



ISSN 1727-9895

Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України

Збірник наукових праць

**Випуск
60**

**Київ
2021**

Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Національної академії наук України
Інститут електродинаміки

ПРАЦІ

Інституту електродинаміки Національної академії наук України

Збірник наукових праць

Виходить тричі на рік

Засновано у 1999 році

**Випуск
60**

Київ
2021

ПРАЦІ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ

Редакційна колегія*:

Шаповал І.А.	головний редактор, докт. техн. наук
Кириленко О.В.	академік НАН України
Стогній Б.С.	академік НАН України
Шидловський А.К.	академік НАН України
Волков І.В.	член-кор. НАН України
Жаркін А.Ф.	академік НАН України
Кондратенко І.П.	член-кор. НАН України
Кузнецов В.Г.	член-кор. НАН України
Михальський В.М.	член-кор. НАН України
Шидловська Н.А.	член-кор. НАН України
Щерба А.А.	член-кор. НАН України
Буткевич О.Ф.	докт. техн. наук
Васецький Ю.М.	докт. техн. наук
Кенсицький О.Г.	докт. техн. наук
Липківський К.О.	докт. техн. наук
Мислович М.В.	докт. техн. наук
Мельник В.Г.	докт. техн. наук
Петухов І.С.	докт. техн. наук

Editorial board*:

I.A. Shapoval	Editor-In-Chief, Doctor of engineering sciences
O.V. Kyrylenko	Academician of the NAS of Ukraine
B.S. Stognii	Academician of the NAS of Ukraine
A.K. Shydlovskiy	Academician of the NAS of Ukraine
I.V. Volkov	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
A.F. Zharkin	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
I.P. Kondratenko	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
V.G. Kuznetsov	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
V.M. Myhalskyi	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
N.A. Shydlovska	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
A.A. Shcherba	Corresponding Member of the NAS of Ukraine
O.F. Butkevych	Doctor of engineering sciences
Yu.M. Vasetskyi	Doctor of engineering sciences
O.G. Kensytskyi	Doctor of engineering sciences
K.O. Lypkivskyi	Doctor of engineering sciences
M.V. Myslovych	Doctor of engineering sciences
V.G. Melnyk	Doctor of engineering sciences
I.C. Petuhov	Doctor of engineering sciences

*Члени редакційної колегії працюють у Інституті електродинаміки НАН України, Київ
Editorial board members work in the Institute of electrodynamics of the NAS of Ukraine, Kyiv

International editorial board:

V.F. Reztsov, Corresponding member of the NAS of Ukraine, Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, Kyiv
V.Yu. Rozov, Corresponding member of the NAS of Ukraine, the Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects, Kharkiv
V.S. Maliar, Doctor of engineering sciences, Lviv Polytechnic National University, Lviv
V.V. Rymsha, Doctor of engineering sciences, National Polytechnic University, Odesa
Bendahmane Boukhalfa, Doctor of Engineering Sciences, University of Béjaïa, Algeria
M. Pavlik, Member of NAS Ukraine, Technical University of Lodz, Poland
Yu.R. Plotkin, Doctor of Engineering Sciences, Berlin School of Economics and Law

Збірник включений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») наказом МОН № 975 від 11.07.2019. та представлений у таких системах реферування:

- загальнодержавному депозитарії «Наукова періодика України»;
- загальнодержавній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»);
- науковій електронній бібліотеці періодичних видань НАН України (NA SPLIB) (<http://www.dspace.nbuv.gov.ua/>);

У червні 2021 р. збірник «Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України» включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA). У збірнику здійснюються експертне рецензування та наукове редагування статей.

*Друкується за постановою Вченої ради
Інституту електродинаміки Національної академії наук України.
Протокол № 13 від 09 грудня 2021 року*

Зареєстровано 07.02.2002. Свідоцтво: серія КВ, № 5843.
Засновник та видавець: Інститут електродинаміки НАН України
Україна, 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56

Адреса редакції:

03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56, Інститут електродинаміки НАН України.
Тел. (044) 366-26-56 E-mail: mlvv@ied.org.ua; Адреса сайту: <http://prc.ied.org.ua>

Відділення фізико-технічних проблем енергетики
Національної академії наук України
Інститут електродинаміки

**Праці
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України**

Випуск 60

2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60>

ЗМІСТ

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Щерба А.А., Подольцев О.Д., Перетятко Ю.В., Золотарьов В.М., Білянін Р.В.

Розрахунок електротеплових процесів в індукційній канальній печі в усталеному режимі на основі теорії теплових кіл.....5

Кучерява І.М.

Розподіл магнітного і теплового полів та втрати потужності в електромагнітному екрані підземної двоколової кабельної лінії12

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

Берека В.О., Кондратенко І.П.

Узгодження сумісної роботи генератора коротких високовольтних імпульсів напруги і камери для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом22

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Парус Є.В., Блінов І.В., Олефір Д.О.

Оцінка економічного ефекту від надання системами накопичення електричної енергії послуги балансування в ОЕС України28

Сегеда М.С., Равлик О.М., Бахор З.М., Яцейко А.Я., Дьяченко Н.Б.

Перенапруги під час дугових однофазних замикань на землю в електричних мережах 35 кВ38

Кучанський В.В., Савицький О.В.

Технічні засоби подавлення резонансних явищ в електричних мережах44

Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Аналіз методів достовіризації даних для задач короткострокового прогнозування вузлових електричних навантажень51

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Волков І.В., Голубєв В.В., Зозульов В.І.

Принципи удосконалення багаторівневих автономних інверторів напруги 58

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Кромплєс Б.А., Левицький А.С., Зайцев Є.О.

Щитовий інтелектуалізований вимірник напруги змінного струму 65

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60>

CONTENTS

THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Peretiatko Yu.V., Zolotarev V.M., Bilianin R.V. Calculation of electrothermal processes in the induction channel furnace in the steady-state operation based on the theory of thermal circuits 5

Kucheriava I.M. The distribution of magnetic and thermal fields, power losses in electromagnetic shield of underground two-circuit cable line 12

ELECTROTECHNOLOGICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Bereka V.O., Kondratenko I.P.

Matching of compatible work of short high-voltage pulses of tension generator and water treatment chamber by dint of pulse barrier discharge 22

ELECTRIC POWER SYSTEMS AND ELECTRICITY MARKETS

Parus E.V., Blinov I.V., Olefir D.O. Assessment of the economic effect of energy storage system providing the balancing services in the IPS of Ukraine 28

Seheda M.S., Ravlyk O.M., Bakhor Z.M., Yatseyko A.Ya., Diachenko N.B. Overvoltage during arc single-phase earth failures in 35 kv electrical networks 38

Kuchanskyy V.V., Savytskyi O.V. Technical means for suppression of resonance phenomena in electrical networks 44

Miroshnyk V.O., Shymaniuk P.V. Analysis of methods of increasing data reliability for problems of short term forecasting of nodal load 51

SEMICONDUCTOR CONVERTERS

Volkov I.V., Golubev V.V., Zozulev V.I. Principles of improvement of multilevel autonomous voltage inverters 58

MEASUREMENT AND DIAGNOSTICS IN THE ELECTRIC POWER ENGINEERING

Kromplyas B.A., Levytskyi A.S., Zaitsev Ie.O. Smart shield panel AC voltmeter cell 65

Відповідальний секретар С.В. Гаврилюк

Редактор Ю.В. Морозова-Леонова

Підписано до друку 13.12.21. Формат 60×84/8. Папір офс. Офс. друк. Ум.друк. арк. 7,4. Наклад 100 прим. Зам. 31. Включений в Перелік наукових фахових видань України, категорія «Б».

Відділ оперативної поліграфії Інституту електродинаміки НАН України
03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.005>

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ТЕПЛОВИХ КІЛ

А.А. Щерба ^{1*}чл.-кор. НАН України, О.Д. Подольцев ^{1**}докт. техн. наук,
Ю.В. Перетятко ^{2***} канд. техн. наук, В.М. Золотарьов ³, докт. техн. наук, Р.В. Білянin ³,
канд. техн. наук.

¹—Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: podol@ied.org.ua

²—Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

³— ПАТ «Завод «Південкабель»,
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

На основі теорії теплових кіл розроблено комп'ютерну модель індукційної каналної печі, що використовується для отримання в режимі безперервного лиття мідної катанки промислового призначення. Модель дає змогу розраховувати усталені електротеплові процеси з урахуванням потоків холодного та розплавленого металу в її активній зоні. У розробленій тепловій моделі запропоновано враховувати конвекційні потоки теплоти в металі за допомогою керованих джерел струму. Проведено розрахунок розподілу температури в активній зоні каналної печі й показано вплив масової витрати металу на вході та виході з печі на нерівномірність розподілення температури в активній зоні. Одержані результати дають змогу визначати необхідну електричну потужність печі за різних значень витрати металу, що безперервно рухається крізь її активну зону, нагріваючись за цих обставин до заданої температури. Розроблена модель є відносно простою в реалізації, завдяки використанню для цього пакет Matlab/Simulink, і дає змогу в режимі on-line оцінювати температуру розплаву в різних зонах залежно від електричної потужності, що споживає піч, та витрати металу на виході з печі, а також визначати раціональні режими її роботи. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: індукційна канална піч, електротеплові процеси, теплові кола, усталений режим, розподіл температури.



Рис. 1

На сьогодні в світі працює понад 200 індукційних каналних печей типу UPCAST [1,2] з продуктивністю від 1 до 40 тисяч тонн міді на рік. Їхньою перевагою є зменшення вмісту кисню в металі в процесі плавлення мідних заготовок (катодів) й отримання катанки необхідного діаметра безпосередньо під час безперервного лиття безкисневої міді. Особливістю такого типу печей є те, що в їхній активній зоні одночасно здійснюються режими нагрівання та плавлення шихти та безперервного лиття заготовок, що значно ускладнює процес моделювання таких печей. Конструктивно канална піч складається з футерованої ванни, в якій знаходиться вся маса металу, що розплавляється, й індукційної одиниці, що мі-

стить індуктор із каналом розплаву та знаходиться під цією ванною. Індуктор може розглядатися як первинна обмотка однофазного трансформатора, а як вторинна обмотка використовується контур із розплавленим металом. Фото каналної печі продуктивністю 10000 тон на рік наведено на рис. 1.

Розплавлений метал, що утворює вторинну обмотку трансформатора, нагрівається через виділену в ньому енергію джоулевого тепла, а рівномірність розподілу температури в його об'ємі забезпечується тепло- та масо переносом між каналом та ванною. Рух розплавленого металу головним чином обумовлено дією електродинамічних сил, що виникають у каналі, і частково завдяки конвективному переносу нагрітого металу в каналі в зовнішню ванну внаслідок термогравітації.

Щодо фізичних процесів у індукційних каналних печах безперервно протікають взаємопов'язані електромагнітні, теплові і гідродинамічні процеси, математичне моделювання яких ускладнюється такими факторами як тривалий режим нагріву, нелінійні властивості матеріалів, складна тривимірна геометрія активних елементів, наявність фазових переходів, змінення маси розплаву та ін. Одночасне врахування всіх цих факторів у тривимірній польовій моделі є вкрай складною науковою задачею, а отримання чисельних рішень потребує використання значних комп'ютерних ресурсів та тривалого часу розрахунку.

Рациональним підходом до вирішення ряду задач, що виникають у електротехнологічних установках, може бути проведення комп'ютерного моделювання на основі теорії мультифізичних кіл як більш простого в реалізації методу порівняно з польовим методом – див., наприклад, [3, 4]. У статті представлено результати досліджень, отриманих із використанням саме такого підходу чисельного розрахунку електротеплових процесів у індукційній каналній печі.

Під час аналізу електромагнітних процесів у таких печах, які використовуються для виробництва мідної катанки, і відповідно у процесі побудови їхніх математичних моделей необхідно виділяти два режими їхньої роботи:

1. *Перехідний електротепловий режим роботи.* Це режим первинного запуску (введення в експлуатацію) індукційної установки – режим відносно повільного нагрівання мідного шаблону, що слугує для формування каналу, від кімнатної температури до температури плавлення, поступового заповнення ванни печі розплавом, забезпечення його електродинамічного перемішування для вирівнювання температури, а також висихання та спікання термофутеровки печі. Тривалість такого процесу досягає понад 36 годин.

2. *Усталений електротепловий режим роботи.* Це робочий режим забезпечення необхідної температури розплавленої міді безпосередньо в процесі отримання з неї катанки, коли в печі утворюються два практично безперервні потоки металу – потік холодної міді у вигляді твердої шихти, яка безперервно або з деяким періодом подається у ванну з розплавом, і потік рідкого металу, який надходить у кристалізатор і утворює після безперервної розливки та кристалізації мідну катанку на виході.

Перший режим є особливо важливим щодо отримання каналу розплаву із заданими температурними характеристиками, який згодом буде безперервно експлуатуватися протягом усього терміну роботи печі (прогнозований термін: 3,5–4 роки). Розрахунок перехідних процесів у такому режимі виконувався раніше авторами цієї статті [5]. Під час протікання другого режиму важливим є підтримання та моніторинг температурного стану ванни та індуктора печі для прогнозування їхнього ресурсу й недопущення аварійної ситуації, а також підтримання температури розплавленого металу на виході з печі на заданому рівні в разі можливого змінення значень електричної потужності джерела живлення печі та витрати рідкого металу на вході та виході з печі.

Метою цієї роботи є розробка на основі теорії теплових кіл комп'ютерної електротеплової моделі індукційної каналної печі типу UPCAST в усталеному режимі роботи, комп'ютерна реалізація цієї моделі в програмному середовищі Matlab/Simulink [6] та проведення розрахунку температури в активних елементах такої печі, що використовується для виробництва високоякісної мідної катанки, яка використовується у виготовленні, зокрема, високовольтних силових кабелів.

Дослідження проводилися на прикладі однієї плавильно-роздавальної установки 10-ти струмкової лінії безперервного лиття безкисневої міді UPCAST продуктивністю 10 000 тон металу на рік, фото якої наведено на рис. 1.

Опис Simulink-моделі каналної печі та результати розрахунку. В усталеному режимі роботи каналної печі температура розплавленого металу в каналі повинна дорівнювати заданій величині. Це дає змогу визначити величину електропровідності розплаву й окремо розрахувати спочатку електричну задачу для визначення джоулевих втрат у розплаві, а потім – теплову задачу на основі отриманих даних.

Simulink-модель, що використовувалася для розрахунку електричних процесів у каналній печі, наведена на рис. 2 а. Вона містить джерело гармонійної напруги з внутрішніми параметрами R, L, однофазний трансформатор, первина обмотка якого відповідає індуктору печі, а вторинна обмотка є контуром із розплавленим металом. Величина активного опору цього контуру залежить як від геометричних розмірів каналу, так і від температури металу – його значення розраховується в програмі за допомогою блоку RH(T) і реалізується через керуване джерело струму (блок R(T)). Далі розраховується електрична потужність, що споживається цим блоком, і значення цієї потужності передається в теплову задачу.

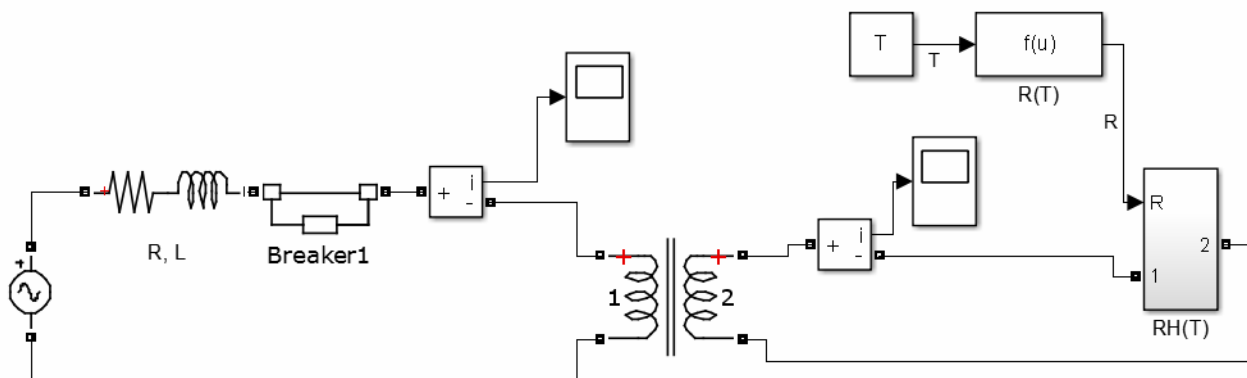


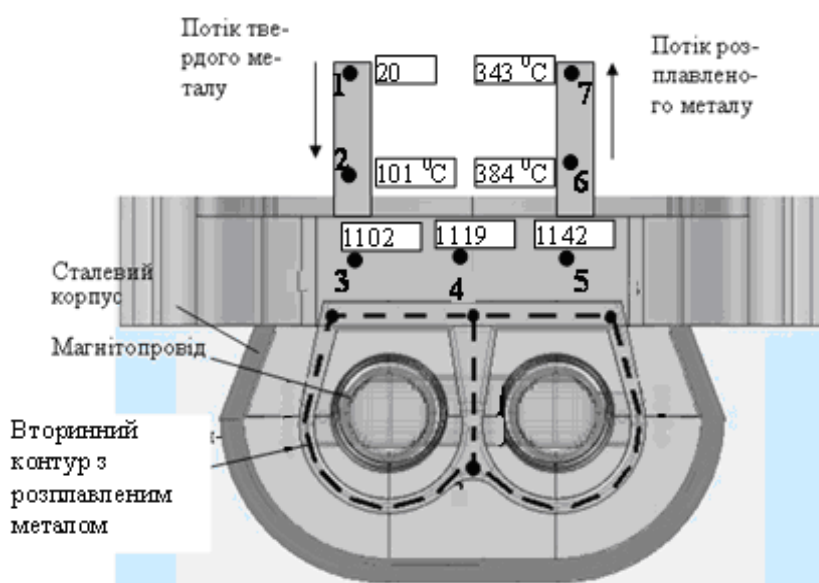
Рис. 2

Розрахунок теплових процесів у індукційній каналній печі в усталеному режимі має багато спільного з розрахунком процесів індукційного нагріву рухомої заготовки, які розглядалися з використанням теплових кіл авторами цієї статті в роботі [7]. Дійсно, холодний метал в обох технологічних установках безперервно надходить в активну зону, де за допомогою електричної енергії він нагрівається до необхідної температури і потім виходить із цієї активної зони. Різниця між індукційною установкою і каналною піччю полягає в тому, що в печі матеріал розплавляється і на виході твердне в додатково встановленому кристалізаторі. Ці відмінності можуть бути враховані відповідним вибором значень параметрів матеріалу заготовки, які є залежними від температури. Отже, можна зробити висновок, що теплова модель каналної печі може бути створена на основі моделі індукційної установки, дає змогу задати конкретне значення температури навколишнього середовища ($E=20^{\circ}\text{C}$), а електричні опори, що приєднані до цього джерела, відповідають інтегральним тепловим потокам, що передаються від поверхні елементів до цього середовища. У процесі розрахунків використовувалися такі дані: загальна електрична потужність печі – 135 кВт, масова витрата металу на вході в піч та на виході з неї становить $Q = 200$ кг/год, середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні рідкого металу та корпусу печі дорівнює $12 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

