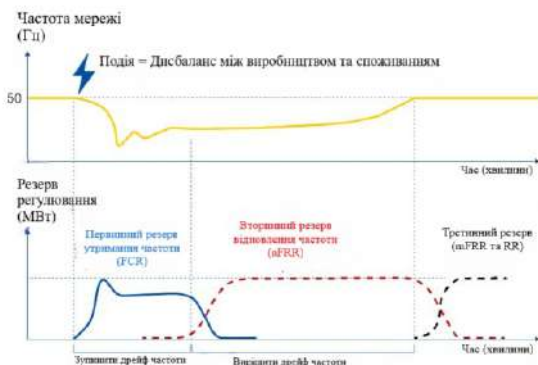


Рис.1 Підтримка частоти енергетичної мережі за рахунок акумуляторної системи зберігання енергії BESS

Перевага цих систем у тому, що можуть практично плавно переходити між режимами зарядки і розрядки, поглинаючи надлишок енергії чи забезпечую-

чи її додаткову потужність за необхідності. Швидке реагування BESS, яке спрацьовує протягом 100–500 мілісекунд для поглинання або вивільнення енергії, є значним прогресом у технології регулювання частоти, який змінює підхід до стабілізації мережі. Проект Mannington BESS (Великобританія) розрахований на потужність 47.5МВт [1].

У фазі зарядки акумуляторної системи BESS відбувається уловлювання сонячної енергії. Сонячні панелі перетворюють сонячне світло на електрику постійного струму за допомогою фотоелектричного ефекту. Енергія постійного струму, що генерується, відправляється на контролер заряду, який регулює напругу і струм, що надходять від сонячних панелей, щоб запобігти перезарядку і забезпечити ефективну зарядку акумуляторів. Далі регульована потужність постійного струму направляється в акумуляторний блок усередині BESS. Літій-іонні батареї мають особливі властивості зарядки, якими управляє система управління батареями (BMS). Електрична енергія зберігається у вигляді хімічної енергії всередині батареї.

У фазі розрядки акумуляторної системи BESS система виявляє потребу додаткової потужності. BMS ініціює процес розряду, перетворюючи накопичену хімічну енергію у електричну енергію. Далі відбувається перетворення постійного струму на змінний оскільки у більшості будинків і підприємств використовується електрика змінного струму (AC), потужність постійного струму від батареї перетворюється на потужність змінного струму за допомогою інвертора. Перетворена потужність змінного струму потім подається в електричну систему для задоволення попиту в електроенергії

Постійний моніторинг забезпечує ефективну роботу системи. Датчики відстежують різні параметри, такі як напруга, струм, температура та стан заряду (SOC) акумуляторів. Моніторинг допомагає виявляти та усувати такі проблеми, як перегрів, перезарядження або коротке замикання, підвищуючи безпеку та довговічність акумуляторів.

Механізми керування регулюють швидкість заряджання та розрядки на основі даних у реальному часі, щоб максимізувати продуктивність та термін служби батареї. Передові алгоритми у BMS можуть прогнозувати попит на енергію та структуру сонячної генерації, оптимізуючи використання накопиченої енергії та знижуючи залежність від електромережі.

### Список літератури

- [1] <https://www.cubicoinvest.com/news/cubico-launches-construction-of-95-mwh-bess-project-in-the-uk/>

## СПОСІБ АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ФОРСОВАНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТИРИСТОРНИХ МОДУЛІВ ПРИСТРОЮ РПН

Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, О. П. Левченко, В. В. Бахметьєв  
Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

У сучасних високовольтних системах електропостачання як загального, так і спеціального призначення найбільш широко використовуються засоби регулювання напруги живлення електричних споживачів за допомогою пристроїв перемикання відгалужень під навантаженням (РПН) [1, 2]. За допомогою такого пристрою перемикаються відгалуження високовольтної обмотки силового трансформатора для забезпечення необхідного рівня напруги живлення віддалених електричних споживачів.

Метою даної роботи є розробка способу оцінки показників експлуатаційної надійності РПН в умовах максимального рівня достовірності результатів, також визначення вихідних даних, необхідних для розрахунку основних показників експлуатаційної надійності силового блоку тиристорного модуля (ТМ), який є складовою пристрою РПН [1, 2, 3].

В умовах аналітичного визначення показників експлуатаційної надійності важливою складовою є проведення комплексу досліджень для визначення параметрів теоретичного закону розподілу відмов силових тиристорів, що входять у комплектацію ТМ. Максимальний рівень достовірності цих даних може бути досягнутий шляхом проведення визначальних випробувань в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації пристрою РПН.

Необхідність проведення таких випробувань зумовлена тим, що в режимі циклічного навантаження (чергування імпульсів навантаження та пауз), що характерно для тиристорних РПН, використання вихідних даних, що використовуються для оцінки надійності силових тиристорів перетворювальних блоків, що працюють у відносно статичному навантаженні, може спричинити зниження достовірності отриманих результатів [3].

Види прискорених випробувань, залежно від тяжкості режиму навантаження, поділяються на дві категорії. Перша – це випробування в номінальному режимі, результати яких прогнозують подальший розвиток випадкового процесу відмов тиристорів за обмежений проміжок часу. Друга категорія – це випробування в режимі форсованого навантаження, що дозволяє значно скоротити тривалість їх проведення за рахунок прискорення швидкості процесів старіння та зносу.

Якщо за оцінку результатів випробувань прийняти ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ , то згідно з основним законом теорії надійності, який стверджує, що надійність тиристорів за умов ( $\varepsilon$ ) залежить від значення ресурсу, що використовувався в минулому, і не залежить від того, як цей ресурс був вироблений, можна записати таку умову:

$$P(t_c \cdot \varepsilon_c) = P(t_\phi \cdot \varepsilon_\phi), \quad (1)$$

де:  $t_c$ ,  $\varepsilon_c$  – відповідно експлуатаційний та форсований (випробування) режими роботи;  $t_\phi$ ,  $\varepsilon_\phi$  – відповідно

тривалість випробувань в експлуатаційному та форсованому режимах.

На основі такої умови було розроблено метод форсованих випробувань, який називається методом рівних ймовірностей. У цьому випадку група тиристорів випробовується в форсованому режимі  $\varepsilon_\phi$  протягом часу  $t_c > t_\phi$ , а потім оцінюється значення  $t_c$ .

Наступним важливим етапом визначення інтенсивності відмов тиристорів є перерахунок даних випробувань у форсованому режимі на номінальний режим роботи. Запропонований метод базується на умові подібності форсованого та робочого режимів роботи тиристорів.

Подібність форсованого та робочого режимів забезпечує відповідність форми законів розподілу відмов у цих режимах. Це означає, що функції законів розподілу в робочому та форсованому режимах повинні мати однакову форму і відрізнятися лише масштабом. Зміна масштабу закону розподілу може бути забезпечена зміною струму навантаження відносно номінального значення на основі умови, що допустимій максимально температура нагрівання структури тиристора у форсованому режимі буде дорівнювати допустимій ( $\Theta_\phi = \Theta_{\text{доп}}$ ).

Запропонований спосіб аналітичного визначення параметрів режиму форсованих випробувань, за умови максимальної відповідності процесів старіння тиристорів реальним умовам експлуатації, дозволяє значно зменшити обсяг попередніх досліджень при отриманні максимального скорочення часу випробувань, що підвищує ефективність та надійність формування вихідних даних при оцінці основних показників експлуатаційної надійності як гібридних пристроїв РПН, так і аналогічного високовольтного електрообладнання.

## Список літератури

- [1] Афанасьєв, О.І. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О.І. Афанасьєв, Л.Б. Жорняк, О.В. Немикіна, В.М. Щусь, під заг. ред. П.Д. Андрієнко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 432 с.
- [2] Левицький, С. М. Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором напруги : монографія С. М. Левицький, К. І. Колмачов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 72 с. ISBN 978-966-641-630-1.
- [3] Оцінка надійності тиристорного модулю високовольтних гібридних комутаційних апаратів в умовах резервування / Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, В. М. Щусь, О. П. Левченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – № 2 (12). – С.11-17. DOI: 10.20998/2079-3944.2024.2.03.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП 0,4-330 КВ НА ГРАНИЦІ ЧИННИХ ОХОРОННИХ ЗОН ТА ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЇХ ЗБІЛЬШЕННЯ

В. Ю. Розов, Д. Є. Пелевін, К. Д. Кундіус

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, Україна

Для захисту здоров'я населення житлових будинків від негативної дії електричного поля (ЕП) повітряних ЛЕП, в Україні законодавчо [1] встановлені чинні охоронні зони ЛЕП у вигляді відчужених земельних ділянок розміром (рис. 1) 2 м (0,4 кВ); 10 м (10 кВ); 20 м (110 кВ); 30 м (330 кВ). В їх межах заборонено розташування житлових будинків. Проте, як вперше показано в [2], реальні рівні МП за межами вказаних чинних охоронних зон ЛЕП можуть істотно перевищувати прийнятий в Міненерго гранично допустимий рівень (ГДР) індукції їх МП для населення, що складає 0,5 мкТл [3]. Тому метою роботи є детальне дослідження розподілу МП ЛЕП 0,4-330 кВ на межі їх чинних охоронних зон, та визначення необхідності збільшення розміру охоронних зон для обмеження індукції МП в їх межах до ГДР 0,5 мкТл.

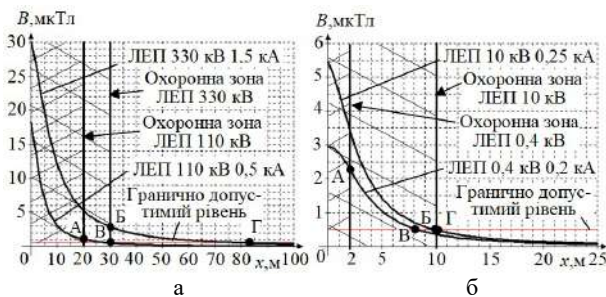


Рис. 1. Розрахований розподіл МП ЛЕП 0,4-330 кВ з максимальним рівнем індукції на межі чинних охоронних зон

Теоретичні дослідження розподілу МП виконані відповідно до [4] для ЛЕП 0,4-330 кВ з максимальним рівнем МП, а експериментальні - на 6 діючих повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ.

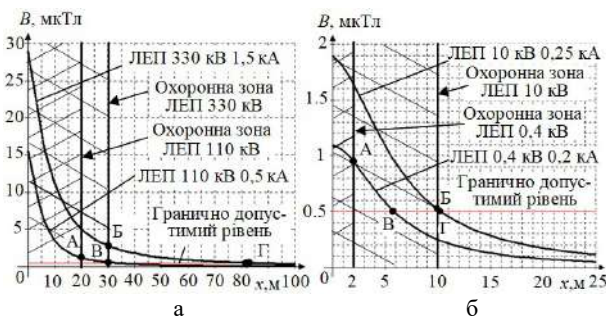


Рис. 2. Узагальнені результати експериментальних досліджень розподілу індукції МП діючих повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ, приведених до номінальних режимів їх роботи

Результати розрахунку (рис. 1) показують, що рівень МП на межі охоронних зон ЛЕП 0,4-330 кВ може істотно перевищувати ГДР за МП. Особливо це стосується ЛЕП 330 кВ (перевищення в 6 разів) та ЛЕП 110 кВ (перевищення в 2 рази).

На рис. 2 представлені узагальнені результати експериментальних досліджень розподілу індукції МП ЛЕП 0,4 кВ, 10 кВ, 110 кВ, 330 кВ зі струмом,

що приведений до номінального рівня, які в цілому підтверджують результати розрахунку (рис. 1).

На основі отриманих (рис. 1, рис. 2) результатів, для порівняння на рис. 3 представлені розміри чинних охоронних зон ЛЕП (1), та розміри охоронних зон ЛЕП (2), що необхідні для безпечного проживання населення за їх межами.

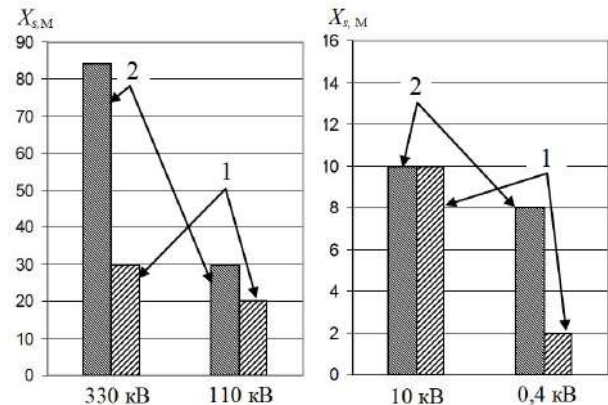


Рис. 3. Розмір чинних охоронних зон  $X_s$  ЛЕП 0,4-330 кВ (1) та необхідний (2) розмір безпечних за МП охоронних зон

Як слідує з рис. 3, за межами чинних охоронних зон можливе перевищення гранично допустимого для населення рівня індукції МП ЛЕП (0,5 мкТл) в 1,5-4 рази, що складає небезпеку для здоров'я людей, які проживають в будинках, розташованих поблизу ЛЕП. Це обумовлює необхідність збільшення розміру чинних охоронних зон для ЛЕП 330 кВ – в 2,8 рази (з 30 м до 83 м), для ЛЕП 110 кВ – в 1,5 рази (з 20 м до 30 м), що повинно бути вирішено на законодавчому рівні.

Проблему захисту населення від МП ЛЕП 0,4 кВ пропонується вирішити шляхом обов'язкового використання в них ізольованих проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену (СПІ), що дозволить на порядок зменшити їх МП.

## Список літератури

- [1] КМУ. Постанова від 27 грудня 2022 р. № 1455 «Про затвердження Правил охорони електричних мереж».
- [2] Пелевін Д.Є. Методи зниження магнітного поля повітряних ліній електропередачі за межами охоронних зон. Технічна електродинаміка, 2014. № 5. С. 14–16. URL: [https://previous.techined.org.ua/2014\\_5/st4.pdf](https://previous.techined.org.ua/2014_5/st4.pdf).
- [3] Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України, Видавництво «Форт», Харків, 2017, 760 с.
- [4] СОУ Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання: СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. зі змінами – К.: Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку об'єднаної енергетичної системи України» ДП «НЕК «Укренерго». 2016. С. 37.

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

С. О. Зубенко

Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Підвищення енергоефективності об'єктів енергоспоживання є одним із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки України. Сучасний етап розвитку енергетики характеризується високою залежністю від імпорتنих енергоносіїв, зношеністю інфраструктури та значними технологічними втратами. Це зумовлює необхідність системного підходу до управління енергоспоживанням на всіх рівнях – від підприємств до муніципалітетів. Одним із ефективних інструментів реалізації цього завдання є системи енергетичного менеджменту.

Сучасний енергетичний менеджмент – це проактивна, організована та систематична координація закупівлі, перетворення, розподілу та використання енергії для задоволення вимог, беручи до уваги екологічні та економічні цілі [1]. Основна мета полягає у створенні цілісної системи енергоменеджменту, яка поєднує технічні рішення, цифрові інструменти моніторингу та управлінські механізми ухвалення рішень.

Дослідження останніх років свідчать, що впровадження систем енергомоніторингу не завжди забезпечує очікувану ефективність. За результатами понад 200 енергоаудитів виявлено низку недосконалостей, зокрема, недостатнє використання потенціалу енергомоніторингу; незадовільну якість даних енергомоніторингу, зокрема в частині їхньої повноти, цілісності, достовірності та актуальності; відсутність належного аналізу даних про енерговикористання; неналежну формалізацію, уніфікацію та автоматизацію процесів енергомоніторингу; неврахування переваг регулярного технічного обслуговування енергоспоживаючого обладнання і відсутність контролю якості його проведення [2]. Це означає, що впровадження технічних засобів контролю має супроводжуватися організаційними заходами – стандартизацією даних, визначенням відповідальних осіб, автоматизацією процесів аналізу та верифікації результатів.

Важливо, щоб енергетичні моделі охоплювали всі види енергоспоживання. Існуючі методики щодо визначення показників енергоефективності будівель, які визначені нормативними документами, враховують лише річні енергопотреби будівель на опалення і не беруть до уваги витрати енергії на охолодження та підготовку гарячої води [3]. Недоліки нормативних підходів обумовлюють потребу в більш гнучких аналітичних моделях, здатних забезпечити комплексну оцінку енергетичних потоків і реальний баланс споживання.

Комплексний підхід передбачає інтеграцію усіх енергетичних потоків у єдину модель розрахунку, що дає змогу оцінювати реальний баланс споживання та визначати потенціал економії енергії для кожного об'єкта.

Перспективним напрямом є поєднання систем енергоменеджменту з технологіями цифрового моні-

торингу на основі IoT-рішень, SCADA-систем та хмарних платформ. Це дозволяє не лише оперативно виявляти перевитрати, але й прогнозувати навантаження, будувати моделі споживання в реальному часі та формувати бази даних для подальшого машинного аналізу. Зібрані цифровими системами дані стають основою для побудови математичних моделей оптимізації енергоспоживання, що підвищує точність прогнозів і ефективність управлінських рішень.

Сучасний енергетичний менеджмент – це набагато більше, ніж просте технічне рішення для моніторингу параметрів та стану енергетичних систем [1]. Енергоменеджмент має розглядатися як безперервний процес прийняття рішень, у якому технічні дані слугують основою для економічного та екологічного планування.

Доцільним є використання багатокритеріальних методів оптимізації, що враховують не лише економічну доцільність заходів, але й вплив на навколишнє середовище. Математичні моделі дозволяють знаходити оптимальні комбінації модернізаційних рішень: утеплення, модернізація систем вентиляції, впровадження рекуперації, автоматизація освітлення, заміна електроприводів. Такі комбінації можуть забезпечити скорочення енергоспоживання до 30–40 % залежно від типу об'єкта та його початкового стану.

Важливо підкреслити, що реалізація енергоефективних проєктів потребує підтримки на рівні державної політики. Необхідні механізми стимулювання, пільгового фінансування, енергетичного аудиту та стандартизації систем енергоменеджменту відповідно до міжнародного стандарту ISO 50001

Таким чином, комплексний підхід до енергоефективності передбачає взаємопов'язану роботу технічних, інформаційних і організаційних систем. Використання оптимізаційних моделей, впровадження цифрового моніторингу та інтеграція відновлюваних джерел енергії дозволяють суттєво зменшити енергоємність виробництва, підвищити енергетичну стійкість і сприяти реалізації стратегічної мети – досягненню енергетичної незалежності України.

### Список літератури

- [1] Кириленко О. В., Денисюк С. П., Блінов І. В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. Енергетика: економіка, технології, екологія, № 1 (2024).
- [2] Коцар О. А., Довгий І. О. Підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту МСП через управління даними енергомоніторингу. Енергетика: економіка, технології, екологія, № 2 (2025).
- [3] Методи розрахунку енергоефективності будівель згідно з ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 «Енергоефективність будівель».

## ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ СИСТЕМНО-КЛАСТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

К. Ю. Бровко, П. Ф. Буданов, Ю. С. Олійник

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Сучасна атомна енергетика є критично важливою для енергетичної безпеки держави, а підвищення її надійності та безпеки вимагає впровадження передових інформаційних технологій, зокрема, концепції цифрового двійника. Актуальність дослідження зумовлена відсутністю комплексної моделі, яка б інтегрувала всі ключові підсистеми енергоблоку в єдину цифрову платформу, що враховує його структурну складність [1]. Метою даної роботи була розробка саме такої імітаційної моделі цифрового двійника технологічного процесу енергоблоку атомної електростанції (АЕС) на основі системно-кластерного підходу з використанням величини фрактальної розмірності.

оцінки структурної складності кожного підкластера. Було отримано характерні значення: керування потужністю ( $d_f \sim 1.584$ ); системи захисту ( $d_f \sim 1.0$ ); регулювання теплоносія ( $d_f \sim 1.83$ ); аварійної зупинки ( $d_f \sim 1.585$ ). Для кожного підкластера був визначений нормований діапазон цієї величини, а відхилення поточного значення  $d_f$ , від цього діапазону є сигналом про структурну деградацію або перенавантаження системи, тобто про передаварійний стан.