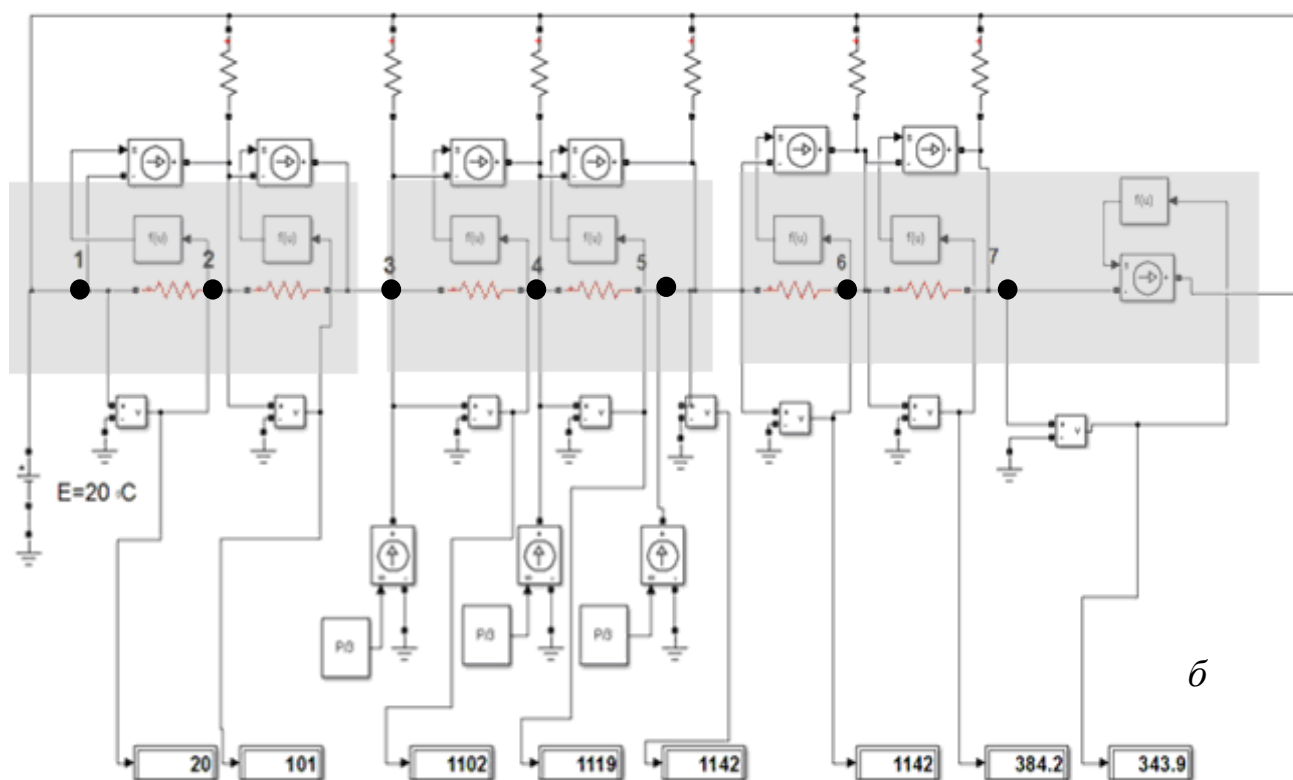
Результати розрахунку температури в усталеному режимі роботи печі наведені на рис. 3 а, де показані значення температури біля кожного вузла. Ці значення в тепловому колі вимірюються за допомогою відповідних вольтметрів, показники яких виводяться на екрани дисплеїв (рис. 3 б, внизу). Із наведених результатів розрахунку температури видно, що внаслідок

док руху металу температура на вході в піч набуває меншого значення, ніж на виході (1102°C та 1142°C відповідно), а на виході з печі в зоні кристалізації метал значно охолоджується.

На рис. 4 показано результати теплових розрахунків для двох випадків: у разі збільшення витрати металу з 200 до 250 кг/год (а) та в разі зменшення цієї витрати до 150 кг/год (б). Видно, що в процесі збільшення витрати металу на вході в піч унаслідок більш швидкої подачі холодного металу він твердне, і в цьому випадку необхідно збільшити електричну потужність, що споживає піч. У разі зменшення витрати металу він значно перегрівається, що потребує зменшення електричної потужності печі. На скільки в цих двох випадках необхідно



а



б

Рис. 3

змінювати потужність може бути визначено за результатами комп'ютерних розрахунків із використанням запропонованої моделі.

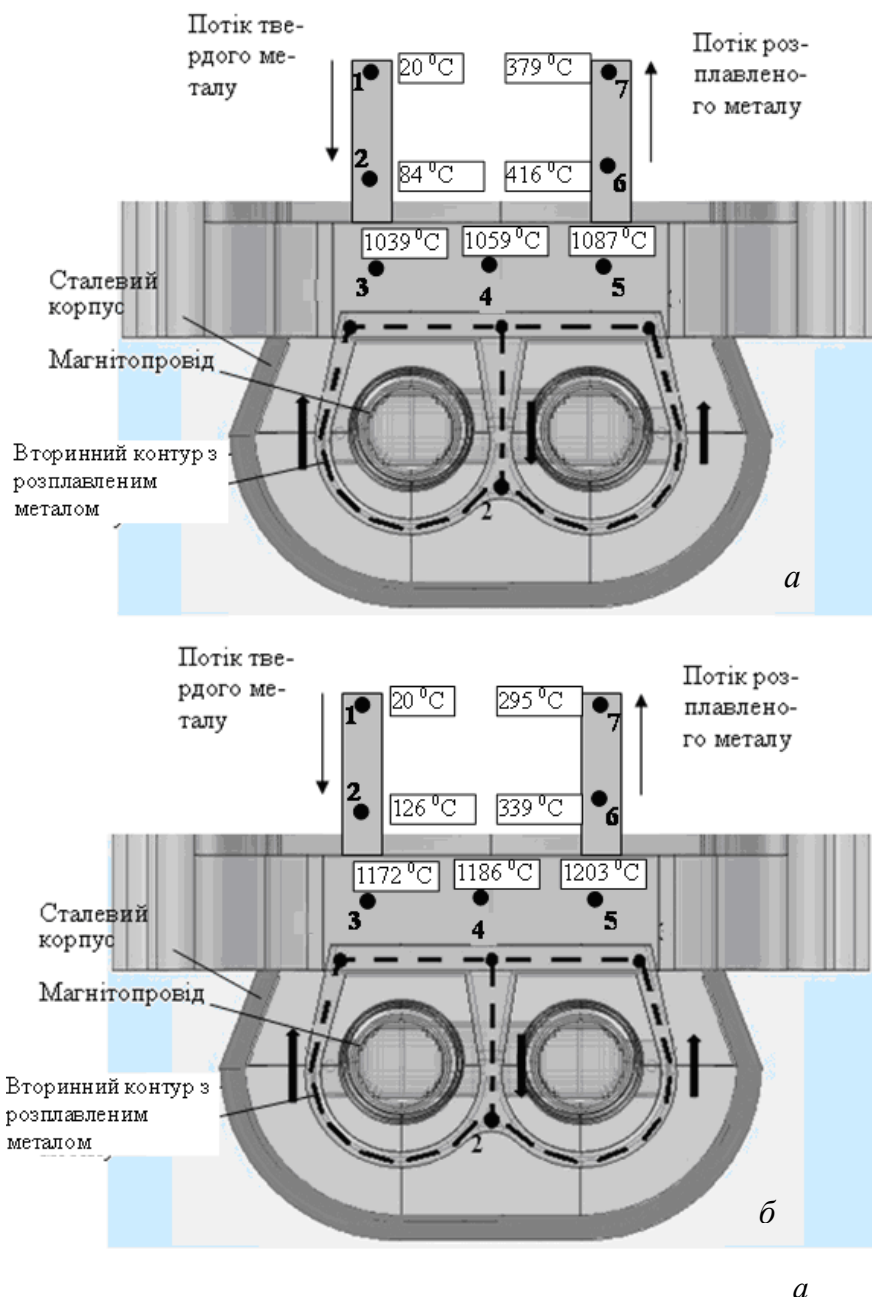


Рис. 4

потоків холодного та розплавленого металу в її активній зоні. У розробленій тепловій моделі запропоновано враховувати конвективні потоки теплоти за допомогою керованих джерел струму як додаткових елементів у тепловому колі.

Проведено розрахунок розподілу температури в активній зоні каналної печі й показано вплив масової витрати металу на вході та виході з печі на нерівномірність розподілення температури в активній зоні. Одержані результати дають змогу вибирати необхідне значення електричної потужності печі за різних значень витрати металу, що безперервно рухається крізь активну зону, нагріваючись за таких умов до заданої температури на виході.

Розроблена модель реалізована за допомогою пакета програм Matlab/Simulink, є відносно простою в реалізації і дає змогу в режимі on-line оцінювати температуру розплаву в

Стосовно переваги запропонованого підходу щодо розрахунку електротеплових процесів у індукційних каналних печах, зазначимо, що оскільки розрахунок одного варіанту потребує орієнтовно однієї хвилини комп'ютерного часу, то такі розрахунки можуть проводитися оператором печі в режимі on-line, що дає змогу йому здійснювати керування електричними процесами, спираючись на одержану інформацію щодо характеру протікання теплових процесів у активній зоні печі.

Висновки.

На основі методу теплових кіл розроблено комп'ютерну модель для розрахунку електротеплових процесів у індукційній каналній печі, що використовується для отримання в режимі безперервного лиття мідної катанки промислового призначення. Модель дає змогу розраховувати усталені режими роботи з урахуванням

активній зоні печі залежно від загальної електричної потужності, що споживає індукційна піч, та витрати металу на виході з печі, а також вибирати раціональні режими її роботи.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН-2»), що виконується за Постановою Президії від 18.12.2019, протокол № 339 та Постановою від 23.12.2020, протокол № 296. Державний реєстраційний номер робіт 0120U2125. КПКВК 6541030.

1. UPCAST Products: официальный сайт компании UPCAST. URL <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>.
2. Gandhewar V.R. Induction Furnace A Review. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. Vol. 3(4). Pp. 277–284.
3. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславець Ю.М., Западничук О.П. Чисельне моделювання теплового стану індукційної каналної печі. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044>
4. Wang Q., Baokuan LI, Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. No. 2. Pp. 311–320. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.311>
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Белянин Р.В. Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной каналной печи для производства медной катанки. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055>
6. <https://www.mathworks.com/>
7. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., Золотарьов В.М., Білянін Р.В. Два підходи до розрахунку електротеплових процесів при індукційному нагріванні рухомої заготовки – на основі теорії поля та на основі теорії теплових кіл. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С.5–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005>

CALCULATION OF ELECTROTHERMAL PROCESSES IN THE INDUCTION CHANNEL FURNACE IN THE STEADY-STATE OPERATION BASED ON THE THEORY OF THERMAL CIRCUITS

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, Yu.V. Peretiatko², V.M. Zolotarev³, R.V. Bilianin³

¹ - Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: podol@ied.org.ua

² - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³ - Yuzhcable works, PJSC,
Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

Based on the theory of thermal circuits, a computer model of an induction channel furnace has been developed, which is used to obtain industrial copper wire rods in the mode of continuous casting. The model allows calculating the established electrothermal processes considering the flows of cold and molten metal in its core. In the developed thermal model, it is proposed to consider the convection fluxes of heat in the metal using controlled current sources. The temperature distribution in the active zone of the channel furnace is calculated, and the influence of the mass flow of metal at the inlet and outlet of the furnace on the non-uniformity of temperature distribution in the active zone is shown. The obtained results allow determining the required electric power of the furnace at different values of the flow rate of the metal that moves continuously through its core while heating to a given temperature. The developed model is relatively easy to implement, using the Matlab/Simulink package, and allows online to estimate the melt temperature in different zones depending on the electric power consumed by the furnace and the metal consumption at the outlet of the furnace, as well as to determine rational modes of its operation. Ref. 7, fig. 4.

Keywords: induction channel furnace, electrothermal processes, thermal circuits, steady-state, temperature distribution

1. UPCAST Products: the official website of UPCAST. URL: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>
2. Gandhewar V.R. Induction Furnace – A Review. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. Vol. 3(4). Pp. 277–284.
3. Bondar O.I., Glukhenky O.I., Goryslavets Yu.M., Zapadynchuk O.P. Numerical modeling of induction channel furnace thermal state. *Tekhnichna electrodynamika..* 2021. No 3. Pp. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044> (Ukr)
4. Wang Q., Baokuan LI. Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. No. 2. Pp. 311–320. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.311>
5. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M., Bslanin R.V. Modeling and control of long-lasting electromagnetic and thermal processes in an induction channel furnace for the production of copper wire rod. *Tekhnichna electrodynamika..* 2017. No 4. Pp. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055> (Rus)
6. <https://www.mathworks.com/>
7. Shcherba A.A., Podoltsev O.D, Kucheryava I.M. Two approaches to the calculation of electrothermal processes in induction heating of a moving workpiece - based on field theory and based on the theory of thermal circuits. *Pratsi Instytutu Electrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2021. Issue 59. Pp. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005> (Ukr)

Надійшла: 08.09.2021

Received: 08.09.2021

УДК 621.315.2:004.94

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.012>

РОЗПОДІЛ МАГНІТНОГО І ТЕПЛОВОГО ПОЛІВ ТА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ЕКРАНІ ПІДЗЕМНОЇ ДВОКОЛОВОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: irinan@gmail.com

У роботі виявлено особливості розподілу магнітного поля та температури в елементах підземної двокової надвисоковольтної кабельної лінії та навколо неї за наявності горизонтально розташованого алюмінієвого екрана, що знаходиться на різній відстані від кабелів і має різну товщину. Досліджено закономірності розподілу магнітного поля та температури в екрані. Для розглянутих випадків джоулеві втрати в зовнішньому екрані складають не більше 3 % від втрат у кабелях. Проведено порівняння основних електромагнітних характеристик для алюмінієвого екрана (коефіцієнт екранування до 1,94) та екрана, що має меншу електропровідність (коефіцієнт екранування до 1,2). За допомогою чисельних результатів показано, що екран більшої товщини сприяє можливості збільшення пропускної спроможності кабельної лінії за рахунок меншого нагріву, а струмове навантаження кабельної лінії залежить від відстані екрана до кабелів внаслідок зміння їхньої максимальної температури від цієї відстані. Бібл. 15, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: підземна двоколова кабельна лінія, електромагнітний екран, ефективність екранування, магнітне поле, температурне поле, джоулеві втрати, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Високовольтні кабельні лінії є джерелами небезпечного магнітного поля, що здатні впливати на здоров'я людей, роботу електричного обладнання, чутливих електронних пристроїв та електротехнічних комунікацій, які знаходяться поблизу силових кабелів. Останнім часом особливу увагу дослідники приділяють високовольтним підземним кабельним лініям. Саме такі лінії мають широке застосування в густонаселених районах міст, на важливих промислових та енергетичних об'єктах [1].

Для зменшення рівня магнітного поля високовольтних кабелів передбачаються різні конструктивні засоби та спеціальні методи, в тому числі здійснюється екранування поля за допомогою електромагнітних і магнітних екранів різної конфігурації [2–5]. Сучасні одно- та двокові кабельні лінії досліджуються і проектується з елементами екранування магнітного поля при розташуванні кабелів як в одній площині, так і трикутником (рис. 1 а) [4–6].

У статті [7] виявлено ефективну дію плоских екранів у вигляді листів з провідних матеріалів, що розміщуються над підземними кабелями, особливо у разі мінімальної відстані від них. У роботах [8, 9] досліджено та визначено більшу ефективність екранування при використанні екрана з високопровідних матеріалів (міді або алюмінію) порівняно з феромагнітними екранами.

В усіх країнах світу екранування магнітного поля та зменшення його до нормативних значень є необхідною вимогою експлуатації кабельних ліній. В Україні допустимий рівень поля промислової частоти складає 0,5 мкТл усередині житлових приміщень та 10 мкТл на території зони житлової забудови [10, п. 2.3.51, табл. 2.3.2, с. 249]. Забезпечення санітарних норм є особливо важливим у випадку сумісного прокладання декількох високовольтних кабельних ліній або в складі блочного кабельного спорудження.

На етапі передпроектного дослідження та проектування кабельних ліній заходи щодо зменшення рівня зовнішнього магнітного поля зазвичай здійснюються за умови попереднього аналізу температурного стану кабелів шляхом мультифізичного моделювання електромагнітного та температурного полів [11]. Це пояснюється тим, що струм навантаження кабельних ліній визначається за допустимою температурою кабелів. Згідно зі стандартом [12] для кабелів з поліетиленовою ізоляцією робоча температура не повинна перевищувати 90°C.