Практична реалізація моделі була виконана шляхом створення функціонального цифрового двійника у вигляді програмно-апаратного комплексу. Його архітектура, що реалізує алгоритм, включає модулі збору даних, структурної ідентифікації, порівняння та візуалізації. Було розроблено інтерактивний інтерфейс, який забезпечує моніторинг основних технологічних параметрів, візуалізацію стану кластерної структури та відображає динаміку зміни величини фрактальної розмірності в режимі реального часу. Таким чином, розроблена модель цифрового двійника дозволяє не лише імітувати поведінку енергоблоку, але й виконувати проактивну діагностику на основі аналізу структурної цілісності системи управління.

Отримані результати демонструють високу ефективність системно-кластерного підходу та використання фрактальної розмірності як інноваційного інструменту для підвищення безпеки та надійності АЕС.

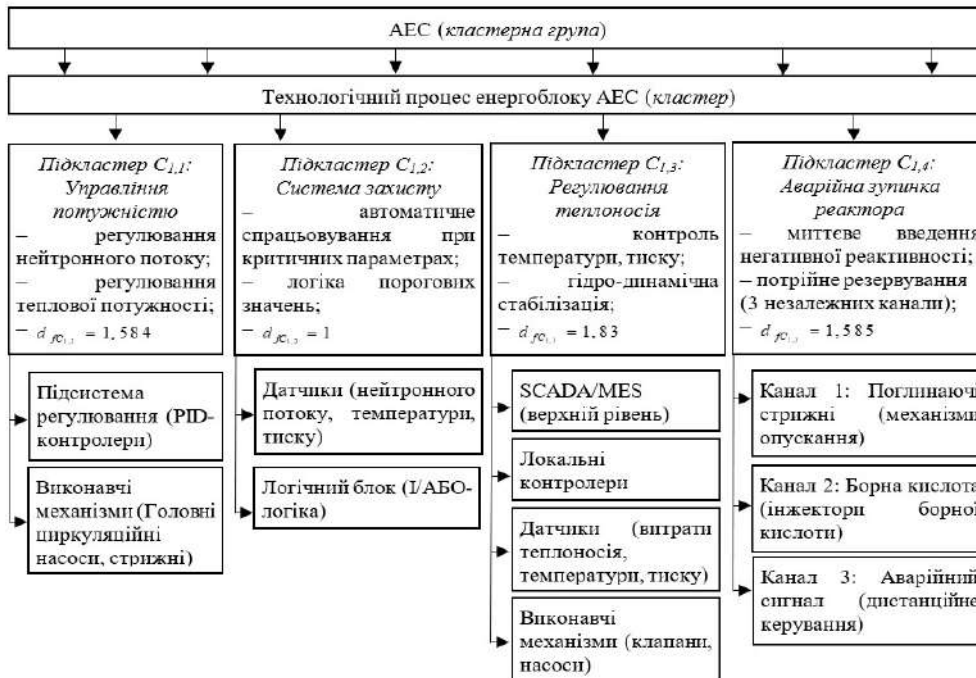


Рис. 1. Ієрархічна структура системи управління енергоблоком АЕС на основі системно-кластерного підходу

Для її досягнення було виконано моделювання технологічного процесу, де енергоблок представлено як ієрархічну структуру з головним кластером, що включає чотири ключові підсистеми: керування потужністю, захист реактора, регулювання теплоносія та аварійне глушіння. Математичний опис цих підсистем базувався на рівняннях точкової нейтронної кінетики, дискретно-логічних алгоритмах, рівнянні теплогідродинаміки та моделі імпульсної реактивності. Стан всієї системи в цілому описувався агрегованою змінною та функцією реакції системи, які враховують вплив усіх підкластерів, керуючих сигналів та зовнішніх збурень [2]. Наступним кроком був розгляд ієрархічної структури системи управління для реалізації алгоритму цифрового двійника (рис. 1). Ключовим результатом стало впровадження фрактальної розмірності  $d_f$ , як кількісного інструменту для

демонструють високу ефективність системно-кластерного підходу та використання фрактальної розмірності як інноваційного інструменту для підвищення безпеки та надійності АЕС.

### Список літератури

- [1] Louis, H. K. Assessment of neutronic safety parameters of VVER-1000 core under accident conditions. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, Vol. 132, 103609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103609>
- [2] Буданов П. Ф., Великогорський О. В., Винокурова Н. Д. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблоку АЕС засобами цифрового двійника. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – № 3 (25). – С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АВАРІЙНОГО ПРОЦЕСУ НА ЧОРНОБІЛЬСЬКІЙ АЕС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕРАКТИВНОГО ТРЕНАЖЕРА-СИМУЛЯТОРА

К. Ю. Бровко, Н. Д. Винокурова, С. М. Войтенко

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Чорнобильська катастрофа 1986 року стала однією з наймасштабніших техногенних подій в історії, що визначила подальший розвиток ядерної енергетики та безпеки атомних станцій (АЕС). Вона виявила критичні конструктивні недоліки реакторів типу РВПК-1000 і показала значення людського фактора у керуванні складними технологічними системами. У сучасних умовах, коли атомна енергетика знову розглядається як шлях до декарбонізації, вивчення причин і механізмів Чорнобильської аварії має важливе значення.

Одним із ключових напрямів у цьому контексті є створення комп'ютерних моделей та інтерактивних

симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС представлено на рис. 1.

Створений тренажер дозволяє моделювати послідовність подій – від штатного режиму роботи ядерного реактора до його розгону й вибуху, відображаючи динаміку потужності, температури, концентрації Xe-135 та тиску. Особливістю розробки є інтерактивний інтерфейс із можливістю змінювати швидкість симуляції, проводити покроковий аналіз, фіксувати ключові події й оцінювати дії персоналу. Це робить його не лише ефективним навчальним інструментом, а й платформою для наукових експериментів у галузі ядерної безпеки. Симулятор може бути використаний для підготовки операторів АЕС, оцінки ефективності систем захисту, тестування алгоритмів автоматичного реагування та дослідження сценаріїв аварійного розвитку подій. Створення такої інтегрованої математичної моделі є кроком до формування повноцінного цифрового двійника реактора типу РВПК-1000, який дозволить глибше зрозуміти фізичні закономірності катастрофи та запобігти подібним аваріям у майбутньому.

Отримані результати демонструють, що навіть спрощене відтворення фізичних процесів за допомогою сучасних комп'ютерних засобів здатне забезпечити якісно новий рівень аналізу складних інженерних систем, слугуючи основою для вдосконалення культури ядерної

безпеки та сталого розвитку атомної енергетики.

### Список літератури

- Бровко К. Ю., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. Комп'ютерна симуляція розвитку аварії на Чорнобильській АЕС із застосуванням інтерактивного тренажера-симулятора // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2025. – Вип. 1(10). – С. 31–39. URL: [https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1\(10\).329980](https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1(10).329980)
- Бровко К. Ю., Буганов П. Ф., Великогорський О. В., Винокурова Н. Д. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблоку АЕС засобами цифрового двійника. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – № 3 (25). – С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>

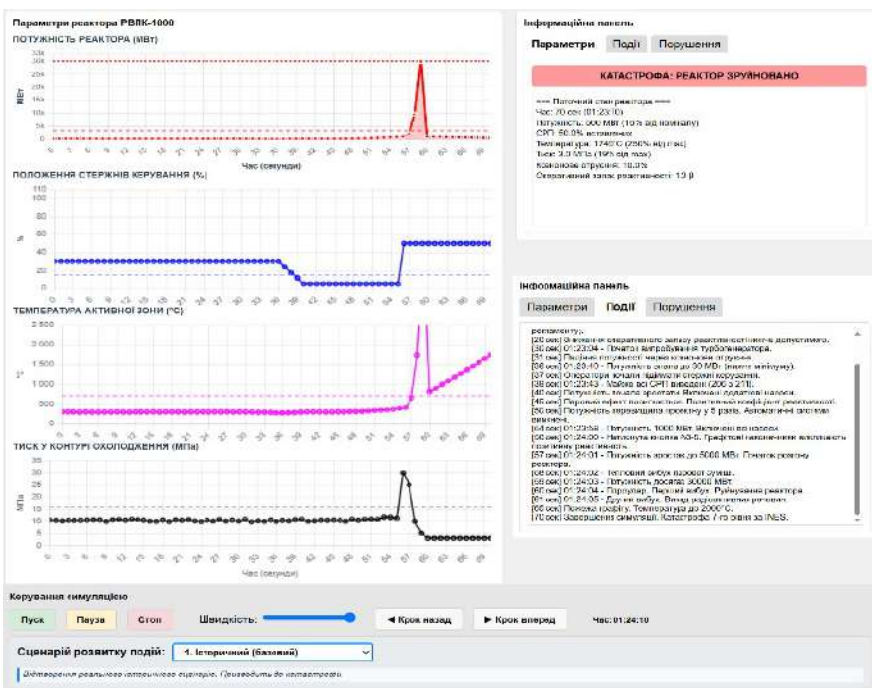


Рис. 1. Загальний вигляд інтерактивного симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС

тренажерів, які дозволяють досліджувати динаміку аварійних процесів та готувати персонал до реагування на нештатні ситуації. Розроблений симулятор аварії на ЧАЕС базується на системі взаємопов'язаних диференціальних рівнянь, що описують поведінку реактора, зміну потужності, кінетику нейтронів, ефекти ксенонового отруєння, тепломасообмін і тиск у контурі охолодження [1, 2].

Модель враховує ключові нелінійні ефекти, зокрема позитивний паровий коефіцієнт реактивності, що став одним із головних чинників аварії. Використання чисельного методу Рунге-Кутта забезпечило точне відтворення швидкоплинних процесів у реакторі, а реалізація симуляції мовою JavaScript із застосуванням бібліотеки Chart.js надала можливість візуалізувати зміни параметрів у режимі реального часу. Загальний вигляд інтерактивного

## ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРШОГО КОНТУРУ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВВЕР-1000

К. Ю. Бровко, О. М. Пономаренко, Д. Р. Подопригора  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Сучасні енергоблоки атомних електростанцій (АЕС), зокрема з реакторами типу ВВЕР-1000, характеризуються високою складністю теплогідрравлічних процесів першого контуру. Моніторинг температури теплоносія на різних ділянках контуру є критично важливим для забезпечення безпеки роботи ядерного реактора. Навіть незначні локальні коливання температури можуть призводити до формування критичних теплових градієнтів, які здатні спричинити перегрів окремих зон активної зони або трубопроводів, що підвищує ризик аварійних ситуацій. Дослідження [1] показують, що температурне поле першого контуру має фрактально-кластерну структуру, де локальні відхилення температури утворюють просторово пов'язані групи або кластери. Ідентифікація та аналіз таких кластерів дозволяє не лише прогнозувати потенційні критичні стани, але й оптимізувати розміщення контрольних точок для більш точного моніторингу та оперативного реагування на зміни режиму. В роботі [2] наведено приклад фрактально-кластерного розподілу температурних змін першого контуру, що наочно демонструє концентрацію теплових відхилень у окремих секторах активної зони.

Моніторинг температури здійснюється за допомогою п'яти основних груп датчиків: на вході та виході теплоносія з активної зони, на головних циркуляційних насосах, на магістральних трубопроводах першого контуру та безпосередньо в активній зоні через внутрішньоактивні датчики тепловиділяючих елементів. Використання термоперетворювачів опору та термопар забезпечує поєднання високої точності вимірювань із швидкою реакцією на локальні температурні флуктуації. Дані з усіх сенсорів інтегруються в інформаційно-керуючу систему, де вони піддаються фрактально-кластерному аналізу для виявлення закономірностей у просторі та часі, як показано на рис. 1. Для підвищення точності вимірювань застосовуються сучасні методи цифрової обробки сигналів, включаючи адаптивні фільтри шуму, компенсацію систематичних похибок та алгоритми Калмана для прогнозування та корекції даних у режимі реального часу. Математичне моделювання температурного поля дозволяє оцінювати масштаби теплових відхилень, ймовірність утворення критичних локальних перегрівів та ефективність системи керування тепловим режимом першого контуру. Фрактально-кластерний підхід дає змогу не лише виявляти локальні відхилення, а й оцінювати їх потенційний вплив на експлуатаційну безпеку. Результати моделювання підтверджують, що локальні температурні відхилення на рівні 2–3 % можуть збільшувати тепловий градієнт у певних зонах на 15–20 %, що потенційно створює умови для формування перегріву або підвищеного теплового навантаження на обладнання.



Рис. 1. Блок-схема алгоритму обробки інформації в інформаційно-керуючій системі енергоблоку АЕС

Впровадження таких методів дозволяє підвищити оперативність реагування на теплові зміни, стабілізувати теплогідрравлічні процеси та підвищити рівень безпеки енергоблоків АЕС. Крім того, це забезпечує підвищену ефективність експлуатації устаткування, продовження терміну його служби та зниження ймовірності аварійних ситуацій. Перспективи розвитку систем моніторингу полягають у поєднанні фрактально-кластерного аналізу з алгоритмами штучного інтелекту для автоматичного прогнозування критичних станів та адаптивного керування режимами роботи першого контуру.

Таким чином, інтеграція фрактально-кластерного підходу в системи контролю температури реакторних установок відкриває нові можливості для підвищення безпеки та надійності роботи АЕС, забезпечуючи науково обґрунтовану оцінку ризиків та оптимізацію технологічних процесів.

### Список літератури

- [1] Бровко К. Ю., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. Комп'ютерна симуляція розвитку аварії на Чорнобильській АЕС із застосуванням інтерактивного тренажера-симулятора // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2025. – Вип. 1(10). – С. 31–39. – URL: [https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1\(10\).329980](https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1(10).329980)
- [2] Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д. Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2025. – Вип. 65. – С. 15–34. – URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02>

## САМОАДАПТИВНА КОНДЕНСАТОРНА ІЗОЛЯЦІЯ ДЛЯ ПРИГЛУШЕННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИСТЕМАХ

Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, В. М. Щусь  
Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

Досвід експлуатації конденсаторної ізоляції у конструкціях вимірювальних трансформаторів струму напругою 110 кВ та вище показує, що поступове зниження електричної міцності виникає внаслідок дії часткових розрядів (ЧР) у товщі ізоляції і особливо на кінцях основних та додаткових (манжет) конденсаторних обкладинок.

Встановлено, що іонізаційний механізм ЧР визначається мікронеоднорідностями (порожнини, міжволоконні канали паперу, пори компаунду, нерівності кромки фольги), де локально зменшується ефективна густина газу або підсилюється поле за моделлю сферичної пори. Під їх впливом зростає напруженість поля ( $E$ ) і при досягненні критичного значення відбувається лавинна іонізація та перерозподіл ємнісних гілок у схемі Ca-Cb-Cc, що реєструється як уявний заряд  $q_a$  згідно з ІЕС 60270. Тут були прийняті позначення Ca-Cb-Cc – еквівалентні ємності, де Ca – непошкоджений об'єм, Cb – серійна ємність над/під дефектом, Cc – ємність газового включення. Тривале навантаження ізоляції прискорює електричне старіння, тобто зростання  $\text{tg} \delta(f)$ , деградацію міжфазних меж і підвищення поверхневої провідності; наявність зволоження збільшує  $\epsilon'$  та додатково знижує електричну міцність; тверді домішки підвищують частоту та інтенсивність ЧР [1, 2]. Тому зниження негативного впливу ЧР в процесі експлуатації високовольтної ізоляції дає можливість суттєво її експлуатаційну надійність та терміни експлуатації.

Тому головною метою даної роботи ставиться узагальнення електрофізичних передумов виникнення ЧР у конденсаторній ізоляції і розробка сумісного із серійними технологіями способу їх приглушення за рахунок локального керування граничними умовами електричного поля на кромках фольгових обкладинок і перфорованих манжет. Це досягається за допомогою напівпровідних покриттів на основі оксиду цинку (ZnO). При цьому визначальним є крайове підсилення градієнту напруженості  $\nabla E$  у триєдиній зоні «Al – напівпровідний шар – рідкий/твердий діелектрик», де контраст діелектричної проникності  $\epsilon'$  та геометрична кривизна формують місця максимальної ймовірності ініціювання ЧР в умовах дії робочих напруг та внутрішніх перенапруг. Проведеними дослідженнями встановлено, що довготривалі граничні стани робочого поля не поступаються грозовим чи комутаційним імпульсам, оскільки вони зумовлюють часті низькоенергетичні ЧР.

За результатами досліджень запропоновано розподілене демпфування тангенціальної складової поля на кромці фольги через напівпровідний шар нанокompозиту ZnO-RTV (RTV/епоксид+ZnO) з листовим поверхневим електричним опором  $R_s \approx 10^8\text{-}10^9$  Ом/м<sup>2</sup> і технологічною товщиною напівпровідного покриття  $\delta \approx (0,3\text{-}0,7)$  мм. При цьому падіння потенціалу вздовж проклейки має експоненційний характер з

довжиною згасання  $\Lambda$ , а в умовах промислової частоти 50 Гц встановлюється інженерна вимога  $l_{sp} \geq 3 \cdot \Lambda$  для практичного усунення піку тангенціальної напруженості  $E_t(x)$  без надмірних втрат. Нелінійна провідність нанокompозиту ZnO-RTV забезпечує селективний відвід заряду під час імпульсних перенапруг, зменшуючи  $E$  у критичних ділянках і обмежуючи енергію одиночного ЧР.

Встановлено, що у випадку зволоження має місце перерозподіл об'ємного/міжшарового заряду між окремими зонами структури ізоляції, що збільшує втрати, але зменшує ЧР, а сушіння та вакуумне просочення мінімізують поляризаційні релаксації.

За вище означеними умовами було проведено моделювання у Matlab/Simulink зі схемами заміщення та експоненційними граничними умовами, яке підтверджує спад  $E$  і зростання напруг зародження часткових розрядів (PDIV) та погасання часткових розрядів (PDEV) після нанесення напівпровідного шару.

За результатами досліджень були сформовані практичні рекомендації, а саме: для трансформаторів 110–330 кВ необхідно обирати  $R_s$  у межах  $10^8\text{-}10^9$  Ом/м<sup>2</sup>,  $\delta \approx 0,3\text{-}0,7$  мм і довжину проклейки  $l_{sp} \geq 3 \cdot \Lambda$ . Запропонований підхід перетворює граничні умови поля з «жорстких» на «дифузні», знижує ймовірність ініціювання ЧР, стабілізує  $\text{tg} \delta(f, T)$  та підвищує PDIV без збільшення габаритів і маси, що збільшує прогнозований ресурс ізоляції.

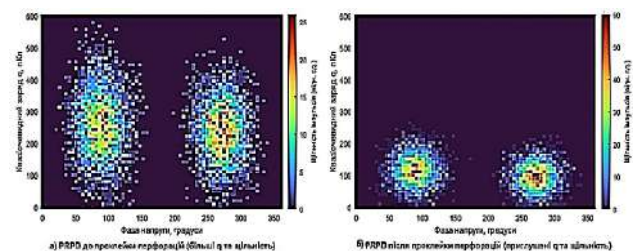


Рис 1. Розподіли напруги зародження часткових розрядів (PRPD) до (а) та після проклейки перфорацій манжет (б)

## Список літератури

- [1] Афанасьєв О.І. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О.І. Афанасьєв, Л.Б. Жорняк, О.В. Немикіна, В.М. Щусь, під заг. ред. П.Д. Андрієнко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 432 с.
- [2] Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Щусь В. М. Оптимізація системи внутрішнього екранування в газонаповнених високовольтних електричних апаратах із полімерною ізоляцією. Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ«ХП». – 2022. № 1 (7) – С. 8–12.

## ВПРОВАДЖЕННЯ SMART GRID ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

О. М. Довгалюк, Г. В. Білоконь, В. Ю. Баталін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Сучасним глобальним трендом розвитку світової енергетики є впровадження Smart Grid технологій, що покращує керування процесами виробництва, передачі, розподілу та споживанням електричної енергії і тим самим забезпечує підвищення ефективності і надійності функціонування енергосистем, а також сприяє підвищенню рівня енергетичної безпеки будь-якої країни. Для енергетики України такий шлях розвитку на сьогоднішній день є пріоритетною задачею, яка закріплена державною енергетичною стратегією [1] та може стати важливим напрямком у вирішенні актуальних задач оновлення застарілого обладнання, що відбувається як у відповідності до планових заходів, так і в умовах гострої потреби екстреного відновлення фізично зруйнованих об'єктів енергетичного сектору внаслідок російської військової агресії.

Слід підкреслити, що такий напрям розвитку енергетики України призводить до неминучої трансформації традиційних електричних мереж і підходів до керування їх режимами. Розв'язання цієї задачі потребує врахування особливостей її вирішення для розподільних електричних мереж (РЕМ) України, які для поточного стану включають наступне:

- структурне виконання РЕМ характеризується використанням складних розгалужених схем із застосуванням 3 рівнів напруги [2];

- активне впровадження цифрових технологій, що покращує моніторинг об'єктів та підвищує керованість їх станів [3];

- збільшення кількості джерел розосередженого генерування, серед яких значну частку становлять відновлювані джерела енергії [4];

- збільшення частки автономних систем електропостачання споживачів, що сприяє децентралізації структури РЕМ [5, 6];

- істотне підвищення вимог споживачів до показників надійності та якості надання послуг електропостачання.

Сучасні виклики, що постали перед енергетичним сектором України, а також перспектива максимального удосконалення РЕМ під час відновлення та реконструкції, потребують дослідження особливостей впровадження Smart Grid технологій з урахуванням їх впливу на забезпечення вимог до підвищення ефективності керування режимами роботи мереж. З метою кількісного аналізу складових Smart Grid технологій, що мають перспективи впровадження до РЕМ України, був розроблений критерій ефективності, який дозволяє врахувати технічні, економічні й екологічні аспекти впливу досліджуваних технологій, загальний вигляд якого можна представити виразом:

$$k_{efej}(i) = w_{ej} C_{ej}(i), \quad (1)$$

де:  $k_{efej}(i)$  – коефіцієнт ефективності застосування  $j$ -ої складової Smart Grid технологій для  $i$ -ої РЕМ;  $w_{ej}$  – ваговий коефіцієнт  $j$ -ої складової Smart Grid

технологій, що враховує специфіку впливу заходу на РЕМ, споживачів та докілья;  $C_{ej}(i)$  – кількісна характеристика впливу  $j$ -ої складової Smart Grid технологій за умови її впровадження для  $i$ -ої РЕМ, що враховує технічні, економічні та кліматичні особливості будови й розташування досліджуваної мережі.

З використанням запропонованого критерію була виконана кількісна оцінка складових Smart Grid технологій за умови їх впровадження в РЕМ України, результати якої дозволили виділити найбільш доцільні заходи для покращення керованості досліджуваних мереж, серед яких: системи інтелектуального обліку і моніторингу стану мережевих об'єктів ( $k_{efe} = 0,37 \div 0,51$ ), інтелектуальне обладнання РЕМ ( $k_{efe} = 0,35 \div 0,42$ ), системи інтелектуального керування розподілом потоків потужності в РЕМ ( $k_{efe} = 0,24 \div 0,33$ ), керування аварійними відключеннями ( $k_{efe} = 0,19 \div 0,25$ ).

Практичне застосування розробленого критерію дає можливість обґрунтовано підходити до визначення доцільності впровадження складових Smart Grid технологій для керування режимами РЕМ з урахуванням індивідуальних характеристик досліджуваних мереж.

### Список літератури

- [1] Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-p#Text>.
- [2] Довгалюк О. М., Баталін В. Ю., Білоконь Г. В. Аналіз особливостей структурного виконання сучасних розподільних електричних мереж. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2022)», 2022, с. 27-28.
- [3] Довгалюк О. М., Білоконь Г. В. Впровадження цифрових технологій для керування режимами розподільних електричних мереж України. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXXIII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2025, Харків: НТУ «ХПІ», 2025, с. 136.
- [4] Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.07.2024 р. № 713-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text>.
- [5] Савченко Н. П., Довгалюк О. М., Трет'як А. В. Автономна Microgrid система для побутових споживачів на базі енергоефективних технологій з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, 2025, № 1(10), с. 121–126, doi: 10.20998/EREE.2025.1(10).332574.
- [6] Качан Ю. Г., Шрам О. А. Щодо структури енергоефективної електромережі промислового підприємства з джерелами розосередженої генерації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2024, № 4, с. 54–59, doi: 10.31649/1997-9266-2024-175-4-54-59.

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З МАЛИМИ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

О. Є. Піротті, А. С. Макєєв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У сучасних умовах розвитку енергетики все більшого значення набуває використання відновлюваних джерел енергії, серед яких важливу роль відіграють малі гідроелектростанції (МГЕС) [1, 2]. Вони забезпечують локальне виробництво електроенергії, сприяють зниженню втрат при передачі та підвищують стійкість і автономність регіональних електричних мереж [3].

Робота електричних мереж з МГЕС характеризується нестабільністю виробітку електроенергії, що пов'язано з природними факторами, такими як зміна рівня води, сезон, погодні умови тощо [4]. Ці коливання впливають на розподіл потужностей, напругу та струмові навантаження в електричній мережі, через що необхідно впроваджувати системи автоматизованого керування, які забезпечують стабільність частоти та напруги під час зміни режимів роботи станцій [5].

При роботі МГЕС з можливістю видачі надлишків генерованої потужності до енергосистеми виникає потреба у синхронізації та узгодженні режимів роботи між локальними генераторами станції і централізованою мережею. Вирішення цієї задачі також покладається на відповідну систему автоматичного регулювання, для чого проводиться аналіз потужностей, вибір оптимальної схеми підключення та налаштування пристроїв захисту. Важливо забезпечити, щоб робота МГЕС не викликала небажаних коливань напруги чи частоти в суміжних вузлах мережі.

Крім розглянутих технічних аспектів, в умовах енергоринку важливим є також економічний аналіз роботи МГЕС [6]. Оптимізація графіків виробітку, раціональне використання водних ресурсів та правильне прогнозування навантаження дозволяють підвищити прибутковість експлуатації станцій та скоротити витрати на резервування потужностей. У деяких регіонах МГЕС відіграють ключову роль у формуванні енергетичної незалежності місцевих громад.

Проведений аналіз роботи електричних мереж з МГЕС показав, що основними факторами, які впливають на стабільність енергосистеми, є:

- нерівномірність гідрологічного режиму протягом року (сезонні коливання виробітку до  $\pm 30\%$ );
- нестабільність напруги у вузлах при зміні навантаження (відхилення до  $5\text{--}7\%$  від номінальної);
- зниження коефіцієнта потужності під час роботи у часткових навантаженнях;
- обмежена пропускна здатність існуючих ліній електропередавання.

Для мінімізації цих впливів запропоновано комплекс технічних та організаційних рішень:

- впровадження автоматизованих систем моніторингу параметрів напруги та потужності;
- установка пристроїв компенсації реактивної потужності;

- оптимізація графіків роботи МГЕС відповідно до попиту на електроенергію у регіоні;

- використання систем накопичення енергії для балансування виробітку в години пікового навантаження.

Дослідження результатів впливу запропонованих заходів виконувалось шляхом моделювання режимів електричної мережі із підключеною МГЕС потужністю 1,2 МВт у середовищі DIgSILENT PowerFactory. Результати показали, що застосування автоматичного регулювання напруги дозволяє зменшити відхилення з  $\pm 6\%$  до  $\pm 2\%$ , а коефіцієнт корисної дії системи електропостачання зріс на  $4\text{--}5\%$ .

Таким чином, практичне впровадження розроблених заходів сприятиме покращенню режимів роботи електричних мереж з МГЕС та раціональній інтеграції станцій у загальну енергетичну систему.

### Список літератури

- [1] Jung J., Jung S., Lee J., Lee M., Kim H.S. Analysis of Small Hydropower Generation Potential: (2) Future Prospect of the Potential under Climate Change. *Energies*, 2021, vol. 14, p. 3001, doi: <https://doi.org/10.3390/en14113001>.
- [2] Довгалюк О. М., Піротті О. Є., Макєєв А. С. Роль малих гідроелектростанцій в енергетичній системі України. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXXII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2025, Харків: НТУ "ХПІ", 2024, с. 109.
- [3] Суходоля О. М., Сидоренко А. А., Бегун С. В., Білуха А. А. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України. Аналітична доповідь. НІСД, 2014. 54 с.
- [4] Хоменко В. О., Лежнюк П. Д. Аналіз стану та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні. Експлуатація малих ГЕС та каскадів малих ГЕС у сучасних умовах. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2012, № (6), с. 118–123, doi: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1343>.
- [5] Dovgalyuk O., Lazurenko A., Lukhtura N., Saidov S. Increasing the small hydropower plants efficiency in Ukraine through the application of automatic control system modes. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, Ukraine, 2017, p. 367–370, doi: 10.1109/YSF.2017.8126649.
- [6] Довгалюк О. М., Піротті О. Є., Макєєв А. С. Участь ГЕС в забезпеченні режимів ОЕС України. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2022)», Харків: «Друкарня Мадрид», 2022, с. 33–34.

## АНАЛІЗ ПРИЧИН НЕСЕЛЕКТИВНОЇ ДІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

Ю. О. Семененко<sup>1</sup>, О. Гр. Середя<sup>2</sup>, О. Г. Середя<sup>2</sup>, О. Д. Семененко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Український державний університет залізничного транспорту

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<sup>3</sup>Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Актуальною залишається проблема неселективної дії релейного захисту (РЗ) при дугових однофазних замикання на землю (ОЗЗ), які на сьогодні є найпоширенішим порушенням роботи розподільних електромереж середньої напруги 6(10)-35 кВ (СН) з ізолюваним режимом нейтралі. Особливість полягає в передачі електроенергії повітряними лініями (ЛЕП), які є найбільш вразливими через слабку ізоляцію, що і спричиняє високий відсоток їх аварійності. Варіативність топології мереж СН, розгалужена структура ЛЕП та їх протяжність, рельєф розташування, непостійний характер навантажень та значення струмів ОЗЗ суттєво ускладнюють фіксацію як самого факту замикання, так і локалізацію його місця виникнення. Наслідком малих смісних струмів при ОЗЗ в означених мережах є дія РЗ на сигнал без відключення пошкодженої лінії. Інакше пошук і локалізація місця пошкодження триватиме довше нормованого. Предметом проведених досліджень є аналіз причин неселективної дії існуючих захистів електромереж СН при ОЗЗ.

Пошкодження ізоляції фази щодо землі не є аварійним режимом в мережах з ізолюваною нейтраллю, але наслідки, як дугове замикання, зазвичай є важкими, аж до порушення електропостачання. Дуга випаровує струмопровідну жилу та ізоляційні матеріали і може спричинити подвійне замикання на землю. В сільській місцевості переважають повітряні неізолювані сталевалюмінієві ЛЕП. Пошкодження ізоляції тут найчастіше є природним старінням, яке суттєво прискорюється після розрахункового терміну експлуатації. Механічні пошкодження ізоляції спричиняють 11% ОЗЗ. Помилкові дії оперативно-ремонтного персоналу – 9% ОЗЗ. Атмосферні перенапруги за відсутності або виходу з ладу пристроїв захисту – 21% ОЗЗ.

На сьогодні виділяють три класи захисту при ОЗЗ: індивідуальні (інформація надходить лише з одного приєднання); централізовані (інформація щодо струмів надходить з усієї секції); групові, що здійснюють обмін інформацією між апаратами РЗ суміжних секцій.

Індивідуальні захисти є найкращими, оскільки не вимагають значного обсягу монтажних робіт. Струм та напруга нульової послідовності (НП) надходять тільки з одного приєднання. Проте, обмежений обсяг інформації ускладнює алгоритми захисту. Централізовані захисти збирають інформацію про струми НП з усіх приєднань секції, тому вони є найменш привабливими. Різне навантаження на трансформатори НП викликає значну похибку у вимірюванні струму, що і призводить до неселективної дії РЗ. Групові захисти, як підклас централізованих, здійснюють індивідуальний вимір інформації про електричні величини, що спостерігаються. Це знижує похибку вимірювання, з подальшим обміном інформації між пристроями.

Найпоширенішим в електротехнічних комплексах є захист при ОЗЗ, що реагує на величину напруги

НП, але він дозволяють отримати лише неселективну сигналізацію появи замикання в одному з фідерів приєднання, що відходить від секції.

Неспрямований захист реагує на величину струму НП. Стійкість функціонування захисту залежить від конфігурації та однорідності розподільних мереж, що суттєво обмежує сферу його застосування. Для забезпечення високої чутливості та селективної дії необхідно, щоб струм ОЗЗ перевищував струм НП будь-якого приєднання у 8-10 разів. Другим обмеженням неспрямованих захистів є втрата стійкості функціонування при переривчастих замиканнях. В такому режимі струм НП носить нестабільний характер і може бути зафіксований колами захисту як сигнал ушкодження. Режим неповного ОЗЗ супроводжується виникненням у місці замикання перехідного опору, який як параметр контуру НП, знижує значення напруг і, як наслідок, значення струмів НП контрольованих приєднань, що захищаються. Враховуючи те, що уставки на спрацьовування неспрямованих захистів обрані за умови металевих замикань (за відсутності перехідного опору в місці ОЗЗ), неповнота замикання фази на землю буде причиною непрацездатності.

Перехідний опір є причиною непрацездатності не тільки неспрямованих захистів при ОЗЗ, а й захистів, що реагують на вищі гармонійні складові в струмі ОЗЗ. При ОЗЗ через перехідний опір у декілька Ом рівень вищих гармонік різко зменшується, що ускладнює забезпечення селективності та знижує чутливість дії.

Принцип захисту при ОЗЗ, заснований на визначенні напрямку потужності НП в перехідному режимі при неповних замиканнях на землю, виявився неспроможним селективно виявити пошкоджене приєднання у восьми випадках із вісімнадцяти. У трьох випадках взагалі зафіксовано відмову у функціонуванні.

Дія захисту, що використовує як робочий сигнал «накладений» струм частотою 100 Гц і вище, характерним також є малий відсоток селективної дії в умовах замикання через перехідний опір внаслідок збільшення частки контрольованого струму, що протікає повз місце замикання через ємності неушкоджених фаз.

Централізований захисту, виконаний на відносному порівнянні амплітуд або середньоквадратичних значень струмів НП на фідерах, що відходять від збірних шин, функціонує неселективно внаслідок несинхронності або несинфазності контрольованих сигналів. Іншим їх недоліком є помилкова дія в нормальному режимі роботи електромережі при появі на будь-якому вході вимірювального елемента сигналів перешкоди або струмів небалансу.

Метод аналізу параметрів перехідного процесу в НП, коли пошкоджений фідер має максимальну амплітуду струму в перехідному процесі, а на непошкоджених фідерах амплітуди струмів набагато менші, дозволяє фіксацію всіх видів ОЗЗ незалежно від режиму нейтралі.

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ВУЗЛА ДЛЯ АДМІНІСТРАТИВНОЇ БУДІВЛІ

Д. В. Бублій, А. В. Трет'як

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

Енергозбереження та підвищення енергоефективності в Україні має свої особливості. Високий пріоритет енергозбереження протягом довгого часу не супроводжувався ефективними формами та механізмами взаємодії влади, бізнесу і наукового середовища щодо реалізації інноваційних енергозберігаючих технологій. Тому на даний час більшість адміністративних будівель мають застарілу систему опалення, яка не відповідає сучасним вимогам економіки.

У зв'язку з цим останнім часом активізувався пошук способів зменшення витрат на енергію, зокрема, розроблення різноманітних систем автоматики для теплових вузлів цивільних будівель і це важливий крок у підвищенні енергоефективності та модернізації інфраструктури країни в цілому. Старі системи управління теплом призводять до зростання витрат на енергоресурси та зниження ефективності опалення. Впровадження сучасної автоматики дозволяє краще регулювати температуру та тиск теплоносія в залежності від потреб будівлі та погодних умов, що зменшує втрати тепла і забезпечує стабільну температуру в приміщеннях. Оновлення теплового вузла відповідатиме сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки, що дозволить знизити споживання енергії та експлуатаційні витрати.

Метою даної роботи є обґрунтування ефективності та доцільності розроблення сучасної автоматизованої системи для підвищення ефективності опалення адміністративної будівлі, з можливістю більш точного контролю температури, зменшення теплових втрат і покращення загальної енергоефективності будівлі в цілому.

Особливу увагу слід приділити інтеграції нових системи з існуючими інженерними мережами будівель, щоб уникнути великих витрат на повну заміну інфраструктури.

Також важливим є забезпечення можливості віддаленого моніторингу та керування тепловим вузлом, що дозволить швидко реагувати на зміни зовнішніх умов та потреб будівель, мінімізувати ризики аварій та забезпечити безперебійну роботу системи опалення.

Крім того, автоматика дає можливість швидко діагностувати несправності та зменшити час на їх усунення. Це стане важливим кроком у загальній модернізації державної інфраструктури, що спрямовано на покращення енергоефективності та виконання сучасних стандартів сталого розвитку.

Наразі питання енергетики мають особливу важливість для нашої країни, особливо враховуючи збройну агресію з боку росії. Тому розвиток енергозбереження, в тому числі в будівництві, є актуальним і потребує постійного вдосконалення.

Більшість цивільних будівель в містах отримують теплоносій з централізованої системи опалення,

тому процеси регулювання та розподілення тепла можна виконувати тільки в рамках конкретної будівлі. Для вирішення цієї задачі може бути використано систему з індивідуальним тепловим вузлом (рис.1).

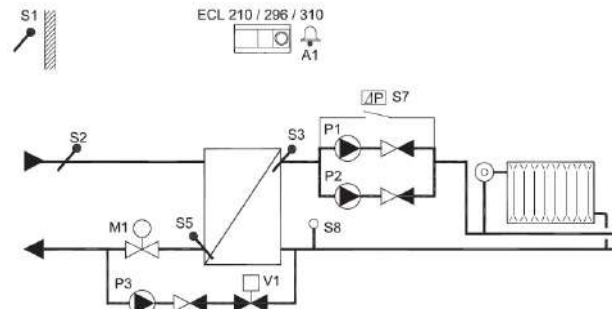


Рис. 1. Система опалення незалежно приєднана до теплової мережі із контролем роботи двох циркуляційних насосів (основний/резервний) і функцією підживлення

Контроль температури теплоносія, що подається в систему опалення (S8) виконується в залежності від температури подачі в первинному контурі (S2) та температури на вулиці (S1). Регулювання здійснюється моторизованим регулятором (M1). Керування системою може бути виконано за допомогою електронного регулятора, наприклад, ECL Comfort 310.

Подальші дослідження та аналіз можуть допомогти у виборі найефективніших рішень з урахуванням специфіки будівлі, фінансових можливостей та потреб користувача.

Згідно з практичними даними, автоматизовані вузли управління можуть зекономити приблизно 25-37% теплової енергії, забезпечуючи при цьому комфортні умови в кожному приміщенні.

### Список літератури

- [1] Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів: підручник / І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. Київ.: Вид. Ліра-К, 2015. 378 с.
- [2] Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Підручник / І.О. Самойленко, О.Г. Гриб, А.О. Запорожець та ін. Харків, 2020. 348 с.
- [3] Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання: монографія / за заг. ред. О. М. Гаврися. Харків: НТУ "ХПІ", 2015. 209 с.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

О. А. Загайнова, К. П. Попенко, Д. Д. Германчук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Через виклики, що спричинені війною та регулярними атаками на енергетичну інфраструктуру, а також світові тренди розвитку відновлювальної генерації Україна повинна робити кроки по підвищенню енергоефективності в мережах, що проектувалися під централізовану генерацію, а не під децентралізовані та несталі потоки енергії. Актуальним є питання дослідження проблеми зменшення витрат в процесі передачі та розподілу електричної енергії з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).