Нарівні з ефективністю екранування і температурою кабелів враховуються втрати потужності в екрані. Як правило, найбільш придатним визнається той екран, що має не тільки

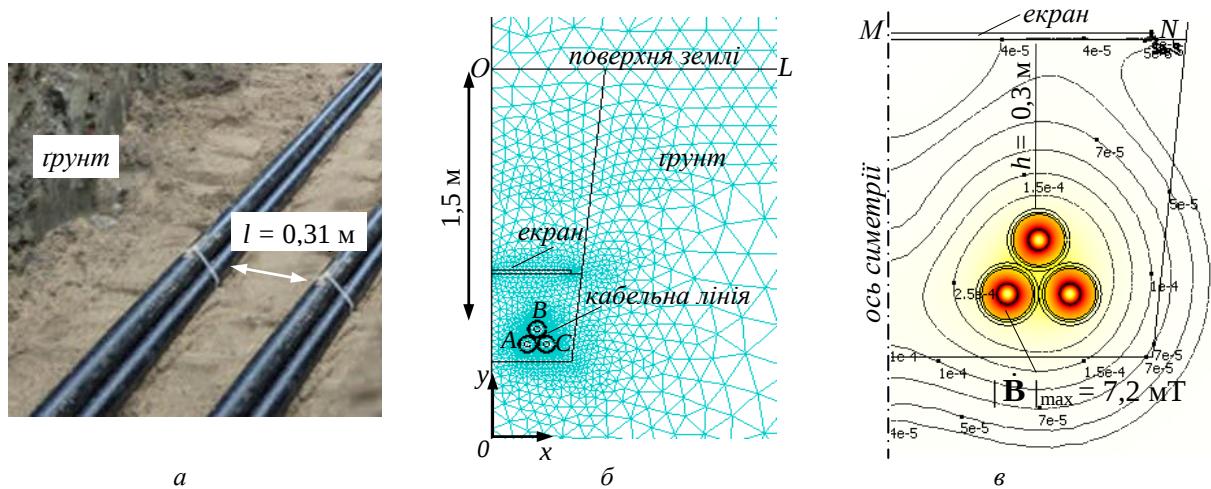


Рис. 1

високу ефективність екранування, а й низькі втрати. Тому ці питання вивчаються комплексно [9, 13]. У випадку магнітних екранів досліджуються загальні втрати, що складаються з втрат на гістерезис, втрат на вихрові струми та додаткових втрат [9, 13].

Важливість визначення температури кабелів та мінімізації втрат пов'язана з двома суттєвими аспектами, які необхідно досліджувати разом і враховувати при проектуванні. Втрати можуть призводити до підвищення температури провідників і, як наслідок, до зменшення струму кабелів, а також до збільшення витрат у перебігу експлуатації кабельних ліній.

У роботі [9] на основі сумісного розв'язання електромагнітної та теплової задач проаналізовано вплив втрат у замкнених магнітних екранах на пропускну спроможність підземної кабельної лінії з різною конфігурацією кабелів (трикутником та в одній площині). Показано зв'язок між електрофізичними/геометричними характеристиками екранів та рівнем зменшення магнітного поля і навантаженням за струмом при врахуванні загальної вартості екрана (вартості матеріалу разом з витратами за час роботи кабельних ліній).

Авторами статті [13] досліджено ефективність та електромагнітні втрати в магнітних замкнених екранах (з різних матеріалів), що оточують трифазну високовольтну кабельну лінію, залежно від розміру екранів і амплітуди струму кабелів. Показано, що трикутнікова конфігурація кабелів у лінії порівняно з їхнім розташуванням в одній площині є більш оптимальною внаслідок менших втрат і можливості забезпечення більшої ефективності екранів.

Усе відмічене зумовлює актуальність одержання нових знань та проведення поглиблених досліджень відносно електромагнітних і теплових процесів у сучасних високовольтних та надвисоковольтних кабельних лініях, а також шляхів підвищення їхньої пропускну спроможності з урахуванням геометричних характеристик і розміщення зовнішнього екрана відносно кабелів, втрат в екрані і, як наслідок, рівня його нагріву. Саме на цьому зосереджується ця стаття.

Метою роботи є кількісне дослідження особливостей розподілу магнітного та температурного полів двофазної надвисоковольтної (330 кВ) кабельної лінії траншейного прокладання з плоским електромагнітним екраном, а також визначення залежності пропускну спроможності лінії від товщини і положення екрана відносно кабелів з урахуванням при цьому їхньої температури та втрат в екрані.

У роботі як електромагнітні екрани розглядаються провідні екрани з немагнітних матеріалів (до прикладу, феромагнітні екрани мають теж провідні властивості).

Кабельна лінія, що досліджується, має два кола, кожен з яких складається з однофазних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, розташованих трикутником у землі на глибині 1,5 м (рис. 1 а, б). На теперішній час аналогічна кабельна лінія експлуатується в Україні [14].

Якісний та кількісний аналіз магнітного поля та характерних особливостей його розподілу поблизу кабелів та всередині екрана є одним з важливих елементів поглибленого вивчення сучасних високовольтних кабельних ліній із засобами екранування і передбачається першою частиною мети роботи. Дослідження у цьому напрямку проводяться в статті методом комп'ютерного моделювання за допомогою програмного забезпечення Comsol [15].

Метод та модель для дослідження. Електромагнітна та теплова задачі формуються для усталеного режиму в двовимірному випадку в декартовій системі координат Oxy (рис. 1 б, в) у припущенні, що умови прокладання кабельної лінії однакові по всій довжині траси, а всі матеріали у фізичній моделі мають сталі електричні властивості (відповідно до довідникових даних за температури 20°C), як наприклад, у [13].

Електромагнітна задача розв'язується відносно невідомого комплексного векторного магнітного потенціалу з єдиною ненульовою z -складовою $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$.

Математична модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [11], і складається з системи інтегро-диференціальних рівнянь загального вигляду:

$$j\omega\sigma_i\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_i\Delta\dot{U}_i, \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma_i\dot{A}_z + \sigma_i\Delta\dot{U}_i) dS = \dot{I}_i, \quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота струму ($f = 50$ Гц); j – уявна одиниця; індекс i відповідає i -му провідному середовищу в розрахунковій області; σ_i – електропровідність i -го середовища (жил, екранів кабелів у кабельних лініях); μ_0 і μ_r – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана (у разі його наявності) відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних екранів; $\dot{J}_z$ – z -складова густини струму.

Рівняння (1)–(2) містять комплексні величини напруги і струму, зокрема, рівняння (2) записано для ділянки кола зі струмом $\dot{I}_i$, падінням напруги $\Delta\dot{U}_i$, площею поперечного перерізу S_i . Комплексна величина $\dot{I}_i$ є струмом у жилі відповідного кабелю. Падіння напруги на жилах розраховуються за виразами: $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс}e^{j0}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс}e^{j2\pi/3}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс}e^{j4\pi/3}$ – відповідно у фазах A, B, C .

Детальна інформація відносно складових і особливостей моделі представлена в роботах [2, 3].

Математична модель (1)–(2) розроблена для загального випадку провідних середовищ, якими є жили, екрани кабелів і земля, а також для різних режимів – симетричної системи струмів (тоді $\Delta\dot{U}_i = 0$ в ґрунті) або несиметричного режиму (наприклад, одне навантаження відключено).

Рівняння (1)–(2) доповнюються наступною умовою магнітної ізоляції на всіх зовнішніх границях розрахункової області:

$$\dot{A}_z = 0. \quad (3)$$

Вектор магнітної індукції $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot}\dot{\mathbf{A}}$. Його складові визначаються як $\dot{B}_x = \partial\dot{A}_z / \partial y$; $\dot{B}_y = -\partial\dot{A}_z / \partial x$. У роботі досліджується розподіл діючого значення магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}| = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2} / \sqrt{2}$.

Стаціонарне поле температури T описується диференціальним рівнянням:

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (4)$$

де λ – теплопровідність відповідного матеріалу (середовища); $Q(x, y)$ – потужність теплових джерел, до яких відноситься Джоулево тепло, що виділяється в провідниках кабелів і визначається за загальною формулою:

$$Q = \dot{J} \cdot \dot{J}^* / \sigma,$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma\dot{A}_z$ – діюче значення густини струму; $\dot{J}^*$ – комплексно-сполучена величина густини струму $\dot{J}$.

Зв'язок двох задач різної фізичної природи реалізується через величину Q , яка знаходиться шляхом розв'язання електромагнітної задачі і використовується в тепловій задачі. Внаслідок прийнятої сталої електропровідності матеріалів у рівняннях (1), (2) описані задачі є слабо зв'язаними за класифікацією мультифізичних задач [11]. У загальному випадку електропровідність разом з теплофізичними властивостями матеріалів, зокрема, теплопровідністю, а для нестационарних теплових задач з густиною і теплоємністю можуть розглядатися як функції температури, при цьому сумісно (а не послідовно) розв'язуються сильно зв'язані мультифізичні задачі [11] з урахуванням взаємного впливу магнітного і теплового полів [9].

Граничні умови теплової задачі (4) задаються наступним чином. На осі симетрії області: $\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = 0$; на поверхні землі умова теплообміну: $-\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = k(T - T_n)$ (k – коефіцієнт тепловіддачі в повітря; T_n – температура повітря; $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до границі). З урахуванням значних розмірів розрахункової області та віддаленості активних елементів від інших (неназваних тут) зовнішніх границь, такі границі вважаються ізотермічними – для них задається умова: $T = T_0$, де T_0 – температура навколишнього середовища (грунту).

Результати чисельного моделювання. Технічні характеристики двоколової кабельної лінії та вихідні дані для розрахунків наведено в [14]. Розташування та розміри кабелів представлено на рис. 1.

У комп'ютерній програмі, розробленій на основі моделі (1)–(4), задаються такі дані: кабелі прокладені трикутником в ґрунті на глибині 1,5 м (рис. 1 б), відстань між крайніми кабелями двох окремих ліній 0,31 м; послідовність фаз кабелів показано на рис. 1 б; номінальний струм $I_{ном} = 630$ А; загальна ширина зовнішнього екрана 0,88 м, його товщина для базових варіантів розрахунку $\Delta = 10$ мм (окремо досліджено вплив товщини екрана на рівень магнітного поля); електропровідність ґрунту навколо траншеї 10^{-3} См/м; його теплопровідність $\lambda = 0,3$ Вт/(м·°С), температура ґрунту на глибині розташування кабелів $T_0 = 15^\circ\text{C}$; температура над поверхнею землі $T_n = 20^\circ\text{C}$.

Враховуються такі конструктивні елементи кабелів – алюмінієва жила, поліетиленова ізоляція, мідний екран, зовнішня поліетиленова оболонка. Розмір розрахункової області – 7×14 м відповідно по осях x, y .

Загальний вигляд досліджуваної двоколової кабельної лінії з розташуванням кабелів трикутником представлено на рис. 1 а. Невеликий фрагмент розрахункової області з активними елементами відображено на рис. 1 б разом зі скінченно-елементною сіткою.

На рис. 1 в показано (кольором та ізолініями) розподіл магнітного поля поблизу кабельної лінії і зовнішнього екрана. Наявність екрана впливає на конфігурацію магнітного поля. До того ж виявляється вплив другої, симетрично розташованої кабельної лінії. Максимальне значення магнітної індукції в зоні кабелів у розглянутому випадку дорівнює $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 7,2$ мТл, а найбільше значення поля безпосередньо на поверхні землі над ними – 0,72 мкТл, тобто алюмінієвий екран добре знижує магнітне поле на значній відстані (~1,5 м) від джерел поля, але найменші гранично допустимі значення 0,5 мкТл згідно з нормативами [10, п. 2.3.51] не витримуються. Питання зв'язку максимального значення магнітної індукції в межах досліджуваної кабельної лінії з рівнем поля на поверхні землі над нею вирішується, перш за все, залежно від заглиблення кабелів у ґрунт і в даній роботі не розглядається.

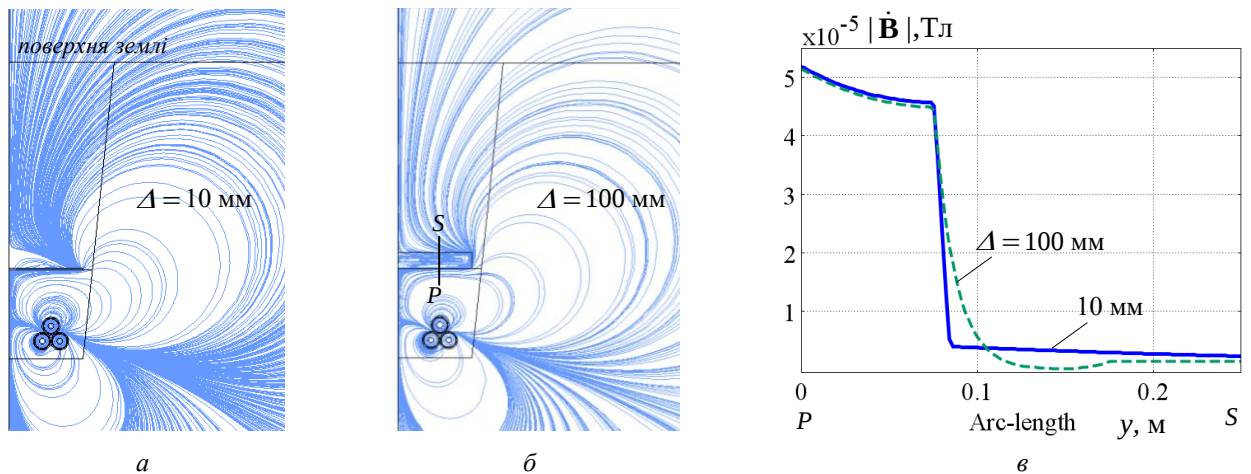


Рис. 2

У разі, коли екран відсутній ($\Delta = 0$), $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 1,24$ мкТл на поверхні землі. Коефіцієнт екранування як відношення максимальної індукції магнітного поля на поверхні землі над кабелями без засобів екранування до аналогічного значення поля з екраном при $\Delta = 10$ мм і $h = 0,3$ м дорівнює $SE = 1,72$. Зазначимо, що для алюмінієвого екрана (з матеріалу, що має лінійні властивості) ефективність екранування не залежить від струмового навантаження кабельних ліній і дорівнює 1,72 за будь-яких значень $I_{\text{ном}}$.

Як показали розрахунки, товщина достатньо віддаленого від кабелів екрана в діапазоні $\Delta = 1 \dots 10$ мм не має великого впливу на ефективність екранування. Це пояснюється віддаленістю екрана від кабельної лінії та його довжиною. За додатковими дослідженнями виявлено, що більш суттєвий вплив на значення коефіцієнта SE мають близьке розташування екрана до кабелів і особливо збільшення його за шириною. Необхідно також підкреслити, що наведені в роботі чисельні результати стосуються вибраних даних і не узагальнюються.

Залежність ефективності екранування від товщини алюмінієвого екрана пояснюється даними рис. 2. На рис. 2 а та б показано розподіл магнітного поля $\dot{\mathbf{B}}$ у вигляді ліній потоку навколо кабельної лінії в однаковий момент часу за різної товщини екрана $\Delta = 10$ та 100 мм (велика товщина вибрана для наочності результатів). Розподіли магнітного поля за допомогою ліній потоку дозволяють представити тільки якісно конфігурацію поля і лише в певний момент часу синусоїдально змінюваного струму без відображення числових значень поля. Графіки на рис. 2 в показують для обраних значень Δ змінення магнітного поля вздовж лінії PS , що перетинає екран і розташована над центром кабелів. З рис. 2 видно, що поле концентрується безпосередньо над екраном більшої товщини, тоді як для тоншого екрана лінії потоку (і більші значення поля) зміщуються ближче до поверхні землі. До того ж, зосередження (густина) показаних ліній поля на поверхні землі більша для тоншого екрана. Таким чином, екран з $\Delta = 100$ мм забезпечує менші значення поля над кабелями на поверхні землі порівняно з екраном товщиною $\Delta = 10$ мм, а отже, і більш високу ефективність екранування.

На картинах рис. 3 зверху відображено розподіл поля в перерізі алюмінієвого екрана для двох варіантів: екран знаходиться безпосередньо над кабельними лініями, тобто за $h = 0$ (рис. 3 а) і на відстані $h = 0,3$ м від неї (рис. 3 б) за $\Delta = 10$ мм. Графіки внизу показують змінення магнітної індукції вздовж нижньої границі екрана – на відрітку MN .

Стосовно даних рис. 3 а слід відмітити, що за $h = 0$ максимальне значення результуючого поля в екрані становить $|\dot{\mathbf{B}}_e|_{\max} = 1,33$ мТл (під результуючим полем мається на увазі поле від усіх джерел – усіх струмів кабельної системи). Поле концентрується прямо над кабелями. Максимальна густина наведеного струму дорівнює $|\dot{\mathbf{j}}_e|_{\max} = 1,26 \cdot 10^5$ А/м², джоулеві втрати не перевищують 443 Вт/м³ (максимальне значення реалізується безпосередньо над кабельною лінією, рис. 3 а). Поле на поверхні землі дорівнює $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 0,64$ мкТл, що в 1,13 раза менше, ніж за $h = 0,3$ м. Питомі втрати в перерізі екрана $Q_e = 28,37$ Вт/м, а в кабельній

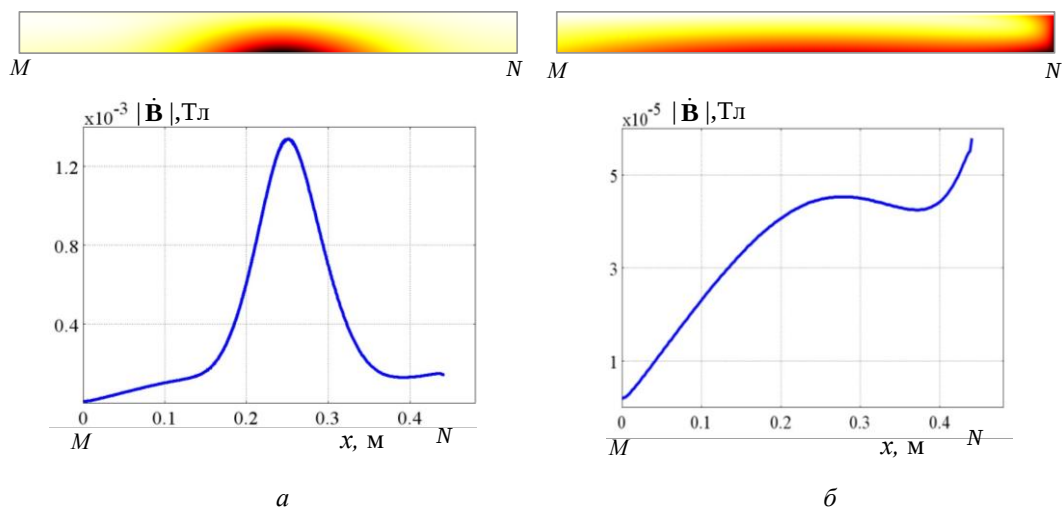


Рис. 3

лінії – $Q_L = 921,47$ Вт/м. Відношення $Q_e / Q_L = 0,031$, тобто втрати в екрані складають приблизно 3 % від втрат в кабелях, а $SE = 1,94$.

У разі, коли екран знаходиться на відстані від кабелів $h = 0,3$ м (рис. 3, б), максимальне поле вздовж нижньої границі екрана (відмітка MN) $|\dot{B}_e|_{\max} = 57$ мкТл (далі за межами відмітка MN вже на невеликій відстані від екрана проявляється основна тенденція до зменшення поля). Поле і його найбільші значення концентруються в кутовій зовнішній зоні екрана. Максимальна густина наведеного струму дорівнює $|\dot{J}_e|_{\max} = 9,8$ кА/м², максимальне значення джоулевих втрат в екрані становить $2,7$ Вт/м³, а питомі втрати в поперечному перерізі екрана складають $Q_e = 0,18$ Вт/м. Отже, розрахунковими даними підтверджено, що втрати в екрані значною мірою змінюються залежно від відстані його до кабелів. При $h = 0,3$ м відношення $Q_e / Q_L = 1,9 \cdot 10^{-4}$ або втрати у віддаленому від кабелів екрані не більше 0,2 % від втрат у кабельній лінії.

У таблиці представлено основні характеристики для двох випадків: використання алюмінієвого екрана та екрана з меншою електропровідністю. Екрани знаходяться на різній відстані h від кабелів і мають однакову товщину $\Delta = 10$ мм. Видно, що найбільш ефективне екранування забезпечує алюмінієвий екран ($SE = 1,94$) з найменшою відстанню до кабельної лінії ($h = 0$). Для нього втрати Q_e більші порівняно з іншим розглянутим екраном. Оскільки втрати в екрані є суттєвим показником і на практиці доцільно одночасне досягнення високої ефективності екранування і невеликих втрат в екрані, відстань h може бути підібрана так, щоб оптимально зменшити втрати і зберегти коефіцієнт екранування на досить високому рівні.

Відстань, h , м	Алюмінієвий екран – $\sigma_e = 38 \cdot 10^6$ См/м					Екран з електропровідністю $\sigma_e = 10^6$ См/м				
	$ \dot{B} _{\max}$, мкТл	SE	$ \dot{B}_e _{\max}$, Тл	$ \dot{J}_e _{\max}$, А/м ²	Q_e , Вт/м	$ \dot{B} _{\max}$, мкТл	SE	$ \dot{B}_e _{\max}$, Тл	$ \dot{J}_e _{\max}$, А/м ²	Q_e , Вт/м
0	0,64	1,94	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^5$	20,6	1,05	1,2	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^3$	10,6
0,3	0,72	1,72	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^4$	0,18	1,07	1,16	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^3$	0,71

Дані комп'ютерних розрахунків, наведені в таблиці, підтверджують відому залежність ефективності екранування від електропровідності екрана σ_e та від відстані його h до кабелів, а також характеризують у числових значеннях основних величин випадок двоколової кабельної лінії, що розглядається.

На доповнення даних таблиці, рис. 4 представляє змінення магнітної індукції на поверхні землі (вздовж лінії OL , рис. 1 б) для досліджуваної кабельної лінії за товщини екрана

$\Delta = 10$ мм, відстані $h = 0$ та для різної електропровідності матеріалу екрана σ_e . Досить висока електропровідність σ_e вибрана для більшої показовості результатів і відображення можливості наближення до найменших гранично допустимих значень магнітного поля на поверхні землі над кабелями [10]. Графічні дані свідчать, що ефективність екранування поля кабельних ліній у значній мірі залежить від електропровідності екрана, що узгоджується з даними статті [3] і пояснюється картинами магнітного поля, представленого лініями потоку на рис. 5. Розподіли поля на рис. 5 відповідають однаковим даним (крім σ_e), аналогічним до рис. 4. На рис. 5 показано характер змінення картин поля залежно від електро-

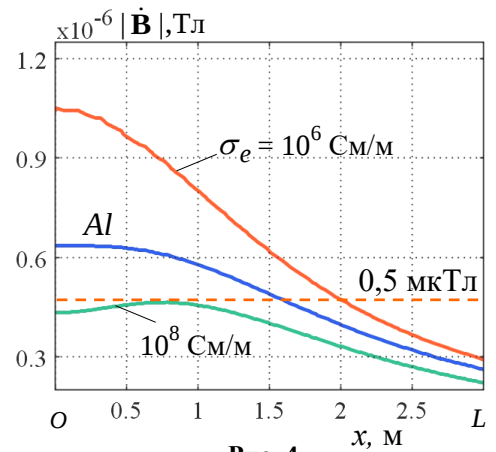


Рис. 4

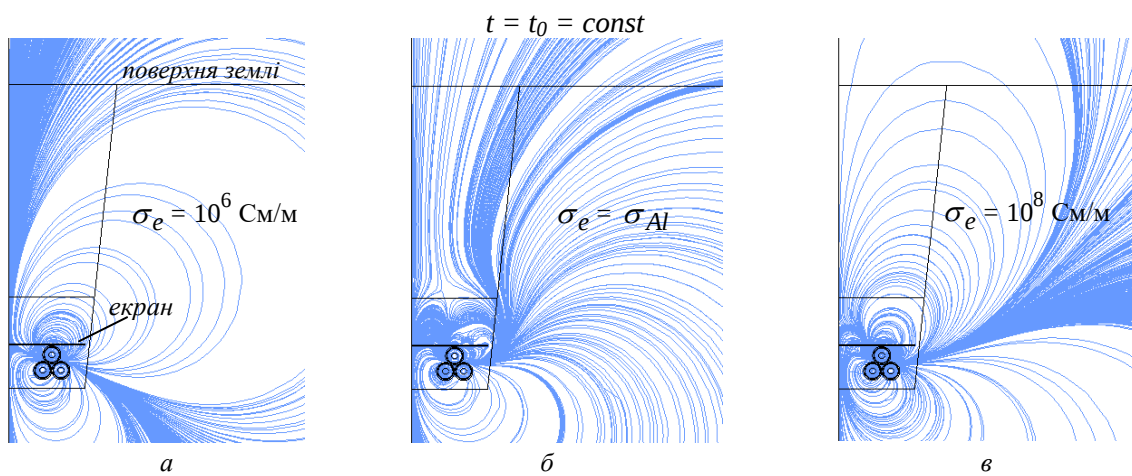


Рис. 5

провідності екрана σ_e . Лінії поля переважно концентруються безпосередньо над кабелями у разі меншого значення σ_e , усе більше відхиляючись від осі симетрії при його зростанні.

Відносно картин магнітного поля на рис. 2, а, б та рис. 5 відмітимо, що вони відповідають одному моменту часу синусоїдального струму $t = t_0 = \text{const}$, а конфігурація поля кабельної лінії змінюється залежно від t . Як показано розрахунковим шляхом, зі змінням часу t картини магнітного поля змінюються обертально в площині поперечного перетину кабелів. Це ілюструється на рис. 6, де представлено лінії потоку рівномірної густини для вектора

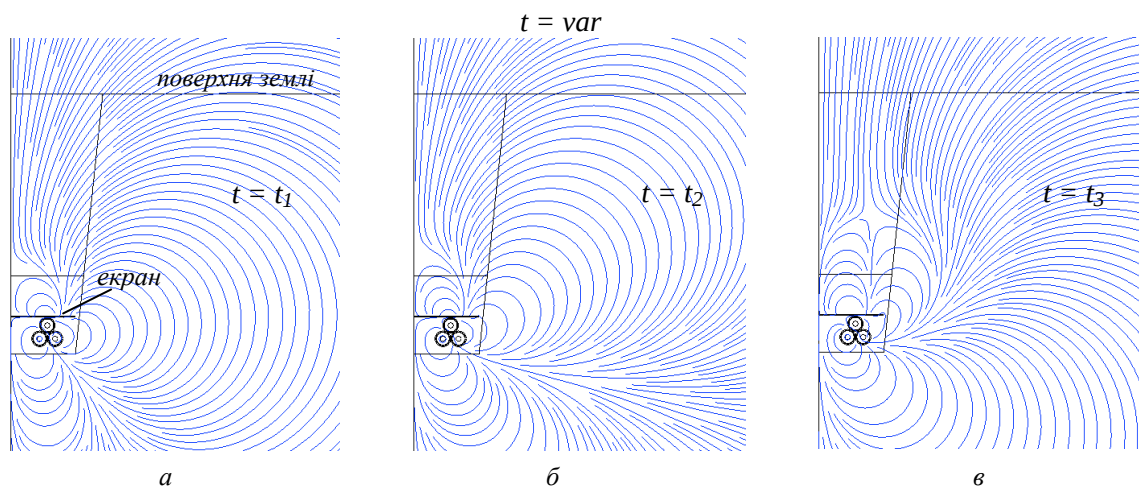


Рис. 6

магнітної індукції в три різні моменти часу. Для ряду моментів часу, зокрема для $t = t_1, t_2, t_3$, суттєві особливості в розподілі магнітного поля у разі змінення електропровідності і товщини екрана аналогічні до відмічених вище при $t = t_0$ та показаних на рис. 2 а, б та 5. Таким чином, у роботі здійснюється спроба пояснити залежності ефективності екранування магнітного поля кабелів від характеристик екрана. Для повного пояснення необхідні розширені дослідження стосовно усереднених за часом значень магнітної індукції.

У разі найбільш ефективного екранування, показаного в таблиці ($SE=1,94$), розподіл температури поблизу кабелів та алюмінієвого екрана, що має товщину $\Delta = 10$ мм і знаходиться безпосередньо над кабельними лініями ($h = 0$), представлено на рис. 7 а. Для цього ж випадку змінення температури вздовж нижньої границі екрана (лінії MN) показано на рис. 7 б. Максимальна температура нагріву кабелів $\sim 87^\circ\text{C}$ не перевищує допустиму температуру 90°C [12]. Екран нагрівається в середньому до $78,2^\circ\text{C}$, перепад температури за його довжиною – не більше $0,45^\circ\text{C}$ (рис. 7 б). У такому випадку за максимальною температурою заданий струм 630 А може вважатися тривало припустимим навантаженням кабелів. Для ана-

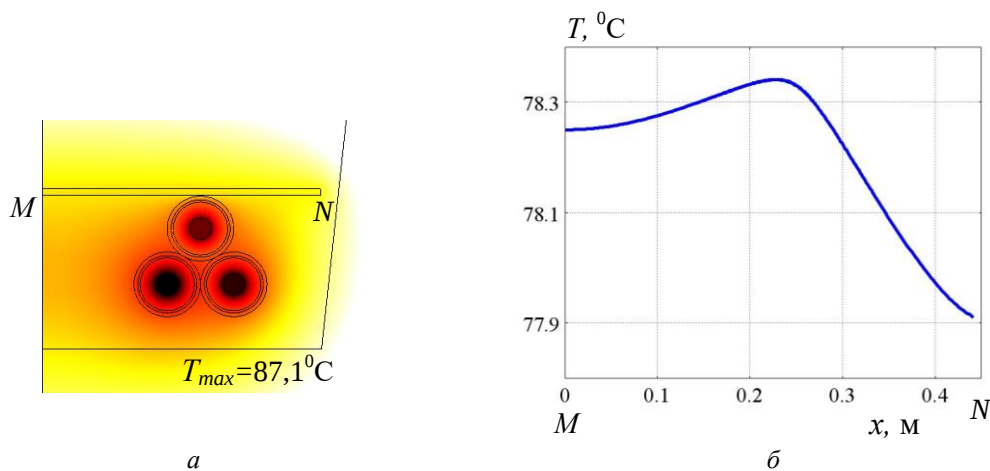


Рис. 7

логічної кабельної лінії без екрана максимальна температура кабелів складає $91,2^\circ\text{C}$, що на $\sim 4^\circ\text{C}$ вище, ніж за наявності екрана.

При вибраних даних і змінні товщини екрана від 1 до 15 мм максимальна температура кабелів зменшується незначно – від 89 до $86,3^\circ\text{C}$ і не відбивається на пропускній спроможності кабельної лінії, проте для найбільш тонкого екрана (1 мм) хоча і не перевищує допустиму температуру, близька до неї. Як показали розрахунки, з точки зору можливості підвищення струмового навантаження кабельної лінії екран з більшою товщиною краще.

Алюмінієвий екран з $\Delta = 10$ мм на відстані $h = 0,3$ м від кабелів нагрівається до $62,3^\circ\text{C}$, при цьому їхня максимальна температура складає $90,7^\circ\text{C}$, тобто чисельними даними підтверджено, що при визначенні пропускної спроможності кабельної лінії через можливе підвищення температури кабелів необхідно враховувати їхню відстань до екрана.

Висновки. Розв'язано електромагнітну і теплову задачі для двофазової 330 кВ кабельної лінії з ізоляцією зі зшитого поліетилену з горизонтальним екраном з провідного і немагнітного матеріалу, що знаходиться на різній відстані від кабелів.

Представлено пояснення залежності ефективності екранування магнітного поля кабелів від товщини екрана та його електропровідності за допомогою відображення розподілу магнітного поля лініями потоку в певний момент часу синусоїдального струму. Виявлено, що в різні моменти часу зміни струму картини магнітного поля змінюються обертально в площині поперечного перетину кабелів, зберігаючи при цьому основні тенденції для різних значень електропровідності та товщини екрана.

Показано, що екрани добре знижують магнітне поле на значній відстані від джерел поля. Коефіцієнт екранування для алюмінієвого екрана дорівнює 1,72 при відстані між кабелями і екраном 0,3 м та досягає значення 1,94, коли екран знаходиться безпосередньо над ка-

белями. Для цих випадків втрати в зовнішньому екрані складають відповідно не більше 0,2 % і 3 % від втрат у кабельній лінії.

Досліджено закономірності зміння рівня магнітного поля, густини струму та втрат в об'ємі екрана залежно від його відстані до кабелів. Виявлено, що за наявності екрана температура нагріву кабелів у кабельних лініях знижується – несуттєво (у розглянутому випадку для екрана більш наближеного до кабелів – на $\sim 4^{\circ}\text{C}$).

Для алюмінієвого екрана, що знаходиться на найменшій відстані до кабелів і має товщину 1 мм, ефективність екранування дорівнює 1,8, а при товщині 10 мм – 1,94, тобто на практиці з міркувань економії матеріалу і коштів при заданих умовах і початкових даних можливо використання більш тонкого екрана. Разом з тим, необхідно враховувати, що у разі тоншого екрана температура кабелів в лінії дещо збільшується (для вибраних даних майже на 3°C при зменшенні товщини екрана від 15 до 1 мм), що в загальному випадку може впливати на пропускну спроможність кабельної лінії.

На основі комп'ютерних розрахунків і чисельних даних підтверджено, що для кожного окремого варіанта кабельної лінії та її екрана з метою суворого дотримання визначеного струмового навантаження необхідно враховувати товщину та відстань екрана до кабелів внаслідок залежності від цих параметрів максимальної температури кабелів у лінії.

Робота фінансувалася частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ") (Номер реєстрації 0117U007713, 2017 р.), частково за темою "Розроблення засобів створення інтелектуальних екологічно безпечних силових кабелів для традиційної та відновлюваної електроенергетики" (програма "Нова енергетика", 2019–2021 рр.). КПКВК 6541030.

1. Electrical power cable engineering. Third edition, ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
2. Кучерявая И.Н. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Техн. электродинамика*. 2019. № 6. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013>
3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы его уменьшения. *Техн. электродинамика*. 2019. № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
4. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, No 316. Pp. 908–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
5. Gille A., Beghin V., Geerts G., Hoeffelman J., Liémans D., Van Gucht K. Double 150 kV link, 32 km long, in Belgium: design and construction. *Cigre Session*, 2004, Paper B1-305, 8 p.
6. Conti R., Donazzi F., Maioli P., Rendina R., Sena E.A. Some Italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues. *Cigre Session*, 2006, Paper C4-303.
7. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008, Vol. 27. No. 1. Pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
8. Кучерява І.М. Екранування магнітного поля підземної кабельної лінії за допомогою Н-подібного екрана. *Техн. электродинамика*. 2020. № 6. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.015>
9. Del Pino J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013. Vol. 135. Pp. 601–625. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER12112303>
10. Правила улаштування електроустановок. Міненерговугілля України, Київ, 2017, 617 с.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015, 305 с.
12. IEC 60287 International Standard. Electric cables – Calculation of the current rating. First edition 1995.
13. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011. Vol. 115. Pp. 441–460. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
14. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промэлектро*, 2009. № 6. С. 27–33.
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>

THE DISTRIBUTION OF MAGNETIC AND THERMAL FIELDS, POWER LOSSES IN ELECTROMAGNETIC SHIELD OF UNDERGROUND TWO-CIRCUIT CABLE LINE

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: rB.irinan@gmail.com

In the article, the magnetic and thermal field distributions generated by underground two-circuit extra-high voltage power cable line in the environment, particularly near the cables and flat aluminum shield, which is located at a different distance from the cables and has different thicknesses, are analyzed. The unique features of the magnetic field and temperature distributions inside the shield are computed and studied. For the cases under consideration, the Joule losses in the external shield do not exceed 3% of the losses in the cables. The primary electromagnetic characteristics are compared for the aluminum shield (shielding efficiency is 1,94) and the shield with lower conductivity (shielding efficiency is equal to 1,2). As shown, the thicker shield helps to increase the ampacity of the cable line owing to lower heating. The actual operating current of the cable line under consideration depends on the distance of the shield from the cables owing to the relation between their maximum temperature and this distance. Ref. 15, fig. 7, table.