В даній роботі представлений аналіз основних груп витрат, тренди по модернізації мереж та технологічні рішення що призвані підвищити енергоефективність впровадження ВДЕ.

До 2030 року очікується подвоєння обсягів електроенергії, виробленої з ВДЕ, що вимагає суттєвої модернізації мережевої інфраструктури для ефективної її передачі направлену на зменшення витрат [1].

Втрати потужності в електричних мережах загалом класифікуються на технічні та нетехнічні компоненти. Перші виникають через притаманні фізичні принципи, такі як резистивний нагрівання провідників та неефективність трансформаторів. Причинами нетехнічних витрат є недосконала система обліку споживання енергії обумовлена крадіжками, неточностями вимірювання або адміністративна неефективністю [2].

Основними способами підвищення енергоефективності є застосування вдосконалених провідників HTLS(High-Temperature Low-Sag), що призначені для роботи за підвищених температур, кабелів постійної напруги HVDC; оптимізацію напруги шляхом регулювання її рівнів; компенсацію реактивної потужності з використанням шунтових компенсаторів (SVC та STATCOM) синхронних конденсатори, та інших; технології інтелектуальних (Smart) мереж в комплекті з датчиками, моніторинг у режимі реального часу та автоматизовані системи керування, що можуть значно зменшити навантаження на електромережі. Ці технології дозволяють оптимізувати потік потужності, балансування навантаження та виявлення несправностей [2].

Розвиток розподіленої генерації є ще одним з важливих напрямів підвищення енергоефективності. Децентралізація генерації дозволяє зменшити транспортні втрати завдяки розміщенню джерел ближче до споживача. Це сприяє оптимізації навантажень у мережах, покращенню показників напруги та зменшенню навантаження на магістральні лінії. Водночас інтеграція ВДЕ підвищує гнучкість енергосистеми та стійкість до аварійних відключень [3].

Статтею 15 Закону України «Про енергетичну ефективність» передбачене стимулювання енергоефективності у сфері передачі та розподілу електричної енергії. Це планується робити через впровадження "розумних мереж", що включатимуть в себе:

системи моніторингу та управління, системи інтелектуального обліку електроенергії, інтеграцію установок зберігання енергії, розвиток каналів зв'язку та кібербезпеку [4].

В таблиці 1 наведено значення у відсотках зниження технічних втрат у порівнянні з традиційними мережами без модернізації. Фактичний ефект залежить від типу мережі (передавальна / розподільна), ступеня автоматизації та рівня інтеграції ВДЕ.

Таблиця 1. Зменшення витрат в мережі

Спосіб модернізації	Зменшення витрат, %
Застосування провідників HTLS	3–5
Застосування кабелів HVDC(порівняно з АС-лініями)	30–40
Регулювання рівнів напруги	2–4
Компенсація реактивної потужності (SVC, STATCOM)	4–6
Технологія інтелектуальних (Smart) мереж	5–8
Моніторинг системи керування (SCADA, DMS)	2–3
Введення розподільної генерації ВДЕ	5–10
Інтеграція локальних вітрових установок та систем накопичення енергії	10–15

Як видно з переліку способу зменшення витрат Закон України приділяє увагу багатьом технологіям, проте мало уваги приділено розподільній генерації та модернізації мереж передавання. А найбільший сумарний ефект (до 25–30% зниження витрат) досягається при комплексному впровадженні кількох технологій одночасно.

### Список літератури

- [1] Electricity Grids and Secure Energy Transitions 2023. URL: <http://www.iea.org/corrections> (дата звернення: 15.10.2025).
- [2] Technical Losses in Power Networks: Mechanisms, Mitigation Strategies, and Future Directions Authors: Pooya Parvizi, Milad and others URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/17/3442> (дата звернення: 15.10.2025).
- [3] Костенко Г. П., Запорожець А. О., Запорожець Н. В., Верпета В. О. Аспекти інтеграції відновлюваної розподіленої генерації в систему енергозабезпечення України. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-83-93> (дата звернення: 15.10.2025).
- [4] Закон України Про Енергетичну ефективність Документ 1818-IX, від 01.01.2025, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення: 15.10.2025).

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРАХУНКОВОЇ ПРОГРАМИ «МАЕСТРО»

В. С. Орлов, І. В. Хоменко, А. В. Шкрібела, Д. В. Серенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Представлено результати дослідження впливу компенсації реактивної потужності (РП) на втрати електричної енергії в розподільчих електричних мережах за умов інтеграції відновлюваних джерел енергії. Об'єктом дослідження є фрагмент мережі класу напруги 35–110 кВ. Мережа напругою 110 кВ в цьому дослідженні має замкнену конфігурацію, тоді як мережа 35 кВ є розімкненою (у вигляді відгалужень). Враховано типи трансформаторів, установлених на підстанціях, а також типи та протяжність повітряних і кабельних ліній електропередавання. До всіх вузлів навантаження підключені нетрадиційні (відновлювані) джерела енергії, зокрема сонячні фотоелектричні станції та вітрові електроустановки. Параметри навантаження вузлів визначено з урахуванням генерації цих джерел.

Актуальність роботи зумовлена зростанням частки децентралізованої генерації, що істотно змінює режими роботи розподільчих систем та підвищує вимоги до їх енергоефективності. Проблема компенсації РП сама по собі залишається актуальною, доки існують великі енергосистеми. Сучасні технології, зокрема поновлювані джерела енергії, ускладнюють завдання керування РП. Попри можливі зміни в структурі енергетики (наприклад, розвиток розподіленої генерації), потреба в керуванні РП не зникне. Навіть у децентралізованих системах, де працюють великі споживачі (насамперед, промислові підприємства), необхідно вирішувати проблему компенсації, щоб забезпечити стабільність, ефективність і якість електропостачання.

Компенсація РП в мережах – один із можливих та ефективних заходів, що забезпечують зниження втрат в електричних мережах, проте ефективність цього заходу значною мірою залежить від того, наскільки вдало обрані місця встановлення додаткових компенсуючих пристроїв в електричній мережі. У той самий час алгоритми пошуку найбільш ефективних місць установки додаткових компенсуючих пристроїв ще вимагають розробки та вдосконалення, оскільки за неправильному виборі місць установки знижується їх ефективність, що веде збільшення витрат без отримання помітного позитивного ефекту [1]. На основі виконаних розрахунків визначено вплив компенсації РП в окремих вузлах на зменшення втрат у всій мережі загалом.

Моделювання розрахункового фрагменту електромережі проведено із застосуванням програмного комплексу «МАЕСТРО» [2], який дає змогу здійснювати аналіз усталених режимів роботи мережі з урахуванням поздовжніх та поперечних параметрів елементів схеми заміщення. Методика дослідження передбачала варіювання рівня реактивної потужності на стороні споживачів та виконання серії розрахунків

усталених режимів із подальшою фіксацією втрат потужності на кожній ділянці мережі.

Отримані результати засвідчили, що найбільший ефект від компенсації реактивної потужності досягається у найбільш навантажених вузлах мережі, що підтверджується зміною розподілу потоків потужності. Вузли, які за рахунок роботи відновлюваних джерел енергії функціонують у генераторному режимі, чинять істотний вплив на баланс активної та реактивної потужності. Розрахунки показали, що встановлення компенсуючих пристроїв у одночасно у кількох вузлах із прохідними підстанціями напругою 35 кВ забезпечує зниження втрат активної потужності на 22,3 % та реактивної потужності на 10,6 %.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування компенсації реактивної потужності як засобу зменшення втрат та одного з ключових інструментів підвищення енергоефективності розподільчих мереж в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії. Найбільш ефективним технічним рішенням у цьому напрямі є використання засобів компенсації реактивної потужності (ЗКРП) на базі батарей статичних конденсаторів [3]. Практична реалізація передбачає визначення оптимальних параметрів розміщення, типу та потужності ЗКРП із урахуванням техніко-економічних критеріїв. Перспективним напрямом подальших досліджень є поєднання методів оптимізації з технологіями SmartGrid [4], що забезпечить підвищення адаптивності та керованості розподільчих енергосистем до сучасних умов експлуатації.

### Список літератури

- [1] Веприк Ю. М. Вибір оптимальних місць встановлення компенсуючих пристроїв в електричних мережах. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 41. – С. 36-41.
- [2] Веприк Ю. М. Програма W\_ МАЕСТРО розрахунку стаціонарних режимів електричних мереж методом Ньютона. *Методичні вказівки по застосуванню*. НТУ «ХПІ» ; скл.: Ю. М. Веприк, О. О. Загайнова. - Х. : НТУ «ХПІ», 2013. - 23 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 23
- [3] Хоменко І.В., Піскурьов М.Ф., Стасюк І.В. (2018). До питання компенсації реактивної потужності в електричних системах. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів*. Теорія і практика, (32 (1308)), 71–76. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.13>
- [4] Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. *Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навчальний посібник*. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с.

## ОРГАНІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ MICROGRID МЕРЕЖ

Н. П. Савченко<sup>1</sup>, Т. К. Бараненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup>Приазовський державний технічний університет, Дніпро, Україна

Децентралізація та розосереджена генерація на сьогодні є основою для розвитку та побудови сучасних електроенергетичних систем, а інтелектуальне керування та інформаційні технології сприяють узгодженню процесів генерації, розподілення та споживання електричної енергії в них. Такий синергізм новітніх технологій в енергетичній галузі призвів до появи інтелектуальних мереж Smart grid та Microgrid, як їх різновиду. Принципи побудови Microgrid мереж базуються на інтеграції різних джерел та систем накопичення енергії у одній електроенергетичній системі. Особливістю таких локальних мереж є їх можливість роботи як у автономному «острівному» режимі, так і з підключенням до загальної мережі, при повній автоматизації регулювання енергоспоживання та виробництва. Системи накопичення енергії є невід'ємною частиною Microgrid мереж та відіграють центральну роль у надійній та стабільній їх роботі.

Метою даної роботи є обґрунтування ефективного поєднання різних типів накопичувачів енергії у гібридній системі накопичення енергії для застосування у складі локальних Microgrid мереж.

Технології накопичення та зберігання енергії останнім часом отримали доволі бурхливий розвиток. Існує п'ять найбільш досліджених технологій накопичення енергії [1, 2]:

- електрохімічна технологія (класичні та новітні типи акумуляторів);
- електрична технологія (суперконденсатори та надпровідникові магнітні акумулятори SMES);
- механічна технологія (ГАЕС, накопичувач енергії стиснутого повітря CAES, накопичувач енергії зрідженого повітря LAES, кінетичний накопичувач, потенціальний накопичувач);
- хімічна технологія (накопичення Гідрогену, синтетичного метану, аміаку, метанолу з їх подальшим паливним або іншим використанням);
- термічна технологія (гаряча вода, високотемпературні рідини, розплави солей).

Наведені вище технології накопичення енергії також можна класифікувати за величиною ємності та часом реакції на короткотермінові, середньотермінові та довготермінові [2].

Таким чином, комбінування різних типів накопичувачів енергії у складі системи накопичування енергії Microgrid мережі є цілком обґрунтованим з точки зору забезпечення надійності енергопостачання споживачів та забезпечення високих якісних показників електроенергії, що постачається.

Для Microgrid мереж найбільш доцільним є організація гібридної системи накопичення енергії з наступними видами накопичувачів (рис. 1) [3, 4]:

- акумуляторні батареї (АКБ) для довготривалого зберігання енергії;

- блок суперконденсаторів (СК) для швидкого покриття піків навантаження;
- кінетичні накопичувачі (КЕН) для швидкого покриття піків навантаження;
- потенціальні накопичувачі (ПЕН) для довготривалого зберігання енергії та швидкого покриття піків навантаження.

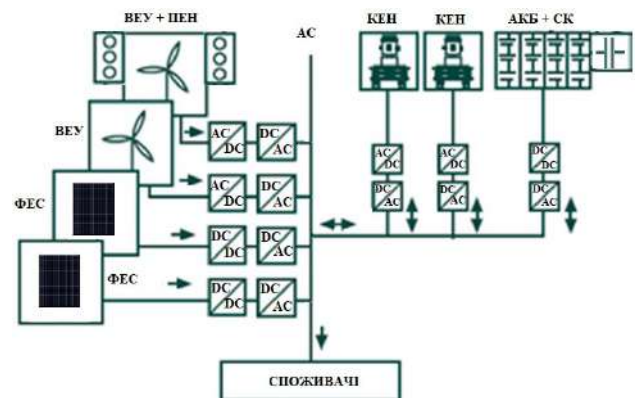


Рис. 1. Узагальнена схема Microgrid мережі з гібридною системою накопичення енергії

Комбінація наведених на рис. 1 накопичувачів енергії у одній системі для Microgrid мережі потребує індивідуального підходу у кожному конкретному випадку після повного детального аналізу її режимів роботи.

Перевагою запропонованого рішення організації гібридної системи накопичення у складі Microgrid мереж є підвищення загальних показників енергоефективності усієї електроенергетичної системи.

### Список літератури

- [1] Мирутенко, П. П. Накопичувачі енергії. Основні типи та перспективи використання / П. П. Мирутенко, Л. К. Лістовщик // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2022. – № 4. – С. 107-116. – Бібліогр.: 27 назв. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433>
- [2] Фіалко Н.М., Тимченко М.П. Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення. *Промислова теплотехніка*, 2017, №4 (39), С. 44-54.
- [3] Савченко Н.П. Регулювання графіка навантаження споживача-регулятора з гібридними системами електропостачання // *Сучасна траєкторія розвитку науково-технічного прогресу в Україні та світі : колективна монографія / За заг. ред. Т. А. Ємел'янової. Львів-Торунь: Ліга-Прес, 2021. С. 349-388.*
- [4] Савченко Н.П., Трет'як А.В. Системи автономного безперебійного електропостачання з гібридними накопичувачами енергії для малопотужних споживачів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, Київ, 2019, №30 (69), С. 20-24.

## РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕФЕКТІВ МАСЛОНАПОВНЕНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА КОМПЛЕКСОМ ДІАГНОСТИЧНИХ КРИТЕРІЇВ

О. С. Кулик

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У більшості як широко відомих [1], так і відносно нових [2] методів для розпізнавання типу дефекту за результатами аналізу розчинених газів (АРГ) використовується однорідний діагностичний простір. Тобто тип дефекту встановлюється або за процентним вмістом газів, або за значеннями співвідношень газів, або за допомогою номограм дефектів. Однак на практиці можливі ситуації, коли для достовірного розпізнавання типу дефекту недостатньо використовувати діагностичний простір, сформований тільки одним діагностичним критерієм. Особливо це стосується розпізнавання комбінованих дефектів. Так, наприклад, значення відношень газів при низькотемпературних перегрівках, які переходять в часткові розряди, знаходяться в тому ж діапазоні значень, що і значення відношень газів для низькотемпературних перегрівів [3]. Така ж ситуація має місце для деяких типів високотемпературних перегрівів, які супроводжуються розрядами і високотемпературними перегрівками [4], і для високотемпературних перегрівів, які супроводжуються розрядами і іскровими розрядами. Аналогічний збіг спостерігається і для процентного вмісту газів. У зв'язку з цим для підвищення достовірності розпізнавання типу дефектів виникає необхідність формування комплексного діагностичного простору і розробки процедури прийняття рішення.

При формуванні комплексного діагностичного простору дуже важливо враховувати діагностичну цінність кожної з можливих координат, щоб уникнути так званого «прокляття розмірностей», коли збільшення розмірності діагностичного простору за рахунок використання малоінформативних діагностичних ознак призводить до зниження достовірності розпізнавання. Якщо координати номограм дефектів і процентний вміст газів логічно задавати повністю для всіх п'яти газів, то кількість заданих співвідношень газів слід ретельно обґрунтувати. В даний час різними методиками для розпізнавання типу дефекту використовуються наступні співвідношення газів [1, 2]:  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ . Очевидно, що не всі з цих співвідношень є характерними для тих чи інших дефектів. Наприклад, значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$  є визначальним при розпізнаванні низькотемпературних перегрівів, при яких газом з максимальним вмістом є  $\text{C}_2\text{H}_6$ , в той же час при розпізнаванні більшості інших дефектів дане відношення може приймати будь-які значення. У зв'язку з цим найбільш оптимальним буде використання наступних співвідношень:  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ , і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ .

Наявні в розпорядженні автора результати АРГ по 3449 одиницях маслонаповненого обладнання з верифікованими дефектами різного типу дозволяють їх використовувати в якості еталонів і, як наслідок, використовувати метричні методи розпізнавання. У цьому випадку діагностований об'єкт представляєть-

ся у вигляді точки в багатовимірному просторі, яке утворено значеннями співвідношень газів, процентного вмісту газів і співвідношеннями концентрацій всіх газів до газу з максимальним вмістом. Необхідно віднести даний об'єкт до однієї з еталонних областей діагнозів, які сформовані з однотипних об'єктів з однаковим діагнозом і також представлені набором відповідних координат. Виконаний аналіз показав, що для оцінки близькості діагностованого об'єкта до тієї чи іншої еталонної області доцільно використовувати або степеневу діагностичну відстань, або міру схожості – косинус подібності.

Наведений у [5] приклад практичної реалізації наведеного підходу показує, що використання комплексного діагностичного простору в сукупності з еталонними областями діагнозів дозволяє достовірно розпізнавати тип дефекту маслонаповненого обладнання навіть у тих випадках, коли використання традиційних методів призводить до відмови від розпізнавання.

### Список літератури

- [1] Shutenko O., Kulyk O. Comparative analysis of the defect type recognition reliability in high-voltage power transformers using different methods of DGA results interpretation. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020, p. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240911>.
- [2] Shutenko O., Kulyk O. Comparative analysis of new methods for defect type recognition by dissolved gas analysis. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 3–7 October 2022, p. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek57572.2022.9916319>.
- [3] Shutenko O., Kulyk O. Recognition of overheating with temperatures of 150–300°C by analysis of dissolved gases in oil. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020, p. 71–76, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>.
- [4] Shutenko O., Kulyk O. Recognition of combined defects with hightemperature overheating based on the dissolved gas analysis. *Sādhanā*, 2022, vol. 47, no. 3, p. 146. doi: <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01919-x>.
- [5] Shutenko O., Kulyk O. Method of fault-type recognition based on the dissolved gas analysis using a set of diagnostic criteria. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, p. 1–13. doi: <https://doi.org/10.1049/gtd2.13068>.

## РАННЯ ДІАГНОСТИКА СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРНИХ МАСЕЛ ЗА КОМПЛЕКСОМ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК

С. Г. Пономаренко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Накопичення продуктів старіння трансформаторних масел, які утворюються в результаті окислювальних реакцій в процесі тривалої експлуатації (особливо волога і водорозчинні кислоти), призводить не тільки до зменшення електричної міцності масляних проміжків, але і до зниження механічної міцності основної ізоляції трансформаторів. У свою чергу зниження механічної міцності целюлози призводить до скорочення залишкового ресурсу трансформаторів. У таких умовах для продовження залишкового ресурсу трансформаторів доцільно виявляти трансформатори з аномально прискореним старінням масел на ранній стадії, тобто ще до того моменту, як значення показників масел вийдуть за межі нормованих значень.

На жаль, існуюча як в Україні, так і за її межами система оцінки стану трансформаторних масел не дозволяє вирішити це завдання. Для виявлення трансформаторів з аномально прискореним старінням масел на ранній стадії, коли значення показників знаходяться в області допустимих значень, пропонується нормувати значення показників масел залежно від тривалості експлуатації. Фізичним обґрунтуванням можливості реалізації такого підходу є наявність значущої систематичної складової в залежностях показників масла від тривалості експлуатації [1, 2].