Keywords: underground two-circuit power cable line, conducting shield, shielding efficiency, magnetic field, thermal field, Joule losses, computer modeling.

1. Electrical power cable engineering. Third edition, ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
2. Kucheriava I.M. Shielding of underground extra-high voltage cable line by plane ferromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013> (Rus)
3. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The magnetic field of underground 330 kV cable line and ways for its reduction. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003> (Rus)
4. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007. No 316. Pp. 908–911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
5. Gille A., Beghin V., Geerts G., Hoeffelman J., Liémans D., Van Gucht K. Double 150 kV link, 32 km long, in Belgium: design and construction. *Cigre Session*, 2004. Paper B1-305, 8 p.
6. Conti R., Donazzi F., Maioli P., Rendina R., Sena E.A. Some Italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues. *Cigre Session*, 2006. Paper C4-303.
7. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008. Vol. 27. No 1. Pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
8. Kucheriava I.M. Magnetic field shielding of underground power cable line by h-shaped shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.015> (Rus)
9. Del Pino J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, Vol. 135. Pp. 601–625. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER12112303>
10. Electric installation code. Minenergovugillia Ukrainy, Kyiv, 2017, 617 p. (Ukr)
11. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015, 305 p. (Rus)
12. IEC 60287 International Standard. Electric cables – Calculation of the current rating. First edition 1995.
13. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011. Vol. 115. Pp. 441–460. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
14. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*, 2009. No 6. Pp. 27–33. (Rus)
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>

Надійшла: 31.05.2021

Received: 31.05.2021

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 537.523.9

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.021>**УЗГОДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ І КАМЕРИ ДЛЯ ОБРОБКИ ВОДИ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ****В.О.Берека*, І.П. Кондратенко**, чл. кор. НАН України**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: bereka.v@ukr.net.

Наведено приклад розрахунку параметрів магнітного ключа як елемента генератора коротких високовольтних імпульсів напруги з метою узгодження його сумісної роботи з розрядною камерою, призначеною для обробки води уніполярним імпульсним бар'єрним розрядом. Підтверджено доцільність і ефективність використання такого ключа як елемента, який, шунтуючи розрядну камеру, розряджає бар'єр до приходу наступного імпульсу напруги. Доведено, що за прийнятих геометричних розмірів розрядної камери та амплітуди імпульсної напруги за умови наявності магнітного ключа за один розряд існує можливість збільшити корисне використання електроенергії на ~60 за допомогою тієї, що була накопичена в діелектричному бар'єрі та МК. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, обробка води, магнітний ключ.

Актуальність проблеми очищення та знезараження води. Наявність питної води – один із ключових факторів можливості існування людства. З кожним роком стан водних ресурсів нашої планети погіршується від постійного й неминучого забруднення внаслідок стрімкого зростання масштабів росту промисловості різних видів (металургійна, хімічна, харчова тощо). Основні проблеми створюють побутові стоки заводів, фабрик та відходи діяльності людини, які неконтрольовано скидаються в каналізаційну систему. Для захисту водоймищ від антропогенного впливу існують очисні споруди, в яких відбуваються процеси приведення води до певних стандартизованих показників [1]. У таких спорудах обробка відбувається здебільшого в три етапи [2]. Перші два етапи полягають у видаленні з води всілякого дрібного сміття, жиру, мулу тощо шляхом фільтрації, процесу відстоювання, біоочищення тощо. Третій етап є завершальним і складається з певного додаткового виду обробки. Найбільш популярним є хлорування. Цей метод, з одного боку, є простим і дешевим. Однак хімічні реагенти, які використовуються, та неперервний вплив на водне середовище відходів від промисловості можуть утворювати у воді низку додаткових шкідливих сполук, для руйнування яких хлорування є недостатньо ефективним через його низьку окислювальну здатність. До того ж як показали дослідження [2], очисні споруди є непридатними для боротьби з деякими забруднювачами, що суттєво впливають на довкілля та здоров'я людини. З огляду на це досить привабливими з погляду ефективності обробки води є електророзрядні технології. Обробка плазмою – екологічно чистий процес, що виключає необхідність застосування хімічних реагентів, і показує позитивний результат із руйнування хімічної структури стійких органічних сполук, включаючи ті, до складу яких входять такі стійкі циклічні утворення, як бензолні кільця [7]. Існує значна кількість видів електророзрядних технологій. Однак, однією з найефективніших є технологія на основі імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) у процесі обробки води, що має розвинуту поверхню, а саме відношення площі її поверхні до об'єму ($\sim 10\text{ м}^2/\text{л}$), яка створюється шляхом руху рідини у вигляді плівки товщиною $\delta \sim 0,15$ мм або у вигляді крапель малого діаметра (< 2 мм) [3]. Для використання такого способу обробки води необхідно мати комплекс, який включатиме принаймні джерело живлення (ДЖ) та розрядну камеру (РК). Однією з основних проблем

електророзрядних технологій є використання значної електричної енергії. Навантаженням для джерела живлення слугує розрядна камера, де генерується ІБР і проходить обробка води. Оптимальні параметри, яким мають відповідати імпульси напруги, що подаються на електроди РК, детально обґрунтовані в низці робіт [4,5,6]. До основних параметрів відносяться: час тривалості імпульса ~ 100 нс та крутизна фронту – понад $0,1$ кВ/нс. Крім того, оптимальними величинами амплітуд імпульсів напруги є $10\text{--}30$ кВ, а частота їхнього повторення – $10\text{--}300$ Гц [7]. У вже розроблених ДЖ зазвичай застосовуються однополярні імпульси напруги [8], тому після проходження імпульса струму ІБР на діелектричному бар'єрі залишається електричний заряд, який утворює електричне поле, направлене проти поля, створеного зовнішнім джерелом. За час дії імпульса залишковий заряд не встигає зменшитись до величини, що не впливала б на наступний розряд [4,5]. Присутність залишкового заряду на діелектричному бар'єрі збільшує непродуктивні витрати електричної енергії в ІБР та робить його нестійким, що в цілому знижує енергоефективність розряду. Час розряджання бар'єра залежить від електричної схеми ДЖ, матеріалу бар'єра, властивостей середовища в РК тощо. Одним зі способів розв'язання цієї проблеми є шунтування РК магнітним ключем [10] (нелінійною індуктивністю), індуктивний опір якого в насиченому стані зменшується в сотні разів, що дає можливість розрядити діелектричний бар'єр до початку наступного імпульса. Методика розрахунку МК описана в [9] і дає гарні результати у випадку, коли довжина імпульсів напруги не занадто мала (~ 1 мкс). Для імпульсів наносекундного діапазону під час розрахунку часу включення МК має враховуватись магнітна в'язкість матеріалу його осердя, що відсутнє в [9]. Крім того, необхідно брати до уваги, що включення МК проходить не миттєво, а впродовж деякого часу, який приблизно дорівнює тривалості ІБР (~ 100 нс).

Тому **метою роботи** є розробка методики виготовлення магнітних ключів для роботи в наносекундному діапазоні тривалості імпульсів, котрі призначені для розряджання діелектричного бар'єра під час уніполярного бар'єрного розряду та підвищення внаслідок цього вкладеної в розряд енергії з високим ККД.

Експериментальна установка. Для проведення експериментів використовувалася РК коаксialного типу. Роль діелектричного бар'єра виконувала акрилова труба з товщиною стінок $1,7$ мм. Величина газового проміжку δ , в якому відбувався ІБР, становила $\approx 3,2$ мм. Висота електродів – 6 см.

На рис. 1 наведена схема комплексу для обробки води ІБР, який складається з ДЖ, РК, що представлена еквівалентною схемою, та вимірювальної техніки.

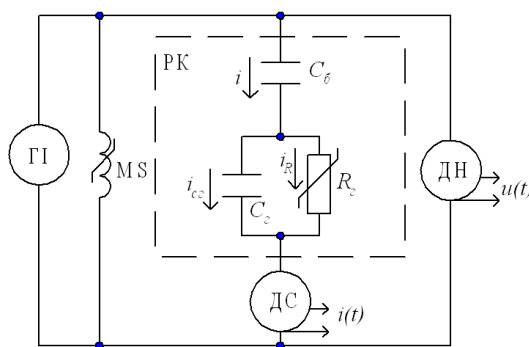


Рис. 1

На цьому рисунку джерело живлення позначено як ГІ (генератор імпульсів). ДН, ДС – відповідно датчики напруги P6015 та струму P6021 цифрового двоканального осцилографа TDS1012 фірми Tektronix зі смугою пропускання 100 МГц, MS – магнітний ключ (МК). Низьковольтну частину ГІ побудовано на принципі первинного накопичувача енергії в конденсаторі, котрий надалі комутується тиристором. Отримані за таких умов імпульси подаються на трансформатор і підлягають магнітному стисканню. РК представлена у вигляді схеми заміщення, де C_δ – ємність діелектричного бар'єра, C_ϵ – ємність газового проміжку, R_ϵ

– нелінійний опір газу, котрий під час дії ІБР змінюється в часі t . Ємність діелектричного бар'єра і газового проміжку становлять відповідно: $C_b = 600$ пФ, $C_g = 60$ пФ.

Розрахунок параметрів магнітного ключа МК. Зазвичай [9] насамперед проводиться вибір матеріалу осердя, його форми та перерізу, оцінювальний розрахунок числа витків МК. Основною характеристикою МК є час його включення. Оскільки РК являє собою резистивно-ємнісне навантаження, а імпульси напруги, що надходять до РК, є уніполярними, то вкрай важливо, щоб МК переходив до насиченого стану, характерним для якого є різке зниження його опору саме після закінчення прямого імпульсу струму. Це пов'язано з тим, що після проходження прямого імпульсу струму до моменту включення МК газове середовище починає стрімко змінювати свої властивості, а саме стрімко зростає його опір R_g , який під час розряду складає десятки Ом. У роботі [10], окрім іншого, досліджувалась залежність $R_g(t)$, яка наведена на рис. 2. Слід відзначити, що така залежність є типовою для газових проміжків, в яких проходить ІБР.

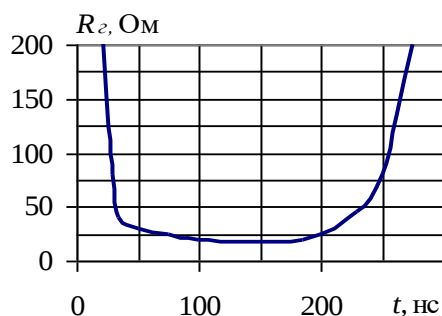


Рис. 2

Частина кривої ($t = 40 - 200$ нс) відповідає часу від початку іонізації в газовому проміжку до моменту закінчення імпульсу струму. Як видно, одразу після закінчення зворотного імпульсу струму ($t = 200$ нс) газ починає деіонізуватися, і його опір за час $t = 65$ нс зростає в 10 разів ($R_g = 200$ Ом). Якщо величина напруги на РК, що залишилась після прямого імпульсу, буде недостатньою для повторної іонізації внаслідок стрімкого зростання R_g , то накопичена енергія буде розсіюватись на елементах ДЖ і не встигне зменшитись до величини, яка б не впливала на наступний імпульс.

Напруга на РК складається з напруги на бар'єрі U_b і напруги на газовому проміжку U_g .

Зазвичай алгоритм розрахунку магнітних ключів є загальноприйнятим і складається з кількох етапів. Час насичення МК τ_n розраховується за формулою для осердя з найбільш прийнятною тороїдною формою [9]:

$$\tau_n = N \Delta B S / (\gamma U_m), \quad (1)$$

де $\Delta B = B_s - B$ – перепад магнітної індукції в осерді під час переходу від початкового B до насиченого стану B_s . Матеріалом осердя було обрано ферит М10000НН на підставі того, що він має за крутих фронтів імпульсів найменші втрати в разі перемагнічування. У розрахунках ΔB приймався за 0,25 Тл. U_m – амплітудне значення напруги на РК, яке приймалося рівним 25 кВ. Обране амплітудне значення напруги залежить від геометрії РК, матеріалу діелектричного бар'єра, а також величини газового проміжку в електродній системі та визначається експериментально за умови можливості іонізації повітря в газовому проміжку. Напруга прикладається до обмотки на осерді, яка має N витків, S – переріз осердя, γ – коефіцієнт форми напруги (оскільки реальна форма імпульсів напруги на їхніх фронтах близька до синусоїдальної, приймається, що $\gamma = 1,57$ [9]).

З осцилограм, знятих під час роботи схеми (рис. 1) без участі МК стало відомо, що час прямого імпульсу струму $t_{il} \sim 70$ нс. Зважаючи на те, що МК має включатись практично одразу після закінчення прямого імпульсу струму, τ_n має складати $\sim 75-100$ нс. Отже, у формулі (1) невідомими залишаються лише величини в чисельнику N , S , які обираються методом підбору на основі наближених розрахункових даних. Із практичних міркувань як найбільш прийнятну величину перерізу осердя приймаємо $S = 7 \text{ см}^2$. Із формули (1) необхідно наближено розрахувати кількість витків. Так, у прикладі, що розглядається, розрахункова величина N склала 9 витків. Надалі з метою отримання оптимальних значень τ_n були проведені експерименти з більшою й меншою кількістю витків ($N=7-20$). Зрештою експериментальним шляхом були визначені такі оптимальні параметри МК: осердя ключа набрано з 7 феритових кілець М10000НН із розмірами $55 \times 32 \times 9$, кількість витків – $N = 10$.

Дослідження впливу МК на сумісну роботу ДЖ і РК відбувалося в процесі обробки отриманих осцилограм напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ через РК на МК. Експерименти проводилися за амплітудного значення напруги $U_m = 25$ кВ із частотою повторення імпульсів $f = 100$ Гц. На рис. 3 показано осцилограми напруги та струму через МК, а на рис. 4 – струму й напруги на РК у той самий момент часу. З рисунка 3 видно, що струм I_{MS} через MS починає

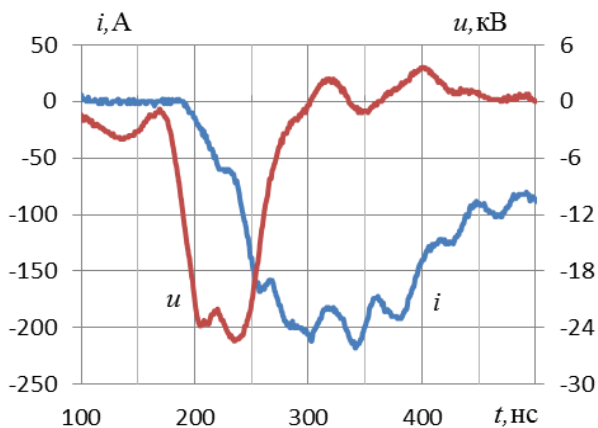


Рис. 3

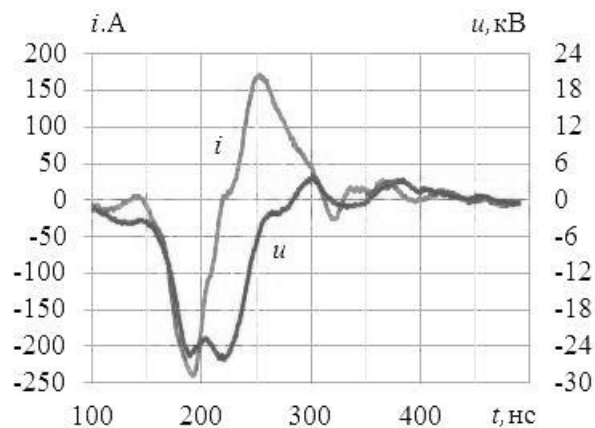


Рис. 4

стрімко наростати практично одночасно з поданням напруги на РК. Водночас відбувається швидке зниження опору ключа, і струм стрімко наростає до свого амплітудного значення 215 А. Індуктивність МК у ненасиченому стані $L_\mu \approx 0,65$ мГн, а в насиченому – $L_\mu \approx 1,3$ мГн. Тобто, у момент насичення індуктивність МК зменшується в ≈ 500 разів. Це відбувається через ~ 100 нс після подання напруги на РК і протікання через неї прямого струму I_{PK1} , що відповідає попереднім теоретичним міркуванням. Це також підтверджує крива струму I_{PK} на рис. 4, яка складається з двох частин: прямого і зворотного струмів. Зворотний струм починає протікати фактично одразу після закінчення прямого струму, що підтверджує те, що в МК йде процес насичення, який завершується через ~ 25 нс (відбувається включення МК). Завдяки своєчасному включенню МК вдалося отримати досить великий зворотний струм $I_{PK2} = 170$ А.

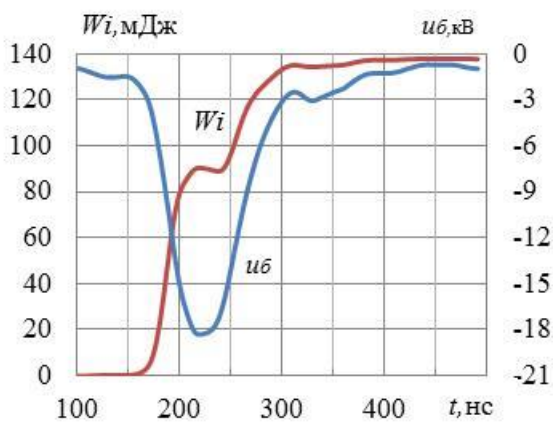


Рис. 5

На рис. 5 наведено залежності від часу напруги на бар'єрі u_δ та енергії W_i , що виділяється в РК за один імпульс.

За час дії прямого струму i_{PK1} (70 нс) в РК виділяється ~ 87 мДж енергії. Далі, як видно з рис. 5, за час дії зворотного струму i_{PK2} виділяється ще додатково 53 мДж енергії, що становить 60 % від енергії прямого імпульса струму. Зростання енергії, що виділяється в РК, є доцільним, бо призводить до інтенсифікації генерації окиснювачів, що сприяють обробці води. Також з рисунка видно, що за час дії прямого й зворотного імпульсів струму напруга на діелектричному бар'єрі u_δ спадає майже до

нуля. Це означає, що залишковий заряд на бар'єрі не буде перешкоджати наступному імпульсу. W_i та u_δ визначалась на основі методики, викладеної в [10].

Висновки. Спираючись на отримані результати, можна зробити декілька ключових висновків. По-перше, розроблено магнітний ключ, час включення якого узгоджено з моментом закінчення прямого імпульса струму. У такий спосіб показано шлях виготовлення магнітних ключів для імпульсів наносекундного діапазону тривалості. По-друге, шунтування розрядної камери шляхом додавання в схему джерела живлення магнітного ключа, а також точний підбір його параметрів на основі викладеного алгоритму дає змогу створити умови для безперешкодного слідування розрядних імпульсів шляхом розрядження діелектричного

бар'єра, на якому накопичується електричний заряд. По-третє, завдяки енергії, що була накопичена в діелектричному бар'єрі під час протікання прямого імпульса струму, на 60 % підвищується величина енергії, що виділяється в розрядній камері під час дії імпульсного бар'єрного розряду.

Фінансується на кошт держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 04.07.2017, протокол № 2. Державний реєстраційний номер 0117U007714. КПКВК 6541030.

1. СанПіН 4630-88 Правила, Норми. Санітарні правила і норми охорони поверхневих вод від забруднення. СРСР, 1988.
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830> .
3. Берека В.О., Кондратенко І.П., Електророзрядні технології обробки води та критерії доцільності їх використання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. No 58. С. 90–100. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>
4. Celestin S., Bonaventura Z., Guaitella O. Influence of surface charges on the structure of a dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: experiment and modeling . *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 47. Pp. 22810 (p1 – p6). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009078>
5. Gibalov V.I., Pietsch G.J. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000. Vol. 33. Pp. 2618–2636. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/315>
6. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma chemistry and plasma processes*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>
7. Божко І.В., Кондратенко І.П., Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089>
8. Волков И.В., Зозулев В.И., Спирин В.М., Шолох Д.А. Особенности формирования импульсов в согласующих узлах магнитно-полупроводниковых генераторов. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 73–74.
9. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов М.: Советское радио, 1968. 476 с.
10. Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В. Розробка комплексу для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С.80–87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080>

MATCHING OF COMPATIBLE WORK OF SHORT HIGH-VOLTAGE PULSES OF TENSION GENERATOR AND WATER TREATMENT CHAMBER BY DINT OF PULSE BARRIER DISCHARGE V.O.Bereka , I.P.Kondratenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: bereka.v@ukr.net.

A technique for calculating the parameters of a magnetic switch as an element of a generator of short high-voltage pulses of tension to coordinate its compatible work with a water treatment chamber by dint of pulse barrier discharge is shown. The expediency and efficiency of using such a switch as an element that, by shunting, the discharge chamber, discharges the barrier to the arrival of the next voltage pulse has been confirmed. It is proved that with the accepted geometrical dimensions of the discharge chamber and the amplitude of the pulse voltage, provided that the magnetic switch is present that it is possible to increase the practical use of electricity by ~ 40% due to that which was accumulated in the dielectric barrier in one discharge. Ref.10, fig. 5.

Keywords: pulse barrier discharge, water treatment, magnetic switch.

1. SanPin 4630-88 Pravyla, Normy. *Sanitarni pravyla i normy ohorony poverkhnevyykh vod vid zabrudnenia*. SRSR, 1988. (Ukr)
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830> .
3. Bereka V., Kondratenko I. Electric discharge water treatment technologies and criteria of expediency of their use. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. No 58. Pp. 90–100. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090> (Ukr)
4. Celestin S., Bonaventura Z., Guaitella O. Influence of surface charges on the structure of a dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: experiment and modeling. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 47. Pp. 22810 (p1 – p6). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009078>
5. Gibalov V.I., Pietsch G.J. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2000. Vol. 33. Pp. 2618–2636. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/315>
6. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma chemistry and plasma processes*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>
7. Bozhko I., Kondratenko I., The efficiency of treatment of an aqueous solution of methylene blue by a pulsed barrier discharge on its surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089> (Ukr)
8. Volkov I., Zozuliov V., Spirin V., Sholokh D. Features of formation pulses in matching nodes of magnetic semiconductor generators // *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 2. Pp. 73–74. (Rus)
9. Mieierovich L., Vatin I., Zaitsev E., Kandykin V. *Magnitnyie generator impulsov M.: Sovetskoie radio*, 1968. 476 p. (Rus)
10. Bozhko I., Karlov O., Kondratenko I., Charnyi D., Rozrobka kompleksu dlia obrobky vody impulsnym bariernym rozriadom, *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080> (Ukr)

Надійшла: 18.08.2021

Received: 18.08.2021

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.028>**ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД НАДАННЯ СИСТЕМАМИ
НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОСЛУГИ БАЛАНСУВАННЯ В ОЕС
УКРАЇНИ****Є.В. Парус^{1*}**, канд. техн. наук, **І.В. Блінов^{1**}**, докт. техн. наук, **Д.О. Олефір²**¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

² ПрАТ «Укргідроенерго»,

Вишгород, 07300, Україна

e-mail: paruseugene@gmail.com, blinovigor81@gmail.com, d.olefir@uhe.gov.ua

Представлено розрахункову модель оцінювання економічного ефекту від надання системами накопичення електричної енергії послуг Оператору системи передачі з балансування електроенергії в сегменті балансуємого ринку. Модель реалізує імітацію послідовного заряджання та розряджання накопичувачів (тобто послідовним наданням послуг розвантаження та навантаження). Наведено особливості врахування вартості купівлі, встановлення та обслуговування систем накопичення електричної енергії з приведенням як до гарантованого строку експлуатації, так і до гарантованого ресурсу циклів заряджання/розряджання. Показано приклад застосування розрахункової моделі для оцінювання економічного ефекту та строку окупності систем накопичення електричної енергії в разі надання послуг балансування електричної енергії в сегменті балансуємого ринку. Бібл. 15.

Ключові слова: системи накопичення електричної енергії, ринок електричної енергії, балансуєчий ринок.

Вступ. Розвиток електроенергетики України відбувається в умовах функціонування нової моделі ринку електричної енергії відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] та збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України [2, 3]. Важливо, що ВДЕ є нерегульованими джерелами виробництва електричної енергії з різко нерівномірним графіком покриття навантаження. За розрахунками НЕК «Укренерго» в ОЕС України вже фактично не вистачає наявних маневрових потужностей електростанцій, здатних забезпечити функціонування встановленої потужності ВДЕ. Поточна похибка прогнозування відпуску електричної енергії з ВДЕ призводить до додаткових суттєвих витрат на врегулювання небалансів [4], що залежать від ціни на балансуємому ринку, а також обумовлює потреби ОЕС України в обсягах додаткових регулюючих потужностей на ринку допоміжних послуг (РДП) [5]. Розвитку та збільшенню обсягів швидких резервів потужності в енергосистемі досі не надавалося достатньої уваги. З огляду на той факт, що зміна навантаження на енергоблоках ТЕС відбувається зі швидкістю 3...5 МВт/хв, лише агрегати ГЕС та ГАЕС здатні ефективно балансувати швидкозмінний графік навантажень ВДЕ завдяки високій мобільності (зміна потужності на агрегатах ГЕС та ГАЕС ПрАТ «Укргідроенерго» триває від кількох десятків секунд до декількох хвилин).

З огляду на нерегульований та стохастичний характер відпуску електричної енергії сонячними та вітровими електростанціями одним із перспективних напрямків балансування графіку ОЕС України є використання систем накопичення електричної енергії (СНЕ) [6, 7], які мають забезпечувати багаторівневу систему підтримки операційної безпеки режимів енергосистем. До основних способів такої підтримки належать: сезонне регулювання балансу виробництва/споживання електричної енергії в енергосистемах; добове регулювання балансу виробництва/споживання електричної енергії в енергосистемах, а також вирівнювання добових графіків відпуску електроенергії чи електроспоживання в окремих точках комерційного

обліку; вирівнювання графіків відпуску електроенергії чи електроспоживання в окремих точках комерційного обліку в межах розрахункової години; регулювання балансу виробництва/споживання електричної енергії в енергосистемах, а також вирівнювання добових графіків відпуску електроенергії чи електроспоживання в окремих точках комерційного обліку на рівні одиниці реального часу 15 хвилин. До потенційно перспективних напрямків застосування СНЕ також відносять низку задач управління переобтяженнями системоутворювальних електричних перетинів та розподільних електричних мереж (ЕМ).

Сезонне регулювання режимів енергосистем (як і добове) вимагає встановлення СНЕ великої ємності, які значно впливатимуть на режими в періоди профіциту виробництва електричної енергії та потенційно повністю покриватимуть електроспоживання за відсутності генерації з ВДЕ. Так, за викладеними в роботі [8] оцінками, для задоволення потреб у сезонному регулюванні режимів ОЕС України необхідно реалізувати СНЕ сумарною ємністю від 6 до 15 % річного споживання. Тому втілення проєктів сезонного регулювання режимів енергосистем вимагає врахування значного впливу СНЕ на режими в місці встановлення цих систем [9]. Проблеми впровадження СНЕ великої потужності на системних підстанціях ОЕС України розглянуто в роботі [10]. Складніші задачі розв'язуються в частині регулювання режимів розподільних ЕМ [11–13], де оптимізації підлягає як ємність накопичувачів, так і місце їхнього встановлення [14]. Для наведених вище та інших задач проєкти встановлення й експлуатації СНЕ вимагають детальної оптимізації режимів енергосистем чи значної їхньої частини та повинні узгоджуватися з Операторами відповідних ЕМ. Приклад оптимізації ємності та місць встановлення СНЕ у розподільних ЕМ наведений у роботі [15].

Простіше в найближчій перспективі розв'язуються задачі балансування електричної енергії в сегменті балансуючого ринку (БР) та регулювання частоти. Надання Оператору системи передачі (ОСП) таких послуг можливо реалізувати великою кількістю СНЕ на різних підстанціях з ємністю, яка не впливатиме суттєво на режими ОЕС України чи розподільних ЕМ у точці приєднання. Проте для втілення навіть таких проєктів необхідно обґрунтувати їхню економічну доцільність з огляду на високу вартість та обмежений ресурс сучасних накопичувачів електричної енергії.

Мета статті полягає в розробці моделі оцінки економічного ефекту від використання СНЕ для надання ОСП послуг підтримки операційної безпеки режимів ОЕС України передусім у частині балансування електричної енергії в сегменті БР.

Постановка задачі оцінки економічного ефекту від застосування СНЕ в сегменті БР.

Основна мета інвестора в СНЕ – отримання максимальної різниці між вигодою Pr_{Σ} від експлуатації системи накопичення та витратами на закупівлю, монтаж і обслуговування СНЕ $Cost_{\Sigma}$ протягом строку експлуатації накопичувачів:

$$Pr_{\Sigma} - Cost_{\Sigma} \rightarrow \max [\text{€}]. \quad (1)$$

Очевидно, що для приватних інвесторів важливою умовою перспективності економічного проєкту є його беззбитковість, тобто відношення, $Pr_{\Sigma} > Cost_{\Sigma}$ яке відіграє роль основного економічного обмеження при розв'язанні задачі визначення найбільш економічно вигідної для приватного інвестора конфігурації СНЕ.

Безвідносно до покладених на СНЕ задач регулювання режиму ЕМ СНЕ реалізують лише функції накопичення та видачі накопиченої електричної енергії. Для аналізу режимів ОЕС України СНЕ подається додатковим джерелом електричної енергії чи додатковим навантаженням. Тому до критерію оптимізації (1) відноситься номінальна ємність накопичувачів електричної енергії, $W_{\text{ном}}^{(\text{CHE})}$ яка впливає на вартість закупівлі, встановлення та обслуговування цих засобів. $Cost_{\Sigma}(W_{\text{ном}}^{(\text{CHE})})$ У разі розрахунків вигоди від використання СНЕ треба зважати на обмежений ресурс циклів заряджання/розряджання накопичувачів. Так, для сучасних літєвих акумуляторів кількість циклів повного заряду й повного розряду до деградації початкової ємності на 20 % не перевищує 1000. Зазвичай виробники літєвих акумуляторів не рекомендують рівні заряду акумуляторів нижче 10 % та вище 90 %, оскільки саме в цих станах спостерігається підвищена деградація ємності. Урахування зон підвищеної деградації в про-

цесі експлуатації акумуляторних батарей традиційно здійснюється показником глибини розряду акумулятора, $DoD_{\phi}^{(CHE)}$ який визначає відношення робочого діапазону заряджання/розряджання акумулятора $W_{роб}^{(CHE)}$ до його номінальної ємності:

$$DoD_{\phi}^{(CHE)} = \frac{W_{роб}^{(CHE)}}{W_{ном}^{(CHE)}} \rightarrow W_{роб}^{(CHE)} = DoD_{\phi}^{(CHE)} \cdot W_{ном}^{(CHE)}. \quad (2)$$

В умовах активного удосконалення конструкції літєвих акумуляторів неможливо сформувати адекватну статистичну інформацію щодо збільшення ресурсу циклів заряд/розряд зі зменшенням глибини розряду акумуляторів. Тому в оцінках економічної ефективності від використання СНЕ треба орієнтуватися на рекомендовану виробником глибину розряду накопичувачів та гарантовану в цьому режимі роботи кількість циклів заряд/розряд до деградації початкової ємності на 20 %. Вигоду від використання СНЕ в разі надання послуг підтримки операційної безпеки ОЕС України треба розраховувати з огляду на робочий обсяг заряду/розряду. $W_{роб}^{(CHE)}$ Тоді цільова функція (1) з урахуванням (2) набуває вигляду

$$Pr_{\Sigma}(W_{роб}^{(CHE)}) - Cost_{\Sigma}(W_{ном}^{(CHE)}) \rightarrow \max [\text{€}]. \quad (3)$$

Для визначення доступного обсягу відпуску електроенергії від СНЕ треба додатково враховувати споживання власних потреб цієї системи. Так, споживання електроенергії СНЕ призводить до того, що ці засоби в режимі розряду віддають в ЕМ менший обсяг електроенергії, ніж було накопичено. Зазвичай виробники СНЕ регламентують цей чинник коефіцієнтом ефективності, $K_{\text{еф}}^{(CHE)}$ що визначає у відносних одиницях частку накопиченого обсягу електроенергії, яку СНЕ здатна повернути в ЕМ. Тому обмеження доступного до видачі в ЕМ обсягу електроенергії для циклу повного заряду й повного розряду СНЕ визначається умовою

$$W_{розр}^{(CHE)} \leq K_{\text{еф}}^{(CHE)} \cdot W_{зар}^{(CHE)},$$

де $W_{зар}^{(CHE)}$ – обсяг заряду СНЕ; $W_{розр}^{(CHE)}$ – обсяг розряду СНЕ.

Тоді межа комерційної беззбитковості одного циклу заряд/розряд СНЕ оцінюється як

$$W_{розр}^{(CHE)} \cdot C_{\text{прод}}^{(p)} - W_{зар}^{(CHE)} \cdot C_{\text{куп}}^{(p)} = W_{зар}^{(CHE)} \cdot (K_{\text{еф}}^{(CHE)} \cdot C_{\text{прод}}^{(p)} - C_{\text{куп}}^{(p)}) \geq 0, \quad (4)$$

де $C_{\text{куп}}^{(p)}$ – ринкова ціна електричної енергії, накопиченої з ЕМ у режимі заряду СНЕ; $C_{\text{прод}}^{(p)}$ – ринкова ціна електричної енергії, відданої в ЕМ у режимі розряду СНЕ.

У сегменті БР засоби СНЕ реалізують послугу «на розвантаження» зарядженням акумуляторів, а послугу «на завантаження» – розрядженням акумуляторів. Отже, межа економічної доцільності участі СНЕ на БР виглядає як

$$K_{\text{еф}}^{(CHE)} \cdot C_{\text{зав}}^{(CHE)} \geq C_{\text{розв}}^{(CHE)}, \quad (5)$$

де $C_{\text{розв}}^{(CHE)}$, $C_{\text{зав}}^{(CHE)}$ – ціни послуг відповідно розвантаження і завантаження в сегменті БР.

Наведені межі економічної ефективності одного циклу заряду/розряду СНЕ не враховують тарифи послуг ОСП та Оператора системи розподілу (ОСР). У той час, як виробники та споживачі електроенергії сплачують такі тарифи відповідно до обсягів відпущеної в ЕМ та спожитої електричної енергії, для підключених безпосередньо до ЕМ СНЕ необхідно окреме врегулювання питання тарифікації з огляду на особливі функції СНЕ.