Однак інтенсивність старіння масел, а, отже, і швидкість дрейфу показників масел для різних трансформаторів може істотно відрізнятися. Інтенсивність окислювальних реакцій трансформаторних масел визначається як доступом кисню-повітря, а, отже, типом захисту масла в трансформаторі, так і робочою температурою, яка залежить від режимів експлуатації та системи охолодження трансформаторів, а також від кліматичних умов.

Як показано в [3] для трансформаторів з ідентичними системами охолодження та захисту масел, які експлуатуються в схожих кліматичних умовах, основним фактором, що впливає на інтенсивність окислювальних реакцій, є завантаження трансформаторів. Таким чином, нормування значень показників масел у часі здійснювалося з урахуванням не тільки класу напруг трансформаторів, але й з урахуванням їх систем охолодження та захисту масел, кліматичної зони, значень коефіцієнтів завантаження та сорту масел.

Оскільки стан трансформаторних масел визначається за комплексом показників, для нормування значень використовувалася модель множинної регресії виду:  $t=f(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , тобто тривалість експлуатації як функція показників масла. При цьому оцінка ступеня старіння трансформаторних масел проводиться шляхом порівняння значення тривалості експлуатації, розрахованої шляхом підстановки поточних значень показників масла в модель множинної регресії з її реальним значенням.

В якості математичної моделі, що описує зв'язок між показниками масла і тривалістю експлуатації, був використаний поліном вигляду:

$$t^* = b_0 + \sum_{i=1}^p b_{1i} x_i + \sum_{i=1}^p b_{2i} x_i^2 + \dots + \sum_{i=1}^p b_{mi} x_i^m. \quad (1)$$

Порядок полінома заздалегідь не встановлювався, а визначався в процесі навчання моделі (визначення чисельних значень коефіцієнтів регресії при послідовній підстановці в (1) окремих регресорів). Модель вважалася навченою після досягнення глобального максимуму міри згоди, в якості якої використовувалася модифікація коефіцієнта детермінації  $R^2$ , що враховує, з одного боку, кількість заданих для прогнозу контрольних значень часу  $t$ , а з іншого, число  $p$  використовуваних в моделі (1) регресорів.

Наведені в [4, 5] приклади практичної реалізації зазначеного підходу показують, що похибка навчання не перевищує 0,37 року, що свідчить про його високу ефективність.

### Список літератури

- [1] Shutenko O., Ponomarenko S. Reliability assessment of the results of periodic monitoring of the transformer oils condition. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020, p. 77–82, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263141>.
- [2] Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of ageing characteristics of transformer oils under long-term operation conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2022, vol. 46, no. 2, p. 481–501, doi: <https://doi.org/10.1007/s40998-022-00492-7>.
- [3] Shutenko O., Ponomarenko S. Analysis of the impact of power transformer loading on the transformer oil aging intensity. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020, p. 76–81, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250159>.
- [4] Shutenko O., Ponomarenko S. Diagnostics of transformer oils using the multiple linear regression model. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020, P. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240875>.
- [5] Shutenko O., Ponomarenko S. Development of a multiple regression model for early diagnosis of transformer oil condition. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, vol. 47, no. 11, p. 14119–14132, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06418-5>.

## АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ТА ШВИДКОСТЕЙ НАРОСТАННЯ ГАЗІВ В МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ З РІЗНИМ СТАНОМ

О. В. Шутенко, В. В. Довгалюк

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Несвоєчасне виявлення дефектів, що розвиваються в маслонаповненому обладнанні, може призвести не тільки до необхідності виведення обладнання з експлуатації для проведення ремонтних робіт, але і до його аварійного пошкодження. В даний час для виявлення дефектів, що розвиваються, використовуються два критерії: значення концентрацій газів і значення швидкостей наростання газів. Однак граничні значення даних критеріїв, регламентовані відомими міжнародними та національними стандартами, істотно відрізняються [1, 2], що є джерелом невизначеності при використанні різних критеріїв стосовно одних і тих же даних. У зв'язку з цим виникає завдання пошуку критеріїв, які дають змогу виявляти дефекти, що розвиваються, на ранній стадії їхнього розвитку, до того моменту, як значення даних критеріїв перевищать свої граничні значення.

За аналогією з [3] для вирішення даної задачі був використаний підхід, заснований на аналізі динаміки зміни діагностичних ознак у часі. Основна ідея полягає в тому, що в якості критерію наявності дефекту в обладнанні використовуються не чисельні значення концентрацій і швидкостей наростання газів, а характер їх зміни в часі в обладнанні з різним станом.

У процесі досліджень аналізувалися три стани:

- справний;
- справний, але після аварійних впливів з боку електричних мереж (короткі замикання, атмосферні та комунаційні перенапруги тощо);
- дефектний.

Характер динаміки зміни в часі даних критеріїв оцінювався за наявністю статистично значущої систематичної складової в їх залежностях від тривалості експлуатації. Для цих цілей за аналогією з [4] був використаний однофакторний регресійний аналіз. Систематична складова часових залежностей вважалася значущою, якщо за результатами аналізу відкидалася основна гіпотеза про рівність нулю кутового коефіцієнта лінійної регресії, тобто виявлявся значущий вплив тривалості експлуатації на значення концентрацій і швидкостей наростання газів.

В якості вихідних даних для виконання аналізу для справних трансформаторів були використані результати аналізу розчинених в маслі газів по 437 трансформаторів напругою 110-330 кВ, негерметичної конструкції. Остання обставина зумовлює істотні як кількісні, так і якісні відмінності в порівнянні з газомістом герметичного обладнання [5], що обумовлено як процесами дифузії газів в атмосферу, так і зміною якісного складу проб масел через більш інтенсивні окислювальні реакції в негерметичних трансформаторах.

За результатами аналізу встановлено, що в справних трансформаторах негерметичної конструкції зміна в часі як концентрацій, так і швидкостей

наростання газів (у тому числі інтегральних значень швидкостей наростання) має випадковий стохастичний характер, випадкова складова залежностей значно перевищує систематичну.

За умов аварійних впливів з боку мережі в залежності даних критеріїв від тривалості експлуатації має місце короткочасне переважання систематичної компоненти над випадковою складовою, але з плином часу випадкова складова знову починає переважати.

Виконаний аналогічний аналіз по 158 трансформаторах з дефектами різного типу дозволив встановити, що поява дефекту супроводжується не тільки збільшенням значень концентрацій і швидкостей наростання газів, що відомо, але і появою значущої систематичної складової в залежностях даних критеріїв від тривалості експлуатації. При цьому зміни в характері залежностей мають місце ще до того, як концентрація хоча б одного з газів перевищить граничні значення, що дає можливість для раннього виявлення дефектів як при періодичному, так і при безперервному контролі вмісту газів.

### Список літератури

- [1] Абрамов В. Б., Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Порівняльний аналіз середніх ризиків, що виникають під час використання граничних значень концентрацій розчинених у маслі газів для виявлення дефектів у трансформаторах 110 кВ. *Наукові вісники НТУУ «ХПІ»*, 2014, № 6, с. 16–26.
- [2] Shutenko O., Proskurnia O., Abramov V. Comparative analysis of risks which are accompanied by the use of typical and boundary gases concentrations for the diagnostics of high voltage transformers. *Energetika*, 2018, vol. 64, no. 3, p. 137–145, doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i3.3806>.
- [3] Shutenko O. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika*, 2018, vol. 64, no. 1, p. 11–22, doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i1.3724>.
- [4] Шутенко О. В. Аналіз динаміки зміни критеріїв, що використовуються для інтерпретації результатів ХАРГ у бездефектних високовольтних трансформаторах негерметичного виконання. *Електротехніка та електроенергетика*, 2017, № 2, с. 74–83, doi: [10.15588/1607-6761-2017-2-8](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-8).
- [5] Шутенко О. В. Аналіз особливостей газоутворення масел у бездефектних трансформаторах негерметичного виконання. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*, 2017, № 38, с. 84–97.

## РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ ДЕФЕКТІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРИРОЩЕНЬ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗІВ

О. В. Шутенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Розпізнавання типу прогнозованого дефекту є важливим етапом процедури інтерпретації результатів аналізу розчинених газів (АРГ), який багато в чому визначає рішення про можливість подальшої експлуатації обладнання після виявлення дефекту.

В даний час існує велика кількість методів і авторських методик для розпізнавання типу дефекту маслonaповненого обладнання за результатами АРГ [1]. При цьому для розпізнавання типу дефекту використовуються тільки три діагностичні критерії: значення співвідношень газів, значення процентного вмісту газів, значення співвідношень концентрацій газів до газу з максимальним вмістом (номограми дефектів). Чисельні значення даних критеріїв визначаються за значеннями концентрацій газів, отриманих в результаті останніх випробувань, без урахування газового вмісту, який було отримано за результатами попередніх випробувань.

У міжнародному стандарті ІЕС 60599:2022 зазначається, що встановити тип дефекту обладнання можна за різницею концентрацій між результатами останнього і попереднього випробувань. Даний підхід рекомендується використовувати тільки в разі зміни типу дефекту в процесі його розвитку. Однак у відкритих літературних джерелах практично відсутні результати досліджень щодо практичного застосування аналізу приростів концентрацій газів, що і стало причиною підготовки даної публікації.

Для проведення аналізу були використані результати АРГ для 187 трансформаторів, в яких були виявлені дефекти різного типу. Тип дефекту визначався не тільки за значеннями співвідношень газів, але і за значеннями процентного вмісту газів, а також за номограмами дефектів. Дані критерії визначалися як для значень концентрацій газів, так і для їх приростів. На відміну від рекомендацій стандарту ІЕС 60599:2022 значення приростів газів визначалися не тільки в разі зміни типу дефекту, а починаючи з моменту його виникнення і протягом усього його розвитку. Тобто за аналогією з [2-4] аналізувалася динаміка зміни типу дефекту в часі.

За момент виникнення дефекту приймалася не дата випробувань, за результатами яких концентрація одного або декількох газів перевищила граничні значення (це момент виявлення дефекту), а дата випробувань, після якої спостерігалася стійке систематичне зростання концентрацій газів [5]. Такий підхід у підсумку дозволив сформулювати найбільш характерні сценарії розвитку деяких дефектів, наприклад, перегрівів з температурою гарячої точки вище 700°C, іскрові розряди тощо.

За результатами аналізу встановлено, що найбільш ефективно аналіз приростів газів виконувати саме на ранніх стадіях розвитку дефекту, коли відбувається перехід від справного до дефектного стану,

що дозволяє розпізнавати тип дефекту на ранній стадії. При цьому крім відносин газів, для визначення типу дефекту доцільно використовувати і номограми дефектів. У той же час, для формування найбільш характерних сценаріїв розвитку дефектів зручніше використовувати динаміку зміни процентного вмісту газів.

Аналіз приростів концентрацій газів у процесі розвитку дефекту дійсно має сенс при зміні його типу. Якщо тип дефекту в процесі розвитку не змінюється, то діагноз, поставлений за значеннями співвідношень газів і (або) за номограмами дефекту, визначеними за значеннями приростів концентрацій, збігається з діагнозом, поставленим за значеннями цих же критеріїв, але визначених за значеннями безпосередньо концентрацій газів. Деяке виключення становлять термічні дефекти в разі підвищення температури гарячої точки.

В цілому аналіз приростів концентрацій газів є важливим джерелом додаткової діагностичної інформації і може бути використаний для розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ.

### Список літератури

- [1] Shutenko O., Kulyk O., Ponomarenko S. Comparative analysis of existing standards and methodologies for interpreting DGA results: study guide for individual computational and graphical tasks. Kharkiv: Typography Madrid, 2021. 121 p.
- [2] Shutenko O. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases. *Energetika*, 2018, vol. 64, no. 1, p. 11–22, doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v64i1.3724>.
- [3] Shutenko O. V., Barbashov I. V., Omelianenko H. V. Analysis of gas content dynamics in power transformers during development of spark discharge. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2021, vol. 2 (3), p. 3–17, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.07>.
- [4] Шутенко О. В. Аналіз динаміки зміни вмісту газів в маслonaповненому обладнанні з дефектами різного типу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2022, №. 2 (5), с. 90–99, doi: [10.20998/2224-0349.2022.02.13](https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.13).
- [5] Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2018, vol. 18, no. 1, p. 11–18, doi: [10.15546/aeci-2018-0002](https://doi.org/10.15546/aeci-2018-0002).

## ГІБРИДНА ТЯГОВА СИСТЕМА ДЛЯ ПРИМІСЬКОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДУ

Л. В. Овер'янова, Є. С. Рябов, К. І. Іванов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Скорочення споживання енергоресурсів є важливим напрямом діяльності вітчизняних залізниць [1]. Зважаючи на недостатню енергоефективність наявного моторвагонного рухомого складу, який використовується для приміських перевезень, задача його оновлення є актуальною. Це може виконуватися як шляхом модернізації електропоїздів, так і придбанням нового рухомого складу. В обох випадках необхідно забезпечити високі тягово-енергетичні показники рухомого складу шляхом використання енергоефективного обладнання та технологій енергозбереження. До таких належить використання рекуперації енергії. З оцінками, наведеними у [2], використання рекуперації на приміських електропоїздах дозволяє повернути до тягової мережі 26...47% енергії, яка була спожита у тягових режимах. Повне акумулювання енергії рекуперації можливе тільки при автономності цього процесу, для чого необхідне використання бортових накопичувачів енергії. Тому актуальним постає питання розробки тягової системи, обладнаної накопичувачем енергії, для приміського електропоїзду.

Метою даної роботи є розробка та аналіз гібридної тягової системи для приміського електропоїзду з урахуванням експлуатаційних факторів.

Українські залізниці електрифіковані за двома системами тягового електропостачання: постійного струму номінальною напругою 3 кВ та змінного струму номінальною напругою 25 кВ промислової частоти 50 Гц. Діапазон зміни напруги на струмоприймачі складає 2,2...4,0 кВ для тягової мережі постійного струму та 19...29 кВ для тягової мережі змінного струму, відповідно. Підключення системи бортового накопичення енергії до ланки, яка безпосередньо зв'язана з контактною мережею, призведе до впливу напруги контактної мережі на процеси енергетичного обміну у тяговій системі. Це накладе певні обмеження на роботу тягової системи або унеможливіть її роботу при певних станах системи тягового електропостачання та тягової системи [3].

Для забезпечення стабільного енергообміну між тяговим електроприводом та накопичувачем енергії необхідно виключити вплив тягової мережі на процеси енергообміну. Це можливо зробити у випадку, коли напруга проміжної ланки є стабільною (рис.1). Наведений на рис.1 варіант схеми гібридної тягової системи може бути використаний як для двосистемного, так і односистемного рухомого складу [4]. При роботі від контактної мережі змінного струму задіяні трансформатор ТТ промислової частоти та перетворювачі А1 та А2. Схеми цих перетворювачів відповідають схемам чотириквadrантних перетворювачів, використання яких стабілізує напругу  $U_d$  проміжної ланки, а також забезпечує споживання енергії з контактної мережі з високим коефіцієнтом потужності. При роботі від контактної мережі постійного струму перетворювачі А1 та А2 використовуються як бага-

тофазні імпульсні перетворювачі. Для цього здійснюються відповідні перемикання у схемі (контактори на рис.1 не показані). При цьому раціональним є використання обладнання як при живленні від мережі постійного струму, так і при живленні від мережі змінного струму. Іншим варіантом є схема живлення з використанням електронного трансформатора [5].

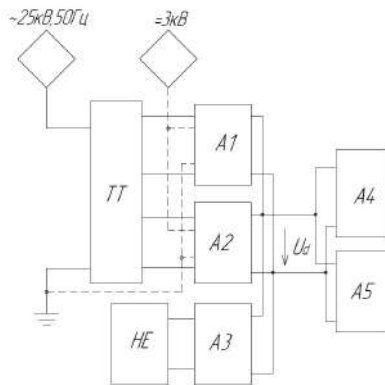


Рис. 1. Варіант схеми гібридної тягової системи: ТТ – тяговий трансформатор; А1, А2 – вхідні напівпровідникові перетворювачі; НЕ – накопичувач енергії; А3 – погоджувальний перетворювач системи накопичення енергії; А4 – модуль тягових інверторів; А5 – модуль перетворювачів власних потреб;  $U_d$  – напруга проміжної ланки

Для запропонованої схеми визначені параметри обладнання для тягової системи приміського електропоїзду потужністю 1700 кВт з бортовими накопичувачем ємністю 10 кВт·год.

## Список літератури

- [1] Ананьєва, О. М., & Червенко О. В. Аналіз методів енергозбереження та енергоефективності та їх впровадження на залізницях України. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту 2024*, Вип. 210, 172-183.
- [2] Буряковський, С. Г., Овер'янова, Л. В., Нешерет, В. О., & Іванов, К. І. Оцінка потенціалу енергозбереження при застосуванні рекуперації енергії на моторвагонному електрорухомого складі для приміських перевезень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2023, 3(15), 52-59 <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.08>
- [3] Sulym, A., Lomonos, A., Bialobrzheskyi, O., Safronov, O., & Khozia, P. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, (3), 59-66. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>.
- [4] Steimel, Andreas: *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience*. Vulkan-Verlag GmbH, 2014.
- [5] Adamowicz, M., & Szewczyk, J. SiC-Based Power Electronic Traction Transformer (PETT) for 3 kV DC Rail Traction. *Energies* 2020, 13(21), 5573. <https://doi.org/10.3390/en13215573>

## ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ МЕТАЛЕВИХ КОМПОНЕНТІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Є. Д. Грозенок, Т. І. Дубовик, В. С. Немашкало

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У роботі розглянуто можливості застосування індукційного нагріву в технологічних процесах виготовлення та обслуговування елементів електричного транспорту залізниць.

Показано зв'язок між параметрами електромагнітного поля, характеристиками матеріалів і тепловими процесами в металі.

Проведено аналіз фізичних ефектів, які визначають енергоефективність процесів термообробки компонентів тягового та ходового обладнання.

Сучасний електричний транспорт залізниць потребує надійних і високоточних технологій обробки металів, що забезпечують довговічність деталей тягових двигунів, редукторів, підшипникових вузлів і гальмівних систем.

Одним із найбільш ефективних методів локального енергетичного впливу є **індукційний нагрів**, який поєднує електромагнітні й теплові процеси.

Індукційні технології дозволяють досягти високої швидкості нагріву, автоматизації процесу, зменшення втрат енергії та покращення екологічних показників у порівнянні з традиційними печами.

Математична модель процесу індукційного нагріву ґрунтується на рівняннях Максвелла та рівнянні теплопровідності Фур'є, що враховують нестационарні зміни електромагнітного поля та теплового стану металу. Під час нагріву металевої заготовки у змінному магнітному полі в ній виникають вихрові струми, які виділяють тепло за законом Джоуля-Ленца.

Особливу роль у процесі нагріву відіграють фізичні ефекти:

- **Скін-ефект** – концентрація струму у поверхневому шарі металу, що визначає глибину нагріву і частоту живильного струму;
- **Ефект близькості** – взаємний вплив магнітних полів кількох провідників, який дозволяє керувати розподілом тепла в зоні нагріву;
- **Кільцевий ефект** – підсилення струму у внутрішніх областях індуктора, що забезпечує рівномірний нагрів деталей кільцевої форми;
- **Крайові ефекти** – спотворення поля біля торців заготовок, які необхідно враховувати при моделюванні нагріву деталей типу валів і кілець.

Розрахунок процесів теплопередачі враховує три основні механізми: теплопровідність у металі, конвекцію в навколишньому повітрі та теплове випромінювання.

Для сталей, які використовуються в елементах рухомого складу, вирішальним є контроль температурного поля при переході через точку Кюрі (близько

721 °С), коли змінюється магнітна проникність і структура матеріалу.

На основі моделі визначаються оптимальні режими індукційного нагріву для:

- термообробки підшипникових кілець колісних пар;
- загартування валів тягових електродвигунів;
- локального відпуску елементів зварних рам візків електропоїздів;
- попереднього нагріву контактних з'єднань та мідних провідників у тягових колах.

Оптимізація процесу проводиться шляхом варіювання частоти живильного струму, геометрії індуктора, швидкості переміщення деталі та коефіцієнтів теплопередачі. Використання чисельного моделювання дозволяє визначити розподіл температури та електромагнітного поля в деталях різної конфігурації, що підвищує точність і відтворюваність процесу.

### Висновки

1. Індукційний нагрів є ефективним методом енергозбереження в технологіях виробництва та ремонту деталей електричного транспорту залізниць.
2. Використання математичних моделей дозволяє забезпечити оптимальні температурні режими з мінімальними втратами енергії.
3. Удосконалення конструкції індукторів і систем керування процесом нагріву відкриває перспективи для широкого впровадження індукційних технологій у тяговому машинобудуванні та сервісному обслуговуванні рухомого складу.
4. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію індукційного нагріву з цифровими системами керування виробничими лініями залізничних депо.

### Список літератури

- [1] E.J. Davies. Conduction and Induction Heating, Pergamon, London, 1990.
- [2] Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2014). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(5), 2509-2520.
- [3] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook. Handbook of Induction Heating. – CRC Press, 2017. – 55 p.
- [4] Induction Process Heating Handbook for Industrial Applications (International Heat Treating Association)
- [5] Mikhail G. Lozinskiĭ Industrial Applications of Induction Heating. – Pergamon Press, 1969.
- [6] Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport Optimization of induction Heaters Design and Operating Modes // - CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Pkwy NW, Suite 300, Boca Raton, Florida, 2006. – 376 pp.

## ІНДУКЦІЙНЕ НАГРІВАННЯ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМООБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Є. Д. Грозенок, Т. І. Дубовик, І. В. Пуха

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Сучасний розвиток залізничного електротранспорту вимагає підвищення надійності, міцності й довговічності деталей при зниженні маси та енерговитрат. Індукційний нагрів – один з найефективніших методів термообробки металів.

Індукційні установки забезпечують точний контроль температури, мінімальні втрати енергії та можливість інтеграції у виробничі лінії. Це особливо важливо для термообробки елементів ходової частини рухомого складу – колісних пар, осей, зубчастих коліс, підшипникових кілець.

Метою роботи було створення чисельної моделі індукційного нагріву заготовок підшипникових кілець зі сталі ШХ15 задля визначення впливу параметрів циклу на рівномірність температурного поля, а також оптимізація енергоспоживання.

Для моделювання застосовано метод скінченних елементів (МСЕ). Геометрія моделі включала індуктор і циліндричну заготовку довжиною  $l=190$  мм, радіусом  $r=50$  мм. У розрахунковій сітці – понад 60 тис. елементів. Вихідні параметри: частота індуктора  $f=800$  Гц, потужність  $W=40$  кВт, час нагріву  $t=300$  с.

Отримано розподіл температури у перерізі заготовки після нагріву до  $T_{\max}=1150^{\circ}\text{C}$ . Температура поверхні  $T_{\text{пов}}=1140^{\circ}\text{C}$ , у центрі  $T_{\text{мін}}=1110^{\circ}\text{C}$ . Різниця температур не перевищує  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ , що відповідає технологічним вимогам. Після охолодження протягом 5 с температура на осі підвищується до  $T_{\text{осі}}=1140^{\circ}\text{C}$  за рахунок внутрішньої теплопровідності.

Для перевірки адекватності проведено експериментальні вимірювання, похибка становила не більше 9 %, що підтверджує достовірність моделі.

Оптимізація параметрів індукційної установки виконувалась у два етапи – при постійній та змінній потужності.

1) Постійна потужність. При варіюванні частоти  $f=400\dots 1200$  Гц і часу циклу  $t=12\dots 20$  с встановлено, що зменшення частоти та збільшення часу циклу зменшує температурну нерівномірність.

Відносне зниження  $\Delta T$  становило 34,4 % при  $t=12$  с та 26,5 % при  $t=20$  с, тоді як енерговитрати зросли лише на 2 %. Для 400 Гц збільшення тривалості циклу з 12 до 20 с знизило  $\Delta T$  на 54,8 % при зростанні енерговитрат на 7,9 %.

2) Змінна потужність. Використано функцію потужності  $W(t)$ , що змінюється за законом:

$$W(t) = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min}) \cdot \sin^2(\pi t / T_{\text{цикл}}), \quad (1)$$

де:  $W_{\min}$  і  $W_{\max}$  – мінімальне й максимальне значення потужності в циклі.

Такий режим дозволяє знизити пікові навантаження на індуктор і зменшити перепад температур у заготовці на 11–14 % при сталому енергоспоживанні.

Температурні поля, отримані після індукційного нагріву, використано як початкові умови для чисельного моделювання процесу гарячого штампування.

Визначено залежності зусиль преса від часу при різних варіантах формування (осадка, один прохід, два проходи). Максимальне зусилля при однопрохідному штампуванні становило 573 тс, при двоетапному – 507 тс, що свідчить про зменшення енергоспоживання на 12 %.

При використанні оптимізованих режимів частоти 400–600 Гц та циклу 18–20 с ККД установки збільшився з 55–60 % до 67 %.

Орієнтовне зменшення енергоспоживання становить 8–10 % без втрати якості нагріву.

Під час промислових випробувань на лінії Л-408 № 1 із нагрівачем Robotherm KSO 1200/1,2-A30 (1200 кВт) проведено вимірювання температур на виході індуктора. Моделювання та експеримент показали збіг температурного профілю по довжині заготовки.

Встановлено, що розроблений алгоритм оптимізації може бути інтегрований у систему автоматичного керування нагрівачем для динамічного регулювання частоти й потужності залежно від геометрії деталі.

Таким чином, розроблено повну математичну модель індукційного нагріву, що поєднує рівняння Максвелла і теплопровідності з урахуванням температурної залежності властивостей сталі. Проведено чисельне моделювання процесу нагріву за методом скінченних елементів, результати якого добре узгоджуються з експериментальними даними (похибка  $\leq 9$  %). Визначено оптимальні режими індукційного нагріву: частота 400–600 Гц, тривалість циклу 18–20 с.

Отримане зниження перепаду температур  $\Delta T$  на 30–50 % та підвищення ККД установки на 10 %. Встановлено, що застосування двоетапного формування підшипникових кілець дозволяє знизити зусилля преса на 12 % і продовжити термін служби обладнання. Розроблений підхід забезпечує стабільну якість термообробки та енергозбереження в процесі виробництва деталей залізничного електротранспорту.

### Список літератури

- [1] Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2014). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2509-2520.
- [2] Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond Cook. *Handbook of Induction Heating*. – CRC Press, 2017. – 55 p.
- [3] *Optimal Control of Induction Heating Processes* By Edgar Rapoport, Yulia Pleshivtseva. – Taylor & Francis Group, 2006. – 370 p.
- [4] Yu. Pleshivtseva, E. Rapoport *Optimization of induction Heaters Design and Operating Modes* // - CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Pkwy NW, Suite 300, Boca Raton, Florida, 2006. – 376 pp.

## ШВИДКІСНІ КОНТАКТНО-АКУМУЛЯТОРНІ ЕЛЕКТРОПОЇЗДИ З НАХИЛОМ КУЗОВА – ПЕРСПЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Б. Г. Любарський, М. І. Стеценко, Б. Х. Єрціян

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Реалізація технології швидкісного залізничного руху можлива шляхом застосування двох основних підходів: по-перше це створення сучасних ділянок залізничної колії пристосованого виключно для швидкісного руху, або використання вже існуючих ділянок при їх частковій модернізації та застосування спеціалізованого рухомого складу з системами нахилу кузова [1-3]. Перший напрямок вимагає значно більших капітальних затрат при реалізації швидкісного руху, однак забезпечує більший пасажиропотік. В умовах відтворення України в післявоєнний час більш перспективною виглядає технологія використання поїздів з нахилом кузова, які забезпечують сполучення на ділянках шляху з пасажирським та вантажним рухом [1-4].

Одним з обмежуючим факторів які обмежують застосування цієї технології це використання системи струмознімання яка одночасно проводить нахил струмоприймача при повороті кузова електропоїзду, яка значно ускладнює конструкцію електропоїзду та доводить додаткові обмеження щодо контактної мережі. Альтернативною технологією є можливо застосування струмоприймачів на неповоротних частинах візків, однак це також значно ускладнює конструкцію транспортного засобу.

Метою роботи є розробка альтернативних підходів для застосування технології нахилу кузова електропоїздів без системи нахилу струмоприймачів.

Сучасний стан розвитку технологій накопичення енергії на залізничному транспорті надає можливість реалізувати систему електричної тяги електропоїздів [4,5], як на ділянках шляху при відносно незначних навантаженнях та роботу plug-in технологій для рухомого складу при частковій роботі тягового приводу від накопичувачів енергії [6,7]. Сучасні накопичувачі, при застосування багатокomпонентної схеми реалізують, як достатню енергоємність, так і потужність накопичувача для реалізації тяги на ділянках з частковою тягою [6].

Розглянувши режими роботи які наведено у роботах [1,7] можливо зробити наступні висновки, що основний режим споживання енергії швидкісними поїздами проходить при їх розгоні до встановленої швидкості руху. У зв'язку з тим, що швидкість при швидкісному русі підтримується приблизно на рівні 180 км/год – 190 км/год на більшості ділянок то основне енергоспоживання зосереджено на відносно невеликій ділянці шляху де проходить розгін потягу. Таким чином авторами пропонується створення технології швидкісного руху при якій електрорухомий склад здійснює розгін на спеціально підготовленої ділянці шляху без нахилу та кривих ділянок при додатковому підсиленому живленні. Далі електропоїзд відключається від контактної мережі та переходить в режим автономної тяги від бортових накопичувачів та з режимами нахилу кузова.

Така технологія дозволяє використовувати струмоприймачі звичайної неповоротної конструкції та модернізувати лише незначну ділянку колії. Крім того зосередженість систем енергопостачання на підсиленій ділянці шляху надає можливість зменшити витрати в контактній мережі. Ще однією перевагою є можливість застосування поїздів на частково електрифікованих або знеструмлених ділянках шляху якими буде характеризуватися залізничне сполучення України в післявоєнний стан.

При аварійному зниженні швидкості руху поїзд може продовжити рух у режимі звичайного електропоїзду до спеціалізованої швидкісної ділянки вимкнувши режим нахилу. Створення спеціалізованих ділянок шляху раціонально безпосередньо за залізничними станціями які здебільшого мають достатній рівень енергозабезпечення.

Проведений розрахунковий аналіз також доводить можливість розробки вітчизняних топких запобіжників середньої напруги для захисту ВТН з литою ізоляцією, які по своїм характеристикам не будуть поступатися кращим закордонним аналогам.

### Список літератури

- [1] Теоретичні основи для вибору і оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.22.09 / Б.Г. Любарський ; Нац. техн. ун-т "ХПІ". – Х., 2014. – 36 с.
- [2] Якунін Д. І. Електромеханічна система приводу з лінійним двигуном для нахилу кузовів швидкісного рухомого складу : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / НТУ "ХПІ". – Харків, 2010. – 202 с.
- [3] Єрціян Б. Х. Імітаційне моделювання комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду / Б.Х. Єрціян, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Механіка та машинобудування. - 2015.- № 1. - С. 48-55
- [4] Озулу А. Б., Любарський Б. Г. Обговорення результатів математичного моделювання рекуперації коливань кузова електропоїзда. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXXI Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023 р. / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ". 2023. С. 68.
- [5] Ozulu A., Liubarskyi B., Iakunin D., Dubinina O. Synthesis of an electromechanical system of body tilt and recuperation of vibration energy for a high-speed electric train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. №5(1 (125)). P. 6–14.
- [6] Goolak, S., Kondratieva, L., Riabov, I., Keršys, A., & Makaras, R. (2023). Research and optimization of hybrid on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry rail transport. *Energies*, 16(7), 3293.
- [7] Овер'янова Л.В. Визначення параметрів та оцінка властивостей електромеханічних інерційних накопичувачів енергії для приміських електропоїздів. На правах рукопису. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.09 / Л.В. Овер'янова ; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". – Х., 2014. – 21 с.

## УДОСКОНАЛЕННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВА ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

В. О. Козьма, Д. І. Якунін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Одним із напрямів підвищення швидкості руху та комфорту пасажирів без потреби в масштабній реконструкції інфраструктури є застосування технології нахилу кузова у високошвидкісних електропоїздах.

Дослідженню підлягають принципи, конструктивні особливості та ефективність систем нахилу кузова, що забезпечують зменшення дії відцентрових сил і підвищення стійкості поїзда. Задля підвищення ефективності систем нахилу кузова [1] електрорухомого складу пропонується удосконалення пневматичної підвіски за рахунок введення до її складу пневматичного циліндра подвійної дії. Запропоноване рішення дозволяє зменшити витрати стисненого повітря та забезпечує плавніше регулювання кута нахилу кузова під час руху по кривих ділянках колії.

Відомо, що бокове прискорення при русі по кривій визначається співвідношенням  $a = V^2/R$ , де  $V$  – швидкість руху, м/с;  $R$  – радіус кривої, м.

Для зменшення дії бокових прискорень у сучасних потягах застосовуються системи нахилу кузова. Кут нахилу кузова  $\theta$  компенсує бокову складову прискорення, яке відчуває пасажир:

$$a_H = (V^2/R) \cdot \cos(\varphi + \theta) - g \cdot \sin(\varphi + \theta), \quad (1)$$

де:  $\varphi$  – кут піднесення зовнішньої рейки,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Такі системи дозволяють підвищити швидкість проходження кривих на 25–30 % без суттєвого збільшення навантажень на колію та збереження комфорту пасажирів.

Згідно з [2], поїзди з нахилом кузова поділяються на пасивні (маятникові) та активні, у яких кут нахилу задається електромеханічним або гідравлічним приводом. Активні системи забезпечують кут нахилу до  $7^\circ$ , однак потребують значних енерговитрат і складного обслуговування.

На кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП» було досліджено гібридну систему нахилу кузова, в якій основний нахил здійснюється лінійними електродвигунами втяжного типу, а додаткове регулювання кута виконується за рахунок пневморесор вторинної підвіски.

Запропонована система складається з двох пневморесор великого ходу; двостороннього пневмоциліндра подвійної дії; електромеханічного лінійного приводу втяжного типу; електронного блока керування з адаптивним алгоритмом.

При зміні радіусу колії система розподіляє тиск у пневморесорах так, щоб кузов нахилився на заданий кут. Рух повітря між ресорами здійснюється через керований двоходовий пневмоциліндр, який з'єднує ліву та праву пневморесори. Під час цього повітря не випускається в атмосферу, що мінімізує витрати.

Рівняння рівноваги кузова при нахилі має вигляд:

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + k\theta = M + \frac{V^2}{R} \cos(\varphi), \quad (2)$$

де:  $M$  – маса кузова,  $c$  – коефіцієнт демпфування системи,  $k$  – жорсткість пневморесор.

Додаткове введення пневмоциліндра подвійної дії дозволяє змінювати ефективну жорсткість  $k_{\text{еф}}$  системи:

$$k_{\text{еф}} = k_0 + \frac{pA^2}{V}, \quad (3)$$

де:  $p$  – тиск у ресорі,  $A$  – площа поршня,  $V$  – об'єм камери. Це забезпечує плавне регулювання нахилу в межах  $0 \dots 7^\circ$ . Введення довгоходових пневморесор дозволяє зменшити масогабаритні показники лінійних двигунів.

Класична система пневморесор із випуском повітря під час нахилу витрачає об'єм повітря  $Q$ . У запропонованій схемі з внутрішнім перетіканням повітря  $Q \approx 0$ , що зменшує споживання повітря до 80–90 % у порівнянні зі стандартною схемою.

З урахуванням питомих витрат на роботу компресора, очікуване зниження енергоспоживання компресора становить близько 12 % для потяга з 10 вагонів.

Для аналізу динаміки кузова використовувалася модель із трьома ступенями вільності (крент, тангаж, вертикальні коливання). Вирішення виконано у середовищі MATLAB/Simulink, воно показало зменшення незгашеного бокового прискорення  $a_H$  з  $0,9$  м/с<sup>2</sup> до  $0,45$  м/с<sup>2</sup> при швидкості 120 км/год на кривій радіусом 400 м.

Запропонована гібридна система нахилу кузова поєднує переваги електромеханічного та пневматичного приводів. Введення пневмоциліндра подвійної дії дозволяє регулювати кут нахилу кузова без витрати стисненого повітря, що підвищує енергоефективність і знижує навантаження на компресор. Математичне моделювання показало зменшення бічного прискорення на 45–50 %, що забезпечує підвищення комфорту пасажирів. Система може бути впроваджена у вітчизняні електропоїзди для руху на ділянках зі складним профілем без необхідності перебудови інфраструктури. Подальші дослідження планується спрямувати на синтез оптимального регулятора кута нахилу з використанням нечіткої логіки та експериментальні випробування на дослідному вагоні.

### Список літератури

- [1] Єріцян, Б. Х., Любарський, Б. Г., Якунін, Д. І. Моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту // *Східноєвропейський журнал передових технологій*. – Харків, 2016. – № 2/9(80). – С. 4–17.
- [2] Chopade, S. S. High Speed Tilting Train Technology // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. – 2017. – Vol. 4, No. 12. – Available at: [www.irjet.net](http://www.irjet.net).

## ВИЗНАЧЕННЯ ТИПОВИХ ПОЗДОВЖНІХ ПРОФІЛІВ ШЛЯХУ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МІСЬКОГО РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

В. М. Ляшенко, С. І. Яцько

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

Галузь залізничного транспорту стикається із зростаючим тиском щодо зниження енергоспоживання та мінімізації впливу на навколишнє середовище. У міських системах рейкового транспорту різноманітність елементів поздовжнього профілю перегонів суттєво впливає на споживання енергії рухомим складом.

При моделюванні руху поїздів для з метою дослідження енергоспоживання рухомим складом, особливо з метою вибору його характеристик, важливою є відповідність результатів до реальних умов експлуатації. Реальним профілям перегонів притаманна стохастичність і варіативність; до того ж, інформація щодо них може бути недостатньо достовірною або зовсім відсутньою. Це створює потребу в стандартизованих, «типових» профілях для задач моделювання, які б відображали узагальнені умови експлуатації рухомого складу. Для вирішення цієї задачі пропонується використання кластерного аналізу.

Для виконання кластерного аналізу у рамках даного дослідження були зібрані дані щодо профілів реальних перегонів метрополітенів з відповідними довжинами характерних ділянок та їх приведеними ухилами. При виконанні кластерного аналізу кожний перегон у базі даних характеризувався наступними показниками:

- максимальним значенням ухилу  $i_{max}$ , %;
- стандартним відхиленням розподілу значень ухилу для всього перегону  $\sigma_i$ , %;
- середнім значенням ухилу для всього перегону  $i_{сер}$ , %;
- середньою довжиною сегменту профілю  $L_{сер}$ , м;
- повною довжиною перегону  $L$ , м.

Існує кілька алгоритмів кластерного аналізу. Сюди відносяться кластеризація за методом  $k$ -середніх, ієрархічна агломеративна кластеризація, просторова кластеризація на основі щільності з шумом (DBSCAN) та ін. [1].

Для цього дослідження був обраний метод  $k$ -середніх. Основними його перевагами є обчислювальна ефективність та простота у реалізації. До того ж, потреба попереднього визначення кількості кластерів для розбивки є корисною, так як дозволяє варіювати комплексність результату.

Метою кластерного аналізу є розбиття набору даних  $X$  на  $k$  незв'язних кластерів таким чином, щоб мінімізувати наступну цільову функцію:

$$J = \sum_k \sum_{x_i \in C_k} dist(x_i, \mu_k)^2, \quad (1)$$

де:  $J$  – цільова функція, яку зазвичай називають «загальною сумою квадратів всередині кластера»;  $C_k$  –  $k$ -й кластер;  $x_i$  –  $i$ -й об'єкт з набору даних;  $\mu_k$  – центроїда  $k$ -го кластера;  $dist$  – функція відстані, для якої найчастіше використовуються евклідівська та манхеттенська функції.