Максимальні струми заряду $I_{\text{max(зар)}}^{(CHE)}$ та розряду $I_{\text{max(розр)}}^{(CHE)}$ акумуляторів СНЕ визначають обмеження обсягів відповідно накопиченої та відданої електроенергії за умовами обмеження термічного нагріву акумуляторів в умовах відповідно заряду та розряду. Виробники акумуляторів зазвичай регламентують ці чинники в термінах максимальних потужностей заряду $P_{\text{max(зар)}}^{(CHE)}$ та розряду $P_{\text{max(розр)}}^{(CHE)}$ накопичувачів, приведених до номінальної напруги на виході СНЕ $U_{\text{ном}}^{(CHE)}$. Якщо СНЕ встановлюється на системній підстанції з метою надання ОСП послуг із балансування режиму ЕМ у сегментах БР чи РДП, то для оцінки економічного ефекту від експлуатації СНЕ достатньо використовувати визначені виробником значення потужностей у

процесі визначення доступного обсягу послуг розвантаження $W_{\max(\text{розв})}^{(\text{CHE})}$ та завантаження $W_{\max(\text{зав})}^{(\text{CHE})}$:

$$\begin{cases} W_{\max(\text{розв})}^{(\text{CHE})} \leq P_{\max(\text{зар})}^{(\text{CHE})} \cdot \Delta T_{\text{рч}} \\ W_{\max(\text{зав})}^{(\text{CHE})} \leq P_{\max(\text{розр})}^{(\text{CHE})} \cdot \Delta T_{\text{рч}} \end{cases},$$

де $\Delta T_{\text{рч}}$ – прийнята у сегментах БР і РДП України одиниця реального часу 15 хвилин.

Для розробки законів регулювання СНЕ, так само, як і в умовах використання СНЕ як засобів контролю переобтяжень чи регулювання напруг в ЕМ, треба додатково враховувати вплив СНЕ на режими регульованих мереж. Наприклад, у режимі заряду СНЕ реалізує функцію додаткового навантаження, що призводить до збільшення значень струмів від центру живлення до місця встановлення СНЕ та загального зниження напруг у вузлах ЕМ. У режимі розряду СНЕ реалізує функцію додаткового джерела електричної енергії, що призводить до зменшення значень струмів від центру живлення до місця встановлення СНЕ та загального підвищення напруг у вузлах ЕМ.

Модель режиму ЕМ традиційно подається рівняннями балансу струмів у вузлах та обмеженнями на рівні напруг у цих вузлах і на значення струмів у гілках заступної схеми ЕМ. Результати моделювання режимів ЕМ подаються гранично допустимими значеннями струмів заряду $I_{\max(\text{зар})}^{(\text{ЕМ})}$ та розряду $I_{\max(\text{розр})}^{(\text{ЕМ})}$ на фідері підключення СНЕ за умовами контролю режимів ЕМ. Тоді розраховані для контрольованих періодів доби m обмеження струмів на фідері підключення СНЕ до ЕМ $I_{\max(\text{зар}),m}^{(\text{ЕМ})}$ та $I_{\max(\text{розр}),m}^{(\text{ЕМ})}$ разом із власними обмеженнями на струм заряду $I_{\max(\text{зар})}^{(\text{CHE})}$ і розряду $I_{\max(\text{розр})}^{(\text{CHE})}$ з урахуванням розрахункових значень напруг у вузлі підключення СНЕ відповідно в режимах заряду $U_{\text{р(зар)},m}^{(\text{ЕМ})}$ і розряду $U_{\text{р(розр)},m}^{(\text{ЕМ})}$ формують систему обмежень роботи СНЕ в окремі періоди доби. Такі обмеження визначають технологічні максимально допустимі значення потужностей заряду і розряду СНЕ в розрахункові періоди часу та подаються як

$$\begin{cases} P_{\max(\text{розр}),m}^{(\text{CHE})} \leq \min(I_{\max(\text{розр})}^{(\text{CHE})} \cdot U_{\text{р(розр)},m}^{(\text{ЕМ})}, I_{\max(\text{розр}),m}^{(\text{ЕМ})} \cdot U_{\text{р(розр)},m}^{(\text{ЕМ})}) \\ P_{\max(\text{зар}),m}^{(\text{CHE})} \leq \min(I_{\max(\text{зар})}^{(\text{CHE})} \cdot U_{\text{р(зар)},m}^{(\text{ЕМ})}, I_{\max(\text{зар}),m}^{(\text{ЕМ})} \cdot U_{\text{р(зар)},m}^{(\text{ЕМ})}) \end{cases} \forall m \in \{1..24\}. \quad (6)$$

Обмеження нерівностей (6) накладає технологічні межі на оптимізовані за економічними критеріями в імітаційній моделі обсяги заряду/розряду СНЕ. Наприклад, на балансуєчому ринку послуга балансування електричної енергії надається протягом нормативної одиниці реального часу 15 хвилин, за які обсяги накопичення/відпуску електричної енергії не можуть порушувати визначені в (6) межі потужностей відповідно заряду/розряду.

Крім того, (6) дає змогу визначити мінімальну межу ємності СНЕ, необхідну для реалізації покладених на ці засоби задач, а також верхню межу ємності, яку доцільно встановлювати в заданому вузлі ЕМ. Система обмежень (6) повинна також ураховуватись впродовж розробки законів регулювання режимів СНЕ в ЕМ протягом доби.

Для ОСП та ОСР як власників СНЕ економічний ефект від впровадження цих засобів так само оцінюється цільовою функцією (3). Проте до економічної ефективності СНЕ висуваються менш жорсткі вимоги (4). Дійсно, оператори ЕМ використовуватимуть СНЕ передусім для власних потреб регулювання режимів, і для розв'язання задачі вибору оптимальної ємності та місця встановлення СНЕ орієнтуються на ефект впливу на режим. На противагу цьому приватні інвестори в СНЕ орієнтуються на таке використання цих засобів, за якого максимізується вигода в (3). Така принципово інша постановка задачі для операторів ЕМ в окремих випадках призводитиме навіть до вибору іншого оптимального рішення щодо ємності та місця встановлення СНЕ порівняно з пошуком оптимального рішення для приватного інвестора. Відповідно, якщо для приватного інвестора економічно збиткове чи низькорентабельне рішення принципово не прийнятне, то для операторів ЕМ економічні витрати на встановлення та експлуатацію СНЕ передусім порівнюватимуться з витратами на альтернативні способи й системи регулювання режимів ЕМ за умов дотримання регламентованих

обмежень режимних параметрів. Тому для операторів ЕМ може вважатися допустимим впровадження нерентабельного (але більш ефективного порівняно з альтернативними варіантами) проекту СНЕ. У цьому випадку від'ємний баланс, $Pr_{\Sigma} - Cost_{\Sigma} < 0$ тобто сумарні економічні збитки, $L_{\Sigma\Sigma} = -(Pr_{\Sigma} - Cost_{\Sigma})$ компенсуватиметься з відповідного тарифу як частина витрат на послуги оператора ЕМ іншим учасникам ринку електричної енергії.

Особливості врахування інвестиційної складової СНЕ. Інвестиційна складова СНЕ враховує витрати на закупівлю та встановлення СНЕ в ЕМ. У найпростішому випадку встановлення одного накопичувача з відомою ємністю W у заданій точці ЕМ значення інвестиційної складової на розрахунковий період часу h визначається як

$$C_h^{\text{інв}} = \left(1 + \frac{R}{100}\right) \cdot \left(\frac{CI}{K_h} + S_h\right) [\text{€}],$$

де $R, \%$ – рентабельність на капітальні інвестиції, яка встановлюється НКРЕ на основі практики галузі, але не менше облікової ставки НБУ; $100, \%$ – коефіцієнт перерахунку процентів у відносні одиниці; CI – капіталовкладення в СНЕ, K_h – кількість розрахункових періодів протягом заданого строку експлуатації СНЕ, S_h – приведені до розрахункового періоду витрати на обслуговування СНЕ.

У практичних розрахунках для оцінки економічного ефекту від надання послуг балансування обсягів виробництва/споживання електричної енергії в ОЕС України зручно приводити інвестиційну складову до розрахункової години:

$$C_{(\text{год})}^{\text{інв}} = \left(1 + \frac{R}{100}\right) \cdot \left(\frac{CI_{\text{пов}} + S_{\text{пов}}}{8760 \cdot N_{\text{експл}}}\right) [\text{€}], \quad (7)$$

де $CI_{\text{пов}}$ – повна вартість закупівлі та монтажу СНЕ; $S_{\text{пов}}$ – розрахункові витрати на обслуговування СНЕ протягом визначеного виробником нормативного строку експлуатації; $N_{\text{експл}}$ – визначений виробником нормативний строк експлуатації СНЕ в роках; 8760 – кількість годин у році.

Виробники СНЕ регламентують як нормативний строк експлуатації пристроїв, так і гарантовану кількість циклів заряд/розряд акумуляторів СНЕ $K_{\text{з/р}}^{\text{норм}}$ до деградації акумуляторів на 20% від початкової ємності. Тому для розв'язання окремих задач треба приводити інвестиційну складову саме до одного циклу заряд/розряд:

$$C_{(\text{ц})}^{\text{інв}} = \left(1 + \frac{R}{100}\right) \cdot \left(\frac{CI_{\text{пов}} + S_{\text{нц}}}{K_{\text{з/р}}^{\text{норм}}}\right) [\text{€}], \quad (8)$$

де $S_{\text{нц}}$ – витрати з обслуговування протягом періоду, за який вичерпується гарантований ресурс кількості циклів заряд/розряд акумуляторів СНЕ.

Спосіб урахування інвестиційної складової обирається залежно від інтенсивності процесів заряду/розряду СНЕ. Наприклад, у задачах контролю переобтяжень розподільних мереж передбачається інтенсивність використання СНЕ на рівні одного циклу заряд/розряд за добу, і визначена виробником кількість таких циклів вичерпується протягом гарантованого строку експлуатації. У цих випадках інвестиційна складова та подальші розрахунки приводяться до гарантованого строку експлуатації відповідно до виразу (7). На балансуєчому ринку заряд чи розряд СНЕ здійснюється протягом 15 хвилин, і за розрахункову годину реалізується принаймні один цикл заряду/розряду. Не складно визначити, що в цьому випадку гарантований ресурс циклів заряду/розряду СНЕ буде вичерпаний менше ніж за рік. Тому розрахунки приводяться до гарантованої кількості заряду/розряду (8), а кількість таких циклів визначається за результатами імітаційного моделювання. Розгляд складніших випадків (послуги підтримки чи відновлення частоти або вирівнювання моментальних значень потужності ВДЕ) виходять за межі цієї публікації.

Імітаційна модель надання послуги балансування електричної енергії. Для побудови моделі імітації процедур участі СНЕ на БР приведемо технологічні функції СНЕ до

прийнятої в цьому ринковому сегменті термінології. Так, послуга завантаження енергоагрегатів електростанцій визначає збільшення обсягів виробництва електричної енергії в ОЕС України. Таку послугу СНЕ реалізує розрядом накопиченої електричної енергії. Послуга розвантаження енергоагрегатів електростанцій визначає зменшення обсягів виробництва електричної енергії в ОЕС України та реалізується зарядом акумуляторів СНЕ.

Існує два принципи надання послуг балансування режимів ОЕС України:

- симетричне регулювання заряду СНЕ;
- регулювання режиму послідовним повним зарядом та повним розрядом.

Повноцінний опис симетричних послуг регулювання режиму ОЕС України використанням СНЕ виходить за межі цієї публікації. Умовою симетричного регулювання режиму ОЕС України є рівність обсягів «завантаження» і «розвантаження», що для СНЕ означає рівність обсягів заряду та розряду. Але для СНЕ обсяг розряду завжди менший за обсяг заряду. Тобто в умовах нормованої рівності обсягів ресурсів завантаження та розвантаження СНЕ поступово втрачатиме рівень заряду і врешті-решт втратить можливість надання послуги «завантаження», тобто подальшого розряду акумуляторів.

Тому надання СНЕ послуг симетричного регулювання режимів ОЕС України вимагатиме відповідних змін до нормативно-правової бази для врахування регулярних змін стану готовності СНЕ до надання різних видів послуг регулювання режимів ОЕС України.

Альтернативним способом розв'язання проблеми відновлення половинного заряду накопичувачів СНЕ є створення віртуальної електростанції у формі взаємодії СНЕ та маневрових генераторів електростанцій, які відповідними змінами рівня завантаження відновлюватимуть стан готовності накопичувачів до симетричного регулювання. Особливо перспективним вбачається взаємодія СНЕ з генераторами ГЕС з огляду на низьку собівартість відпуску електричної енергії гідроагрегатами та можливості їхньої роботи в маневрових режимах. Залежно від особливостей постановки задачі така віртуальна електростанція моделюється двома способами: СНЕ з функцією відновлення рівня половинного заряду зміною завантаження гідрогенератора та розширення діапазону надання гідрогенератором послуг регулювання частоти використанням СНЕ.

Розглянемо детальніше імітаційну модель регулювання режиму ОЕС України послідовним повним зарядом та повним розрядом СНЕ. Ця модель використовує такі припущення:

1. Цикли повного заряду та повного розряду СНЕ здійснюються в межах робочого діапазону накопичувачів $W_{\text{роб}}^{(\text{СНЕ})}$ згідно з (2). Наведена умова гарантує утримання СНЕ від станів, для яких характерна підвищена деградація акумуляторів, та забезпечує від суттєвого зменшення строку її експлуатації.

2. Вважається, що СНЕ реалізує заряд накопичувачів за граничною ціною розвантаження на БР, $C_{\text{розв}}^{(\text{БР})}$ а розряд СНЕ реалізує за граничною ціною завантаження на БР, $C_{\text{зав}}^{(\text{БР})}$. Таке припущення імітує участь СНЕ всегменті БР та дає змогу використовувати в розрахунках опубліковану на офіційному сайті ДП НЕК «Укренерго» статистику погодинних результатів торгів на БР. З огляду на (4), вигода від реалізації циклу заряд/розряд СНЕ розраховується як

$$B_{\text{ц}}^{(\text{СНЕ})} = W_{\text{роб}}^{(\text{СНЕ})} \cdot C_{\text{зав}}^{(\text{БР})} \cdot K_{\text{еф}} - W_{\text{роб}}^{(\text{СНЕ})} \cdot C_{\text{розв}}^{(\text{БР})} = W_{\text{роб}}^{(\text{СНЕ})} \cdot (C_{\text{зав}}^{(\text{БР})} \cdot K_{\text{еф}} - C_{\text{розв}}^{(\text{БР})}). \quad (9)$$

3. Вважається, що за розрахункову годину послідовність періодів надання послуг окремо завантаження та окремо розвантаження сприятлива для реалізації принаймні одного циклу заряду/розряду СНЕ. Таке припущення дає змогу здійснювати імітаційне моделювання в термінах розрахункової години для тих годин доби, коли в ОЕС України надаються і послуга розвантаження і послуга завантаження. Години доби, коли в ОЕС України надається лише послуга завантаження чи лише послуга розвантаження, у розрахунках не враховуються. Вважається, що в ці години доби СНЕ не надає послуги балансування електричної енергії в сегменті БР.

4. Приймається, що на початку розрахункової години СНЕ розряджений і здійснює повний цикл заряду/розряду протягом розрахункової години. Таке припущення дає можливість не враховувати різницю цін у сегменті БР для суміжних годин доби.

5. Вважається, що засоби прогнозування цін у сегменті БР дають можливість заздалегідь визначати ті години доби, коли різниця цін послуг завантаження і розвантаження дає змогу отримати вигоду від участі СНЕ на БР. Умова отримання вигоди від надання СНЕ послуг балансування електричної енергії в розрахункову годину доби: $C_{\text{зав}}^{(\text{БР})} \cdot K_{\text{еф}} - C_{\text{розв}}^{(\text{БР})} > 0$. Години доби, в які наведене відношення не справджується, не враховуються в разі імітаційного моделювання.

Наведені припущення дають змогу використовувати в разі імітаційного моделювання участі СНЕ у сегменті БР відповідну надану на офіційному сайті НЕК «Укренерго» статистику результатів торгів за розрахункову годину доби. Така постановка задачі імітаційного моделювання дає змогу в цілому оцінити перспективність надання СНЕ послуг балансування електричної енергії в сегменті БР. Як наслідок дещо спотворюється значення частоти циклів заряду/розряду, а також не враховуються збільшена вигода та операційні збитки, які фактично виникатимуть за участі СНЕ в сегменті БР. Для уточнення цих чинників під час моделювання процесів участі СНЕ в сегменті БР необхідна статистична інформація про результати окремих аукціонів по кожній одиниці реального часу 15 хвилин, яка не надається у відкритому доступі.

Приклад оцінювання економічного ефекту участі СНЕ у БР. Оцінювання економічного ефекту від застосування СНЕ на потреби балансування електричної енергії в сегменті БР здійснюватиметься на прикладі СНЕ Tesla Megapack. Перерахунок вартісних показників з \$ до ₴ здійснено за курсом НБУ 26,3 ₴/\$. Облікова ставка НБУ приймається $R=8.5\%$.

За даними з офіційного сайту виробника, 33 модулі Tesla Megapack забезпечують номінальну ємність 101,6 МВт·год із коефіцієнтом ефективності 0,88. Вартість СНЕ (із встановленням включно, без ПДВ) у такій конфігурації становить 33 454 180 \$ (879 844 934 ₴), а щорічне обслуговування (без ПДВ) – 125 710 \$ (3 306 173 ₴). Гарантований термін бездефектної роботи СНЕ складає 15 років. Виробник гарантує 5000 циклів заряд/розряд в умовах глибини розряду 80 %, перш ніж ємність накопичувача деградує до 80 % від номіналу. Згідно з умовою (2) робочий діапазон ємності СНЕ складатиме 81 МВт·год.