Результатом виконання алгоритму є отримання вихідних даних для побудови трьох умовних профілів, що відображають собою типові умови перегонів на метрополітенах:

- I тип профілю – «легкий» - перегон загальною довжиною 1000 м, з найбільшим ухилом 10%;
- II тип профілю – «середній» - перегон загальною довжиною 1300 м, з найбільшим ухилом 30%;
- III тип профілю – «важкий» - перегон загальною довжиною 1700 м, з найбільшим ухилом 40%.

Побудова умовного профілю на основі результатів кластерного аналізу виконувалася за допомогою методу Монте-Карло шляхом випадкової генерації ділянок профілю та їх подальшого припасовування. При цьому параметри згенерованого профілю (максимальний ухил, середня довжина ділянки і т.д.) відповідають параметрам відповідного кластеру.

### Список літератури

- [1] Brian S. Everitt, Sabine Landau, Morven Leese, Daniel Stahl. Cluster Analysis. 5th Edition. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 330 с.
- [2] Ignacio Villalba Sanchis. An Energy-efficient Metro Speed Profiles for Energy Savings: Application to the Valencia Metro. / Ignacio Villalba Sanchis, Pablo Salvador Zuriaga. // Transportation Research Procedia. – 2016. – Т. 18. – С. 226-233. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.12.031
- [3] Ляшенко В. М. Дослідження витрат електроенергії за повторно-короткочасного режиму роботи електрорухомого складу на ділянках різного профілю. / Ляшенко В. М., Устенко О. В., Яцько С. І. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2025. – №211. – с. 181-195. – DOI: 10.18664/1994-7852.211.2025.327149.

## ПЕРЕДУМОВИ ДО РОЗРОБКИ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВІВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З ОГЛЯДУ НА ЄВРОІНТЕГРАЦІЮ УКРАЇНИ

М. В. Лобунько, Д. І. Якунін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

Євроінтеграційний курс України передбачає адаптацію залізничної інфраструктури та рухомого складу до стандартів ЄС. Враховуючи, що Україна потенційно може стати виробником та постачальником сучасного електрорухомого складу для залізниць Європи, актуальним є впровадження сучасних технологій, які підвищують швидкість та комфорт перевезень без суттєвої модернізації колій.

Одним із перспективних напрямів є застосування систем нахилу кузова [1]. Вони дозволяють збільшити швидкість проходження кривих на 20–25 % без зниження комфорту пасажирів. Така технологія успішно використовується у країнах ЄС – Італії, Німеччині, Іспанії, Польщі, Чехії. Саме досвід останньої [2] є найбільш показовим для України, адже її залізнична мережа має подібні профільні та експлуатаційні параметри.

Передумови дослідження. Чеська залізнична мережа довжиною близько 9500 км (з яких понад 3200 км електрифіковано) характеризується великою кількістю кривих малого радіуса. Подібна ситуація спостерігається і в Україні, що робить доцільним використання систем нахилу кузова. Проте сучасні чеські поїзди Škoda 26Ev, які мають конструкційну швидкість 200 км/год, не обладнані такими системами, що обмежує потенціал підвищення швидкості.

Аналіз маршрутів Eх6 та R16 [3] показав, що навіть при модернізації колії, значна частина ділянок має криві з радіусами 300–2200 м. Для таких ділянок використання системи нахилу кузова може суттєво зменшити час руху.

Метою дослідження є оцінка впливу кута нахилу кузова на мінімальний час проходження маршруту та визначення доцільності розробки комбінованої системи нахилу кузова для перспективного електрорухомого складу України.

Основні завдання: змоделювати рух поїзда з різними кутами нахилу кузова; оцінити вплив параметрів підвіски на комфорт і енергоефективність; визначити потенційні вигоди для майбутнього українського рухомого складу.

Для визначення впливу кута нахилу кузова використано залежність  $a = V^2 / R$ , де  $a$  – бокове прискорення,  $V$  – швидкість руху,  $R$  – радіус кривої.

Кут нахилу кузова  $\theta$  разом з кутом нахилу колії  $\varphi$  зменшує дійсне бокове прискорення [4]:

$$a_n = (V^2/R) \cdot \cos(\varphi + \theta) - g \cdot \sin(\varphi + \theta). \quad (1)$$

Дослідження проводилося для кутів нахилу 0°, 2°, 4°, 6°, 8°. За результатами моделювання для маршруту Eх6 час руху зменшився від 6148 с (без нахилу) до 4659 с при нахилі 8°, що відповідає скороченню часу на 24 %. Для маршруту R16 зменшення часу склало 25 %. Найбільший практичний ефект спостерігається при нахилі 4–6°, коли покращується баланс

між енерговитратами та комфортом пасажирів.

На основі отриманих результатів побудовано графік залежності середньої швидкості руху від кута нахилу кузова (рис. 1).

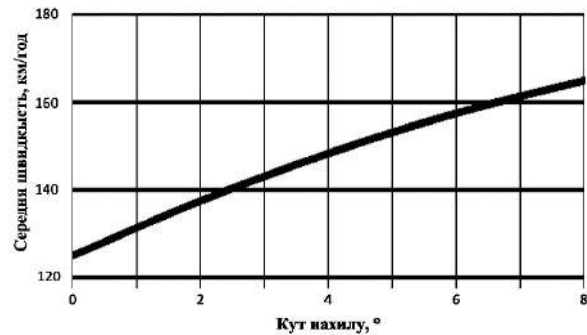


Рис. 1. Залежність середньої швидкості руху від кута нахилу кузовів

Він демонструє суттєве зростання середньої швидкості при збільшенні кута нахилу до 8° без перевищення допустимих норм перевантаження.

Використання комбінованої системи нахилу кузова з пневматичним і електромеханічним приводом дозволяє:

- скоротити час руху на 20–25 %;
- зменшити споживання енергії на 10–15 % завдяки зменшенню кількості гальмувань і розгонів;
- підвищити комфорт пасажирів.

Подальші дослідження передбачають моделювання автоведення потяга на реальних ділянках колії з урахуванням фаз гальмування і розгону. Це дозволить більш точно оцінити потенційний ефект системи та її енергетичну ефективність. Очікується, що застосування комбінованої системи нахилу кузова дасть можливість не лише зменшити час руху, а й знизити витрати енергії, зменшивши кількість циклів гальмування та прискорення.

Таким чином, встановлено доцільність розробки комбінованої системи нахилу кузова для електрорухомого складу України з урахуванням досвіду Чехії. Використання системи дозволяє скоротити час руху по кривих на 20–25 % без погіршення комфорту. У перспективі розробка стане основою для створення українських швидкісних поїздів європейського рівня.

### Список літератури

- [1] Корнієнко В. В., Омеляненко В. І. Високошвидкісний електричний транспорт. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 159 с.
- [2] <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003349-Elektricke-jednotky-na-nasich-kolejich-rada-680>
- [3] <https://www.praguedaily.news/2025/07/20/prague-west-bohemia-rail-upgrade-faster-greener-trains-from-2028/>

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ВІТЧИЗНЯНІЙ ЗАЛІЗНИЦІ

О. О. Якунін, В. Г. Маслієв

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

У сучасних умовах розвитку економіки країн світу швидкість транспортного сполучення відіграє ключову роль. У контексті потенційної євроінтеграції України постає нагальна потреба у ґрунтовній модернізації інфраструктури залізничного транспорту, зокрема електрорухомого складу та колії АТ «Укрзалізниця». Наразі середні швидкості пасажирських перевезень в Україні істотно поступаються європейським показникам. Основною причиною цього є специфіка колії: до третини її протяжності становлять криві ділянки, на яких з міркувань безпеки та забезпечення комфорту пасажирів запроваджено обмеження швидкості. Окрім цього, підвищення швидкісного режиму спричиняє прискорений знос гребнів коліс. Одним із можливих технічних рішень є будівництво окремої високошвидкісної колії з мінімальною кількістю кривих, де радіуси закруглень сягатимуть кількох кілометрів, однак реалізація такого проекту вимагає значних капіталовкладень. У зв'язку з цим більш реалістичним і економічно доцільним видається шлях модернізації існуючого електрорухомого складу шляхом впровадження технологій радіальної установки колісних пар на базі електромеханічних сервоприводів, які керуються єдиною системою забезпечення комфорту пасажирів, спільно з системою нахилу кузова на основі лінійних електромагнітних двигунів. Для обґрунтування такого підходу було здійснено аналіз наявних наукових і технічних джерел з даної тематики.

У публікації [1] підкреслюється, що концепція впровадження швидкісного залізничного транспорту (ШЗТ) отримала широке визнання в економічно розвинених державах. Це зумовлено низкою переваг, серед яких – висока провозоспроможність, підвищений рівень комфорту для пасажирів та істотне скорочення тривалості поїздок. Автори зазначеної роботи доходять висновку, що за умов значної кількості пасажирів швидкісні перевезення можуть стати фінансово самодостатніми. Водночас у дослідженні недостатньо розкрито аспекти, пов'язані з технічними та експлуатаційними викликами, що супроводжують впровадження і функціонування ШЗТ.

У роботі [2] надано рекомендації щодо впровадження швидкісного пасажирського сполучення в умовах АТ «Укрзалізниця». Автори здійснили порівняльний аналіз міжнародних практик, зокрема концепцій окремої високошвидкісної інфраструктури (Іспанія, Японія) та моделі спільної експлуатації колій для швидкісного і вантажного руху (Італія, Німеччина, Польща). Виокремлено сильні та слабкі сторони обох підходів. Виявлено характерні закономірності процесів деградації колії за умов суміщеного використання інфраструктури. Проте в роботі недостатньо висвітлено аспекти зносу гребнів коліс, а також вплив кривих ділянок на динаміку руху та комфорт пасажирів у режимі підвищених швидкостей.

Враховуючи їхню важливість, зазначені проблеми потребують окремого глибокого аналізу.

У дослідженні [3] представлено результати імітаційного моделювання експлуатації вагона метрополітену на ділянці колії з радіусом кривизни 300 м, що є критичним з огляду на інтенсивності зношування як коліс, так і рейок. Отримані дані засвідчили, що впровадження системи радіальної установки колісних пар з електромеханічними сервоприводами у кривих дозволяє суттєво зменшити знос гребнів. Водночас питання можливості підвищення швидкості руху на кривих ділянках залишилося нерозкритим.

У роботі [4] розглянуто потенціал використання систем компенсації залишкового прискорення для підвищення комфорту пасажирів. Було змодельовано комбіновану систему нахилу кузова швидкісного транспортного засобу, яка, як показало порівняння з існуючими аналогами, характеризується надмірною конструктивною складністю. Її експлуатація передбачає значні матеріальні витрати та потребує залучення кваліфікованого технічного персоналу.

Аналіз вищенаведених джерел дозволяє зробити висновок про актуальність досліджень, спрямованих на вивчення впливу підвищення швидкості руху електричних транспортних засобів по інфраструктурі АТ «Укрзалізниця». Особливу увагу при цьому варто приділити розробці та впровадженню технічних рішень, орієнтованих на зниження динамічних навантажень – зокрема систем радіальної установки колісних пар на базі електромеханічних сервоприводів і активного нахилу кузова на базі лінійних електромагнітних двигунів.

### Список літератури

- [1] Lawrence, Martha, Richard Bullock, and Ziming Liu. (2019). *China's High-Speed Rail Development*. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. DOI: 10.1596/978-1-4648-1425-9.
- [2] Tkachenko V. Dynamic interaction of rolling stock and track on high-speed lines combined with freight: monograph / V. Tkachenko, S. Sapronova, N. Braykovska, V. Tverdomed. - Vinnytsia: NGO "European Scientific Platform", 2021. 240 p. ISBN 978-617-8037-58-1. DOI 10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021.
- [3] Matej J, Orliński P. Reducing wheel wear of a motorised metro car on a curved track with a small curve radius. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. (2023); 3-4:25-32. DOI: <https://doi.org/10.53502/RAIL-175921>.
- [4] Б. Х. Єріцян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін (2016). Моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. Харків, №2/9(80), с. 4-17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66782>.

## УДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ КОЛЕКТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ

Є. С. Рябов<sup>1</sup>, Б. Х. Єрціян<sup>1</sup>, Є. В. Лисенко<sup>1</sup>, Є. Г. Чернишенко<sup>1</sup>, А. Ю. Жуков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup>ТОВ «Харківський електро-машинобудівний завод», Харків, Україна

Важливим способом підвищення тягово-енергетичних властивостей маневрових локомотивів є удосконалення його тягового електроприводу. Це може здійснюватися при модернізації, яка широко використовується для оновлення рухомого складу [1]. Для виконання маневрових операцій на АТ «Укрзалізниця» використовують тепловози серії ЧМЕЗ. На промислових підприємствах також використовуються маневрові тепловози, зокрема, серії ТЕМ2. Обидва локомотиви обладнано тяговою електричною передачею потужності з колекторними електродвигунами. При модернізації цих тепловозів зазвичай використовують серійні електродвигуни. У [2] показано, що підвищити енергоефективність тягового колекторного приводу тепловозів можливо шляхом відключення частини тягових електродвигунів у режимах з частковим навантаженням. А для підвищення тягових властивостей тепловозу доцільно використовувати перерозподіл сил тяги між осями тепловозу. Як відомо, у тяговому режимі відбувається перерозподіл навантаження між осями локомотиву, що дозволяє збільшити силу тяги осей, які отримують довантаження [3].

Метою роботи є визначення способів керування тяговим електроприводом маневрового локомотиву, який дозволяє підвищити його тягово-енергетичні властивості.

Для визначення фактичного осьового навантаження у режимі тяги розроблена математична модель згідно рекомендацій [3]. З використанням цієї моделі виконано розрахунки для тепловозу ЧМЕЗ, що дозволило визначити граничні сили тяги з урахуванням перерозподілу осьового навантаження. Розрахунки виконано для таких способів живлення тягових електродвигунів:

а) групове живлення усіх тягових електродвигунів. Це відповідає серійному тепловозу;

б) групове повізкове живлення, при якому три електродвигуни кожного з візків під'єднуються до тягового перетворювача;

в) групове живлення трьох груп електродвигунів, в якій є два електродвигуни. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I та II, III та IV, V та VI;

г) групове живлення двох груп електродвигунів по три електродвигуна. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I, II та IV, III, V та VI.

За результатами розрахунків встановлено, що найменші коефіцієнти використання зчпної маси локомотиву є при груповому живленні усіх електродвигунів (варіант а) та повізковому живленні (варіант б). Це пояснюється тим, що у складі кожної групи є осі з низькими коефіцієнтами використання зчпної маси і відповідно такі осі обмежують величину сили тяги решти осей, які входять до цієї групи. Найнижчі значення коефіцієнту використання зчпної маси, рівні 0,8...0,847, досягаються при груповому

живленні усіх електродвигунів. При повізковому живленні коефіцієнт використання зчпної маси знаходиться у діапазоні 0,829...0,87. При цьому з ростом загального тягового зусилля коефіцієнт використання зчпної маси локомотиву зменшується.

Високі коефіцієнти використання зчпної маси локомотиву, рівні 0,98...1,0, досягаються при груповому живленні у варіанті в, який передбачає три групи, з об'єднанням у групи електродвигунів I та II, III та IV, V та VI осей (рис. 1а), та варіанті г, який передбачає дві групи з об'єднанням у групи електродвигунів I, II та IV, III, V та VI осей (рис. 1б). Це пояснюється тим, що у межах однієї групи об'єднуються осі з близькими навантаженнями. Це забезпечує високі значення загального тягового зусилля таких груп, при цьому коефіцієнт використання зчпної маси практично не змінюється при зміні загального тягового зусилля.

Найвищі значення коефіцієнта використання зчпної маси локомотиву досягаються при індивідуальному живленні.

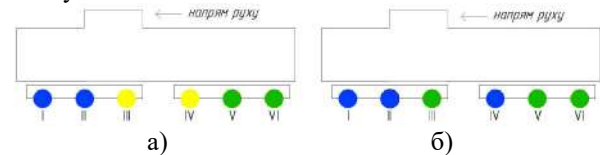


Рис. 1. Схеми живлення і керування тяговими електродвигунами:

а – групове живлення трьох груп електродвигунів по два електродвигуни; б – групове живлення двох груп електродвигунів по три електродвигуна (римськими цифрами позначено номер осі локомотиву. Однаковими кольорами позначено осі, які входять до однієї групи)

Таким чином, запропоновані способи керування тяговими електродвигунами дозволяють реалізувати енергозберігаючі алгоритми керування тяговим електроприводом та забезпечити повне використання зчпної маси локомотиву.

### Список літератури

- [1] Єжов, Ю.В., Павленко, Ю.С., & Полулях, С.М. Шляхи оновлення парку тепловозів в Україні. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад» 2020*, Вип. 20, 14-23.
- [2] Шайда, В.П., Юр'єва, О.Ю., Лисенко, Є.В., & Сич О.А. Підвищення енергетичної ефективності тягового колекторного електроприводу для маневрових тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування 2024, 2(18), 77-82 doi: 10.20998/2078-774X.2024.02.10
- [3] Горбунов, М. І. Теорія та практична реалізація системного підходу при створенні екіпажної частини локомотива: дис. д-ра техн. наук : 05.22.07. Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. – Луганськ: 2006. 437 с.

## ВИБІР НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ PLUG-IN ГІБРИДНОЇ ТЯГОВОЇ СИСТЕМИ РУХОМОГО СКЛАДУ

А. С. Маслій<sup>1</sup>, С. Г. Буряковський<sup>2</sup>, Р. М. Антоненко<sup>3</sup>, В. А. Геврасьов<sup>4</sup>, Ан. С. Маслій<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

<sup>2</sup>НДПКІ «Молнія», Харків, Україна

<sup>3</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна

<sup>4</sup>ТОВ «НІКС СОЛЮШЕНС»

Залізничний транспорт становить значну частку у споживанні різних типів палива, а також формуванні вуглецевого сліду, пов'язаного з використанням викопних ресурсів. Підвищення енергоефективності залізничного транспорту може здійснюватися різноманітними заходами, які включають екологічну, економічну, соціальну та інші складові [1]. З розвитком технологій систем накопичення енергії (ESS) актуальним напрямом модернізації тягового рухомого складу (РС) стає забезпечення можливості збереження та повторного використання енергії гальмування під час руху поїзда.

Метою дослідження є проведення обґрунтованого первинного вибору ESS, що відповідає базовим вимогам для застосування в гібридній plug-in тяговій установці РС.

Більшість наявних робіт з аналізу використання ESS на залізничному транспорті акцентують увагу на визначенні технічних і економічних показників для вже визначених складових силової установки. Водночас етап вибору конкретного типу ESS залишається поза увагою, або описується частково. Враховуючи велику кількість типів ESS, різноманітність РС та режимів його роботи, проведення первинного вибору може суттєво впливати на результати ефективності впровадження.

ESS мають показники, вплив яких на систему може змінюватись залежно від умов використання та режимів роботи. Для визначення важливості характеристик ESS пасажирських, вантажних, маневрових локомотивів та МВРС в дослідженні був застосований метод експертної оцінки із залученням фахівців у сферах РС, тягового приводу та зберігання енергії. Участь експертів дає можливість отримати дані з урахуванням поточного стану розвитку технологій.

Опитування експертів проведено за двома анкетами. В першій анкеті експерти оцінювали важливість кількісних та якісних показників ESS в залежності від виконуваної роботи, в другій - відповідно до типу ESS.

Частина першої анкети з оцінками експерта 5 приведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Частина оцінок експерта 5

Параметр	Тип РС	
	Пас. локомотив	Вант. локомотив
Питома потужність, Вт*кг	5	4
Питома енергоємність, Вт*год/кг	4	5
Вартість за Вт*год	3	5

Перед подальшою обробкою результатів анкетування була визначена узгодженість думок експертів. В умовах проведення оцінювання обмеження стосовно кількості однакових оцінок (зв'язаних рангів) не встановлювалося. Для деяких типів ESS та РС це призвело до кількості повторів, яка значно знижує достовірність застосування методів рангової кореляції. Спираючись на це в роботі використано метод внутрішньокласової кореляції (ICC), який дає змогу обробляти дані, що містять однакові оцінки для різних параметрів.

Розрахунки проведено з використанням програмних засобів та бібліотеки Pingouin [2] Отримані результати потрапляють у діапазон 0,5–0,75, що означає помірну згоду між експертами.

На першому етапі були визначені типи ESS, які відповідають базовим умовам використання в plug-in гібридних тягових системах. Це електрохімічні (BESS), суперконденсаторні (EDLC) інерційні (FESS), пневматичні (CAES), гідравлічні (HES) та надпровідні магнітні (SMES) накопичувачі енергії.

Подальший вибір проведено з використанням методу оптимізації Харрінгтона [3].

Визначення рівня відповідності бажаності того чи іншого типу ESS встановлювалось у відповідності з наступною шкалою та лігвістичними значеннями: 0–0,2 - дуже погано, 0,2–0,37 - погано, 0,37–0,63 - задовільно, 0,63–0,8 - добре, 0,8–1 - дуже добре.

В результаті проведених розрахунків визначено три типи ESS, які в даний час найбільше відповідають заданим умовам. Це BESS, EDLC та FESS. Отримані коефіцієнти бажаності перелічених ESS для пасажирських та вантажних локомотивів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Розраховані коефіцієнти бажаності

Тип РС	Загальна бажаність для ESS		
	BESS	EDLC	FESS
Пас. локомотив	0,622	0,627	0,567
Вант. локомотив	0,628	0,618	0,559

### Список літератури

- [1] Каличева, Н. С., Зайцева, А. С., & Синельник, В. О. (2024). Напрями забезпечення енергоефективності підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 87, 184–190. <https://doi.org/10.18664/btie.87.322704>
- [2] Vallat, R. (2018). Pingouin: statistics in Python. *Journal of Open Source Software*, 3 (31), 1026. <https://doi.org/10.21105/joss.01026>
- [3] Harrington, E. C., Jr. (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21 (10), 494–498.

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ РОТОРУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Б. Г. Любарський, І. В. Пуха

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Сучасний розвиток електротранспорту в Україні відзначається спільними зусиллями щодо створення енергоефективних технологій у системах перетворення енергії. Центральне місце в цих системах займає тяговий привід, де тип використовуваного тягового двигуна визначає його характеристики та технічні рішення. Велике значення має проблема охолодження ротору електричної машини у тому сенсі, що відносна складність для цього процесу вища ніж щодо статора. Маємо декілька діючих варіантів вирішення цієї задачі.

Варіанти охолодження ротору

• Вільна або примусова вентиляція повітрям (air-cooling)

a. Вільна: Просте та дешеве рішення, яке підходить для відносно невеликих теплових втрат.

b. Вимушена – з вентилятором / направляючими каналами; вентилятор може бути на валу або окремим.

• Охолодження порожнистим валом / внутрішньою циркуляцією повітря

a. Всередині ротора робляться канали; повітря прокачується через них.

• Рідинне охолодження (water jacket / hollow shaft with water)

a. Для високих щільностей втрат; вимагає ущільнень, насосів і трубопроводів.

• Контактне охолодження (через підшипники, тепловідводи)

a. Доповнює основний метод; важливо для локальних гарячих зон.

b. Часом це спричиняє проблеми, пов'язані з перегріванням інших систем, розташованих в навколишньому просторі. Один із варіантів – перегрівання редуктора з подальшим його виходом з ладу.

• Комбіновані рішення – вентилятор + рідинна «черепашка» навколо осевого каналу тощо.

Ми пропонуємо до розгляду варіант охолодження ротора електродвигуна з поверхневим охолодженням за допомогою фазового переходу рідина-газ на внутрішній поверхні порожнистого ротора або на зовнішній поверхні ротору. Обидва варіанти рішення пов'язані з досить великою кількістю проблем, які так чи інакше доведеться вирішувати. Але виходячи з того, що даний спосіб охолодження однозначно кращий за повітряний і не вимагає такої зміни маси та інерції ротора, а також інших додаткових систем, які важко підключити до обертового механізму у разі рідинного охолодження.

Способи застосування фазового переходу.

• Внутрішнє двофазне охолодження (кипіння всередині порожнистого валу) – рідина всередині порожнистого валу закипає на нагрітій стінці; пара відводиться до конденсатора (на статорі або в нерухомій частині), конденсат повертається.

• Зовнішнє двофазне (кипіння/розпилення на зовнішній поверхні ротора) – поверхню ротора обдувають/розпилюють робочу рідину, яка кипить / випа-

рується, пару збирають і конденсують.

• Замкнуті теплові труби / вакуумні теплопроводи (heat pipe vала) – капілярний (повстаний / пористий) шар всередині вала відновлює рідину до випарника на зоні нагрівання; пара йде до конденсатора. Не вимагає зовнішніх сантехнічних ущільнень (при правильній реалізації).

• Термосифон / двофазний циркуляційний контур з роторним інтерфейсом – пара/рідина циркулюють між валом і стаціонарним конденсатором через роторні/статичні з'єднання (часто потрібен роторний сальник/згортка/ротаційний з'єднувач).

• Поверхневий РСМ (фазові зміни тверде-рідке) – шар РСМ навколо ротора акумулює пікові навантаження (не постійне відведення тепла, а буфер).

Головна фізична проблема обертового контуру

Ключовий нюанс – сильна відцентрова сила.

Навіть при помірних обертах рідина і пара в порожнистому валу будуть поводитися не так, як у статичному теплообміннику:

• при  $\omega$  великій, рідина буде концентруватися біля периферії, пара – у внутрішній частині радіально (або навпаки, залежно від геометрії і сил).

• відцентрова прискорення на радіусі  $r = 0,075$  м при  $6000$  об/хв  $\approx 29\,600$  м/с<sup>2</sup>  $\approx 3\,000$  g – будь-яка вільна рідина буде «притиснута» до зовнішньої стінки. Це критично для повернення конденсату і для утворення парових бульбашок.

• Наслідок: проста модель «бризки-вакуум» не працює – потрібно враховувати розподіл фаз у радіальному напрямку, сухі зони (dryout) і труднощі з вторним змочуванням випарної поверхні.

Незважаючи на проблеми, які потребують вирішення, ми вважаємо цей напрямок досліджень перспективним, оскільки контрольоване охолодження ротора двигуна призведе до збільшення довговічності ізоляційних матеріалів і, як наслідок, продовжить термін експлуатації як електродвигуна, так і редукторів, які також виходять з ладу внаслідок перегріву.

### Список літератури

- [1] Петренко О. М. Наукові основи вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту (НТУ «ХПІ», 2018) Петренко, Олександр Миколайович Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 "Електротранспорт" - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" МОН України, Харків, 2018.
- [2] Nedelcu O. Calculation Methods for Heating and Ventilation System of Electrical Machines / Nedelcu O. Corneliu Ioan Sălișteanu C. O. Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/heat-transfer-phenomena-and-applications/calculation-methods-for-heating-and-ventilation-system-of-electrical-machines>
- [3] Cooling of electric motor / Режим доступу: <https://www.slideshare.net/sustenergy/cooling-of-electric-motors>

## ПІДСУМКОВЕ ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ПРОВЕДЕННЯ КРУГЛОГО СТОЛУ У РАМКАХ МІЖНАРОДНОГО СИМПОЗИУМУ SIEMA'2025

«Обчислювальний електромагнетизм і мультифізика: дослідницькі програми власної розробки, комерційні програмні продукти, програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом – порівняльний аналіз».

**Symposium Coordinator:**

**Baida, Yevhen I.** (*Department for Electrical Devices, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine*)



**Panelists:**

**Lowther, David A.** (*Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University, QC, Canada*)



**Moderators:**

**Clemens, Markus** (*Chair of Electromagnetic Theory, University of Wuppertal, Germany*)



**Kurz, Stefan** (*<sup>1</sup>Hybrid Modeling, Bosch Center for Artificial Intelligence, Robert Bosch GmbH, Renningen, Germany / <sup>2</sup>Department of Mathematics, Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich, Switzerland*)



**Pantelyat, Michael G.** (*Department for Electrical Devices, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine*)



**Geuzaine, Christophe** (*Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Liège, Belgium*)



**De Gersem, Herbert** (*Electromagnetic Field Theory, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Technical University of Darmstadt, Germany*)



### ПЕРЕЛІК ТЕМ І ПИТАНЬ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ

- 1 – Обговорення сучасного стану питання
  - 1.1 – Як учасники бачать сучасний стан розробки та використання програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, комерційного програмного забезпечення та програм власної розробки?
  - 1.2 – Питання щодо надійності/контролю якості отриманих чисельних результатів – стосовно порівняльного аналізу всіх трьох класів програмного забезпечення.
  - 1.3 – Чи правильно «грубо» стверджувати, що власні дослідницькі програми представляють собою вид програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом?
  - 1.4 – У випадку дослідницьких проєктів, що фінансуються державними сторонніми установами (такими як різні національні наукові агентства, фонди ЄС тощо), – питання стосовно вимог щодо оприлюднення профінансованих ними дослідницьких програмних продуктів.
  - 1.5 – Як правильно враховувати питання інтелектуальної власності під час використання програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом? (у тому числі, як цитувати відповідні розробки у публікаціях?)
- 2 – Потенціал та вплив методів, керованих штучним інтелектом.

- 2.1 – Як, на вашу думку, методи штучного інтелекту (ШІ) впливають на галузь, що розглядається?
- 2.2 – Як ми зможемо побачити інтеграцію методів машинного навчання: у комерційне програмне забезпечення чи у відкритий код?
- 2.3 – Інтеграція різних чисельних методів у нейронні мережі – чи це можливо/необхідно? (стосовно всіх трьох класів програмного забезпечення, що розглядаються).
- 2.4 – Які, на вашу думку, шанси та можливі пастки методів, керованих ШІ, у розрахункових дослідженнях електромагнітних полів і мультифізичних процесів?
- 3 – Перспективи – стосовно порівняльного аналізу всіх трьох класів програмного забезпечення
  - 3.1 – Що ви вважаєте «наступним великим проривом» у розрахункових дослідженнях електромагнітних полів і мультифізичних процесів?
  - 3.2 – Які методи та підходи, на вашу думку, відсутні або недостатньо представлені у відповідних дослідженнях?
  - 3.3 – Враховуючи демографічні зміни, як ви оцінюєте кількість дослідників, які все ще зацікавлені у роботі в цій галузі?

## MODERATOR'S SHORT CV



**Prof. Dr. rer. nat. Markus Clemens**  
**Chair for Electromagnetic Theory,**  
**University of Wuppertal, Germany**

Markus Clemens is a full professor at the Chair for Electromagnetic Theory at the University of Wuppertal, Germany.

Born 1968 in Wittlich, he received his diploma in Mathematical Engineering (“Technomathematik”) from the University of Kaiserslautern in 1995. In 1998 he finished his phd at the Institute for Electromagnetic Theory at the Technical University of Darmstadt in the field of Computational Electromagnetics. In 2003 he received his *venia legendi* in „Electromagnetic Theory“ and „Scientific Computing“, in 2004 he became head of the Chair for Theory in Electrical Engineering and Computational Electromagnetics at the Helmut-Schmidt-University, Hamburg. Since 2009 he is the head of the Chair for Electromagnetic Theory at the School of Electrical, Information and Media Engineering at the University of Wuppertal, Germany, where he is also dean of this School since 2024. His research activities over the last three decades focus on numerical simulation methods of Computational Electromagnetics and Computational Multiphysics with application fields in advanced electric power transfer systems and computational environmental electromagnetic compatibility simulations. He is IEEE senior member and author /co-author of more than 145 journal papers and more than 250 research conference papers in his field of research.

## PANELISTS' SHORT CVs



**Prof. Dr. David A. Lowther**  
**McGill University**  
**Department of Electrical and Computer Engineering**  
**Montreal, QC, Canada**

David Lowther received his Ph.D. degree in 1973 from Brighton Polytechnic in the United Kingdom before moving to Imperial College, London where he spent 6 years in a post-doctoral position with Dr. C.J.Carpenter working on modeling electrical machines. In 1979 he moved to McGill University in Montreal, Canada as an Associate Professor in the Department of Electrical Engineering and was promoted to Full Professor in 1986 and was Chair for the Department from 1998 to 2006. His research relates to the design and analysis of low frequency electromagnetic devices, including applications of artificial intelligence and supervises the electrical machines design group within the Computational Electromagnetics Laboratory at McGill. In 1978, he co-founded Infolytica Corporation which developed computer aided design tools for low frequency systems. The company was acquired by Siemens DISW in 2017 and he was a Technical Director in Technology and Innovation at Siemens until September 2025. He has been involved in developing machine learning systems for electrical machine design with Siemens. He is currently the President of the International Compumag Society and is a member of several conference organizing committees. He is a member of the Advisory Board for the joint German-Austrian project to develop a computational electrical machines laboratory (CREATOR). He has published over 400 conference and journal papers and is a Fellow of the Institution of Engineering Technology, the Institute of Electrical and Electronic Engineers and the Canadian Academy of Engineering.

## PANELISTS' SHORT CVs



**Prof. Dr.-Ing. Stefan Kurz**  
**VP Chief Expert for Hybrid Modeling, Bosch Center for Artificial Intelligence,**  
**Robert Bosch GmbH, Renningen, Germany**  
**Professor of Practice, Department of Mathematics,**  
**Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich, Switzerland**

Prof. Stefan Kurz is Vice President and Chief Expert for Hybrid Modeling at Bosch Corporate Research, leading research at the intersection of physics-based and AI-driven modeling. His work has pioneered industrial adoption of hybrid modeling methods across Bosch divisions, enhancing product development and innovation efficiency. At ETH Zurich, he serves as Professor of Practice in Applied Mathematics, teaching and mentoring in advanced numerical methods for computational science and engineering.

Previously, he held professorships at Technische Universität Darmstadt and the University of the German Federal Armed Forces Hamburg, as well as leadership positions at Bosch and ETAS GmbH. He was Finland Distinguished Professor at Tampere University of Technology, directing a large research program on advanced electromagnetic modeling.

Author of over 60 refereed publications and coauthor of the textbook *Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists* (Springer, 9th ed., 2021), Prof. Kurz serves on the Industry Committee of SIAM and on international scientific advisory boards. His professional focus lies in bridging physics, mathematics, and AI for engineering innovation.



**Prof. Dr. Christophe Geuzaine**  
**Department of Electrical Engineering and**  
**Computer Science, University of Liège,**  
**Belgium**

Prof. C. Geuzaine received his Master's and PhD degrees from the Faculty of Applied Sciences at the University of Liège in Belgium, in 1996 and 2001 respectively. After post-doctoral positions at the California Institute of Technology and with the Belgian National Science Foundation, he became an assistant professor of Mathematics at Case Western Reserve University in 2005. In 2007 he came back to the University of Liège, where he is now full professor in the department of Electrical Engineering and Computer Science. He is the founder and head of the Applied and Computational Electromagnetics research group within the Montefiore Institute.

Prof. Geuzaine's research encompasses modeling, analysis, algorithm development, and simulation for problems arising in various areas of engineering and science, with current applications in electromagnetic, biomedical and geophysical problems. He has authored numerous papers in the fields of scientific computing and is the co-creator of the popular open source mesh generator Gmsh and the multi-physics finite element solver GetDP.



**Prof. Dr.-Ing. Herbert De Gersem**  
**Electromagnetic Field Theory**  
**Department of Electrical Engineering and Information Technology,**  
**Technical University of Darmstadt, Germany**

**since 2014** Full professor, Technische Universität Darmstadt, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Computational Electromagnetics Laboratory

**2006 – 2014** Full professor, KU Leuven (Belgium), Wave Propagation und Signal Processing Group

**2001 – 2006** Research assistant, Technische Universität Darmstadt, Institute for Computational Electromagnetics

**1995 – 2001** Research assistant, KU Leuven (Belgium), Electrical Energy Division

**Research Topics and Interests**

- Electromagnetic field theory
- Computational electromagnetics
- Particle accelerator physics and technology
- Challenging applications in electrical engineering such as, e.g., electric machines, high-voltage technology, high-frequency components, communication systems, electromechanical actuators and sensors, electronic components

[https://www.etit.tu-darmstadt.de/fachbereich/professuren\\_etit/etit\\_prof\\_details\\_44736.en.jsp](https://www.etit.tu-darmstadt.de/fachbereich/professuren_etit/etit_prof_details_44736.en.jsp)

**ПІДСУМОК ОБГОВОРЕННЯ КРУГЛОГО СТОЛУ У РАМКАХ МІЖНАРОДНОГО СИМПОЗІУМУ SIEMA'2025**

У межах міжнародного симпозиуму **SIEMA'2025** відбулося засідання круглого столу на тему: *«Обчислювальний електромагнетизм і мультифізика: дослідницькі програми власної розробки, комерційні програмні продукти та програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом – порівняльний аналіз»*. До участі були запрошені провідні міжнародні фахівці в галузі комп'ютерного моделювання електромагнітних полів і мультифізичних процесів.

Дискусія відкрилася оглядом сучасного стану програмних засобів трьох основних категорій: власних дослідницьких кодів, комерційного програмного забезпечення та рішень з відкритим вихідним кодом. Експерти обговорили питання надійності, точності чисельних методів, процедур верифікації й валідації, а також проблематику відтворюваності результатів. Значну увагу було приділено питанню, чи можна вважати дослідницькі програмні коди різновидом відкритого програмного забезпечення, особливо у випадках, коли дослідження фінансується державними або міжнародними фондами, що вимагають відкритого доступу до результатів.

Окремий блок дискусії стосувався аспектів інтелектуальної власності при використанні та поширенні програмного забезпечення з відкритим кодом, включно з питаннями правильного цитування, ліцензування та інтеграції відкритих компонентів у академічні й промислові проекти.

Другий тематичний фокус був присвячений швидкому розвитку методів штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) у галузі СЕМ та мультифізики. Учасники обговорили потенційні переваги та ризики застосування ШІ-орієнтованих методів: прискорення моделювання, створення сурогатних моделей, побудову гібридних чисельно-нейронних підходів, а також питання фізичної узгодженості та стабільності моделей. Експерти поділилися баченням того, у якій екосистемі — комерційній чи відкритій — інтеграція ШІ відбуватиметься швидше, а також оцінили перспективи включення класичних чисельних алгоритмів безпосередньо до нейронних мереж.

У заключній частині обговорення були окреслені довгострокові перспективи розвитку галузі. Серед найбільш перспективних напрямів експерти виділили багатомасштабні та багаторівневі методи, удосконалені методи редукції порядку моделей, фізично-орієнтовані нейронні мережі, а також нові інтегровані підходи до моделювання електромагнітних, теплових, механічних та інших фізичних процесів. Окремо було порушено питання зменшення кількості молодих фахівців у галузі та необхідності оновлення освітніх програм.

Круглий стіл забезпечив глибокий порівняльний аналіз трьох класів програмного забезпечення, окреслив роль ШІ в моделюванні електромагнітних і мультифізичних задач та визначив ключові виклики й можливості розвитку галузі у найближчі роки.

**Наукове видання**

**ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ,  
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

**Тези доповідей  
XXVII МІЖНАРОДНОГО СИМПОЗИУМУ SIEMA'2025**

Укладачі:

СЕРЕДА Олена Геннадіївна

ЛЕЛЮК Микола Анатолійович

СЕРЕДА Олександр Григорійович

ЧЕПЕЛЮК Олександр Олександрович

Відповідальний за випуск

д.т.н., доц. Байда Є.І.

Відповідальний секретар

к.т.н. Середя О.Г.

Підп. до друку 2025 р.  
Гарнітура Times New Roman

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ»,  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

---

Електронне видання

---