Розрахунки вигоди від надання СНЕ послуг балансування електричної енергії виконувалися за формулою (9) із використанням статистичних даних результатів торгів за розрахункову годину на БР у торговій зоні ОЕС України за вересень 2021 року. За результатами розрахунків кількість циклів заряд/розряд за місяць склала 543, а сумарна вигода за місяць – 593 325 ₴. Середньозважена вигода на 1 цикл заряд/розряд складатиме 1 093 ₴/цикл на кожному МВт·год встановленої ємності.

Очевидно, що гарантований ресурс 5000 циклів заряд/розряд СНЕ буде вичерпаний вже за 9,2 місяця. Тому інвестиційну складову приводимо за виразом (8) до одного циклу заряд/розряд. Додаткове приведення вартості інвестицій до однієї МВт·год робочого діапазону СНЕ дає змогу безпосередньо порівняти цю складову з результатами імітаційного моделювання. Зважаючи на короткий строк вичерпання гарантованого ресурсу циклів заряд/розряд СНЕ, урахуємо витрати на обслуговування лише протягом першого року експлуатації. Тоді складова інвестицій в СНЕ для одного МВт·год робочого діапазону на один цикл заряд/розряд складає 2366 ₴, а значення цільової функції (1) становить $Pr_{(ц)} - C_{(ц)}^{\text{інв}} = 1093 - 2366 = -1273$ ₴.

До вичерпання гарантованого виробником ресурсу циклів заряд/розряд вигода від участі СНЕ у БР покриватиме лише 46 % інвестиційної складової. Отже, повна окупність СНЕ можлива лише за подальшої її експлуатації в умовах деградованої ємності накопичувачів. Не складно порахувати, що в умовах деградації акумуляторів до рівня 70 % від початкової ємності 54 % інвестиційної складової покривається за 8 319 циклів заряд/розряд, тобто за 15,3 місяця. Отже, сумарний строк окупності інвестицій у СНЕ становить 24,5 місяця, тобто 2 роки.

У наведеному прикладі за результатами розрахунків виявлено, що за чинних цін у сегменті БР отримана вигода не покриває витрати на купівлю й встановлення СНЕ. Проте, враховуючи подальшу експлуатацію СНЕ в умовах деградації ємності накопичувачів, отримано

прийнятний строк окупності інвестицій. Тобто використання СНЕ для балансування електричної енергії на БР економічно доцільне, зважаючи на ціни в цьому ринковому сегменті та технічні можливості сучасних накопичувачів. Проте водночас треба зважати на відносно короткий строк експлуатації СНЕ у змодельованому режимі. Для прийняття остаточних рішень треба використовувати ретроспективну інформацію за довші проміжки часу та враховувати низку додаткових чинників.

Висновки. Розроблена розрахункова модель дала змогу здійснити оцінку економічного ефекту від надання СНЕ послуги балансування електричної енергії в сегменті БР України імітацією режимів послідовного заряду й розряду накопичувачів із використанням оприлюдненої на офіційному сайті ДП НЕК «Укренерго» ретроспективної інформації щодо погодинних результатів торгів на БР за вересень 2021 року.

Результати розрахунків засвідчили, що вигода від участі СНЕ на БР за строк оціночного ресурсу циклів заряд/розряд відшкодовує лише 46 % інвестиційної складової. Додаткова оцінка економічного ефекту від роботи СНЕ в умовах деградованої ємності акумуляторів дала змогу оцінити строк окупності інвестицій у СНЕ на рівні двох років.

Отже, з огляду на високу інтенсивність процесів заряджання/розряджання СНЕ в процесі надання ОСП послуг регулювання частоти чи балансування електричної енергії, оцінку економічного ефекту треба здійснювати приведенням характеристик СНЕ до одного циклу заряджання/розряджання для однієї МВт·год ємності робочого діапазону. Водночас для оцінки повного строку окупності треба виконувати розрахунки імітацією участі СНЕ на БР до вичерпання гарантованого ресурсу циклів заряджання/розряджання та в умовах подальшого функціонування СНЕ зі зниженим рівнем ємності накопичувачів.

Фінансується за НДР «Моделі та засоби оцінки підвищення ефективності інтеграції об'єктів низьковуглецевої енергетики в ОЕС України». Цільовий міждисциплінарний проект НАН України «Науково-технічні та економіко-екологічні засади низьковуглецевого розвитку України». Виконується за Розпорядженням Президії від 11.06.2021 № 304. Державний реєстраційний номер роботи 0121U111982. КПКВК 6541030.

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII
2. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>
3. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України. (За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). *Вісник НАН України*. 2021. № 3. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/vism2021.03.020>
4. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О. Складові моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 72–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072>
5. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Оцінка роботи електростанцій при наданні допоміжних послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 55–60.
6. Electrical Energy Storage. White paper. IEC. 2019. P. 79.
7. Bucciarelli M., Paoletti S., Vicino A. Optimal sizing of energy storage systems under uncertain demand and generation. *Applied Energy*. 2018. Vol. 225. Pp. 611–621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.153>
8. Басок Б.І., Буткевич О.Ф., Дубовський С.В. Техніко-економічні аспекти оцінювання перспектив декарбонізації об'єднаної енергосистеми України. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.055>
9. Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage. 2019. White paper. IEC. 2019. P. 102.
10. Буткевич О.Ф., Юнеєва Н.Т., Гуреева Т.М., Стецюк П.І. Задача розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності контрольованими перетинами. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.046>
11. Dasa Choton K., Bassa O., Kothapallia G., Mahmoudb T.S., Habibia D. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. No 91. Pp. 1205–1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068>

12. Farrokhifar M. Optimal operation of energy storage devices with RESs to improve efficiency of distribution grids; technical and economical assessment. *Int J Electr Power Energy Syst.* 2016. No 74. Pp. 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.029>
13. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка.* 2021. № 4. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
14. Zhang Y, Dong Z.Y., Luo F, Zheng Y, Meng K, Wong K.P. Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration. *IET Renew Power Gener.* 2016. No 10(8). Pp. 1105–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0542>
15. Arias J.N.B., Romero R., López J.C., Rider M.J. Optimal Sizing of Stationary Energy Storage Systems Participating in Primary Frequency Regulation Markets. 2018 *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*. 2018. Pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2018.8511649>

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC EFFECT OF ENERGY STORAGE SYSTEM PROVIDING THE BALANCING SERVICES IN THE IPS OF UKRAINE

E.V. Parus¹, I.V. Blinov¹, D.O. Olefir²

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

²PJSC "Ukrhydroenergo",
Vyshhorod, 07300, Ukraine

The article presents a simulation model for estimating the economic effect of the energy storage systems providing the balancing electricity to the Transmission System Operator in the balancing market segment. The model simulates the serial charge and discharge of storage (i.e., sequential provision of unloading and loading services). Peculiarities of considering the cost of purchase, installation, and maintenance of energy storage systems with reduction both to the guaranteed service life and the guaranteed resource of charge/discharge cycles are given. An example of the application of the simulation model for estimating the economic effect and payback period of energy storage systems in the provision of electricity balancing services in the balancing market segment is shown. Ref. 15.

Keywords: energy storage system, electricity market, balancing market.

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No. 2019-VIII of 13.04.2017. (Ukr)
2. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2020. No 3. Pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052> (Ukr)
3. Blinov I. Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine. *Visnyk NAN Ukrainy.* 2021. No 3. Pp. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020> (Ukr)
4. Ivanov H.A., Blinov I.V., Parus Ye.V., Miroshnyk V.O. Components of model for analysis of influence of renewables on the electricity market price in Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2020. No 4. Pp. 72–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072> (Ukr)
5. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V. Operation evaluation of power plants in the provision of ancillary services of primary and secondary frequency control in the Ukrainian power system. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2013. No 5. Pp. 55–60. (Ukr)
6. Electrical Energy Storage. White paper. IEC. 2019. P.79.
7. Bucciarelli M., Paoletti S., Vicino A. Optimal sizing of energy storage systems under uncertain demand and generation. *Applied Energy.* 2018. Vol. 225. Pp. 611–621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.153>
8. Basok B.I., Butkevych O.F., Dubovskiy S.V. Technical and economic aspects of decarbonization prospects assessing of the interconnected power system of Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2021. No 5. Pp. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.055> (Ukr)
9. Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage. 2019. White paper. IEC. 2019. P. 102.
10. Butkevych O.F., Yunieieva N.T., Hurieieva T.M., Stetsyuk P.I. The Problem of Electric Power Storages' Placement in the IPS of Ukraine taking into account its influence on the power flows transmitted by controlled cutsets. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2020. No 4. Pp. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.046> (Ukr)

11. Dasa Choton K., Bassa O., Kothapallia G., Mahmoudb T.S., Habibia D. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. No 91. Pp. 1205–1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.068>
12. Farrokhifar M. Optimal operation of energy storage devices with RESs to improve efficiency of distribution grids; technical and economical assessment. *Int J Electr Power Energy Syst*. 2016. No 74. Pp. 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.029>
13. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus E.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storadge system in electric networks. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 54. Pp. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
14. Zhang Y, Dong Z.Y., Luo F, Zheng Y, Meng K, Wong K.P. Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration. *IET Renew Power Gener*. 2016. No 10(8). Pp. 1105–13. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0542>
15. Arias J.N.B., Romero R., López J.C., Rider M.J. Optimal Sizing of Stationary Energy Storage Systems Participating in Primary Frequency Regulation Markets. 2018 *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*. 2018. Pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2018.8511649>

Надійшла: 24.11.2021

Received: 24.11.2021

УДК 621.314.057

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038>

ПЕРЕНАПРУГИ ПІД ЧАС ДУГОВИХ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 35 кВ

М.С. Сегеда*, докт. техн. наук, О.М. Равлик**, докт. техн. наук, З.М. Бахор***, канд. техн. наук, А.Я. Яцейко****, канд. техн. наук, Н.Б. Дьяченко*****, канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

e-mail: mseheda@ukr.net

Наведено результати дослідження перенапруг під час дугових однофазних замикань на землю переривчастого характеру в електричній мережі 35 кВ з ізольованою нейтраллю. Комп'ютерним моделюванням перехідних процесів у електричній мережі отримано максимальні кратності перенапруг у місці виникнення дугових однофазних замикань на землю, які перевищують теоретично очікувані за відомими теоріями виникнення та розвитку перенапруг. Показано зміну рівня перенапруг на шинах 35 кВ підстанцій мережі, електрично зв'язаних із місцем виникнення однофазного замикання на землю, та вплив кабельної лінії на кратність перенапруг. Бібл. 12, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: перенапруга, однофазне замикання, електрична мережа, комп'ютерне моделювання.

Вступ. В Україні для живлення споживачів електроенергії в сільській місцевості використовують електричні мережі (ЕМ) напругою 35 кВ. Здебільшого ці мережі є замкнені або з двостороннім живленням, але нормально функціонують за радіальним принципом. Переважно ці мережі сформовані повітряними лініями (ПЛ). Кабельні лінії (КЛ) 35 кВ із кабелів з паперово-оливковою ізоляцією будувалися винятково за необхідності і зазвичай у містах та промислових зонах.

За останні роки в сільській місцевості з'явилися нові підприємства (нові споживачі електроенергії), що спричинило розвиток ЕМ 35 кВ. Будуються нові ЛЕП із використанням кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ). Структура ЕМ 35 кВ змінюється: з повітряних вони перетворюються у повітряно-кабельні.

Електричні мережі 35 кВ можуть працювати як з ізольованою нейтраллю, так і з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор. Дугогасні реактори використовують у мережах 35 кВ з ємнісним струмом замикання на землю понад 10 А. Якщо ж електрична мережа 35 кВ обладнана пристроями селективного захисту від однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що діють на вимикання пошкодженого приєднання, то компенсацію ємнісного струму можна не виконувати [1].

В електричних мережах середньої напруги виникають дугові ОЗЗ переривчастого характеру, які супроводжуються значними тривалими перенапругами, діючими на ізоляцію електрообладнання, що має електричний зв'язок з місцем виникнення замикання. Дугові перенапруги є небезпечними для ізоляції електрообладнання мережі, прискорюють її старіння, призводять до пробиття ослаблених місць ізоляції в мережі та до появи одно- чи багатонафазних коротких замикань у мережі, що знижує надійність електропостачання споживачів електроенергії.

Дослідженню дугових перенапруг в ЕМ напругою 6...35 кВ присвячено значну кількість робіт [2–11]. Відомі теорії Петерсена, Петерса-Слепяна та Беякова-Джуварли описують виникнення та розвиток перенапруг під час дугових ОЗЗ в електричних мережах і обґрунтовують теоретичний рівень перенапруг [2, 3]. Кожна з цих теорій має місце в мережах, за

© Сегеда М.С., Равлик О.М., Бахор З.М., Яцейко А.Я., Дьяченко Н.Б., 2021

ORSID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-8459-5758>, ** <https://orcid.org/0000-0001-5155-6795>,

*** <https://orcid.org/0000-0002-2497-4809>, **** <https://orcid.org/0000-0002-4621-0762>,

***** <https://orcid.org/0000-0001-6991-4458>

певних умов їхнього функціонування, що підтверджено експериментальними дослідженнями [2]. Із появою можливості цифрового моделювання перехідних процесів у електричних мережах питания перенапруг набуло нового якісного формату щодо дослідження рівня та розвитку перенапруг в ЕМ [5–10]. Водночас увага приділялася особливостям моделювання дугових ОЗЗ у мережі, адекватності моделювання елементів ЕМ, впливу параметрів мережі на рівень перенапруг [5, 9].

Актуальність та доцільність роботи. Розподільні ЕМ 35 кВ у сільській місцевості, які мають значні довжини ПЛ, розвиваються завдяки будівництву нових КЛ із кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ, що впливає на параметри мережі та протікання в ній дугових електромагнітних перехідних процесів. Тому проблема перенапруг, їхніх кратностей для кожної конкретної електричної мережі з урахуванням її конфігурації та розгалуженості є актуальною, оскільки результати дослідження перенапруг дають змогу розробити ефективні заходи захисту ізоляції електрообладнання мережі.

Метою та задачами дослідження перенапруг під час дугових ОЗЗ у діючій розгалуженій електричній мережі 35 кВ ПрАТ «Львівобленерго» є оцінка максимального очікуваного рівня дугових перенапруг, їхнього поширення у мережі та впливу нової КЛ на кратності перенапруг.

Матеріали і результати досліджень. Дослідження перенапруг під час дугових ОЗЗ було виконано для ділянки електричної мережі 35 кВ ПрАТ «Львівобленерго», схема якої наведена на рис. 1. Повітряно-кабельна мережа живиться від секції шин 35 кВ підстанції (ПС) «Любін-Т» 110/35/10 кВ. ПС «Оліяр» має зв'язок з електричною мережею 35 кВ кабельною лінією «Любін-Т–Оліяр» довжиною 16 км, яка виконана кабелем типу АПвЕгаПУ-1×120.

Загальна довжина повітряних ліній ЕМ 35 кВ становить 63 км та кабельних ліній – 16 км. Ємнісний струм замикання на землю в ЕМ 35 кВ без КЛ дорівнює 5,8 А. Ємнісний струм замикання на землю ЕМ 35 кВ з КЛ «Любін-Т–Оліяр» дорівнює 56,1 А.

Для дослідження дугових перенапруг під час ОЗЗ в електричній мережі 35 кВ було використано цифровий комплекс REC [12].

Схема ЕМ 35 кВ у трифазному виконанні сформована з цифрових моделей елементів електричної мережі: джерела живлення, силових трансформаторів, розподільних шин, повітряних і кабельних ліній (встановленою кількістю комірок від довжини лінії), навантаженням ТП. Оскільки досліджувана схема електричної мережі є громіздкою, то на рис. 2 зображено її фрагмент.

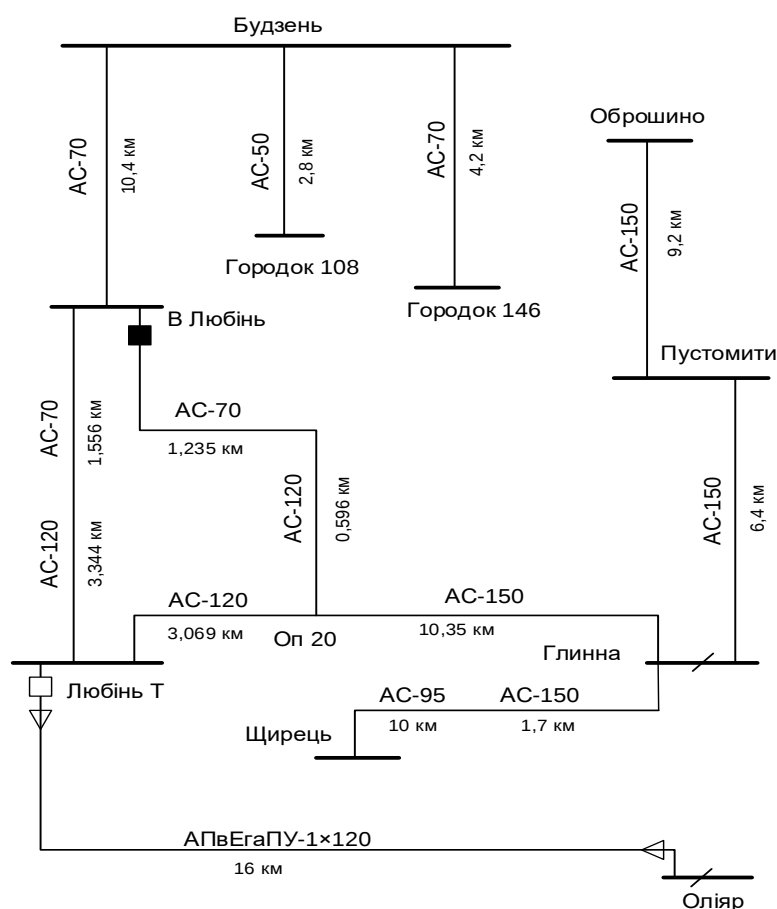


Рис. 1

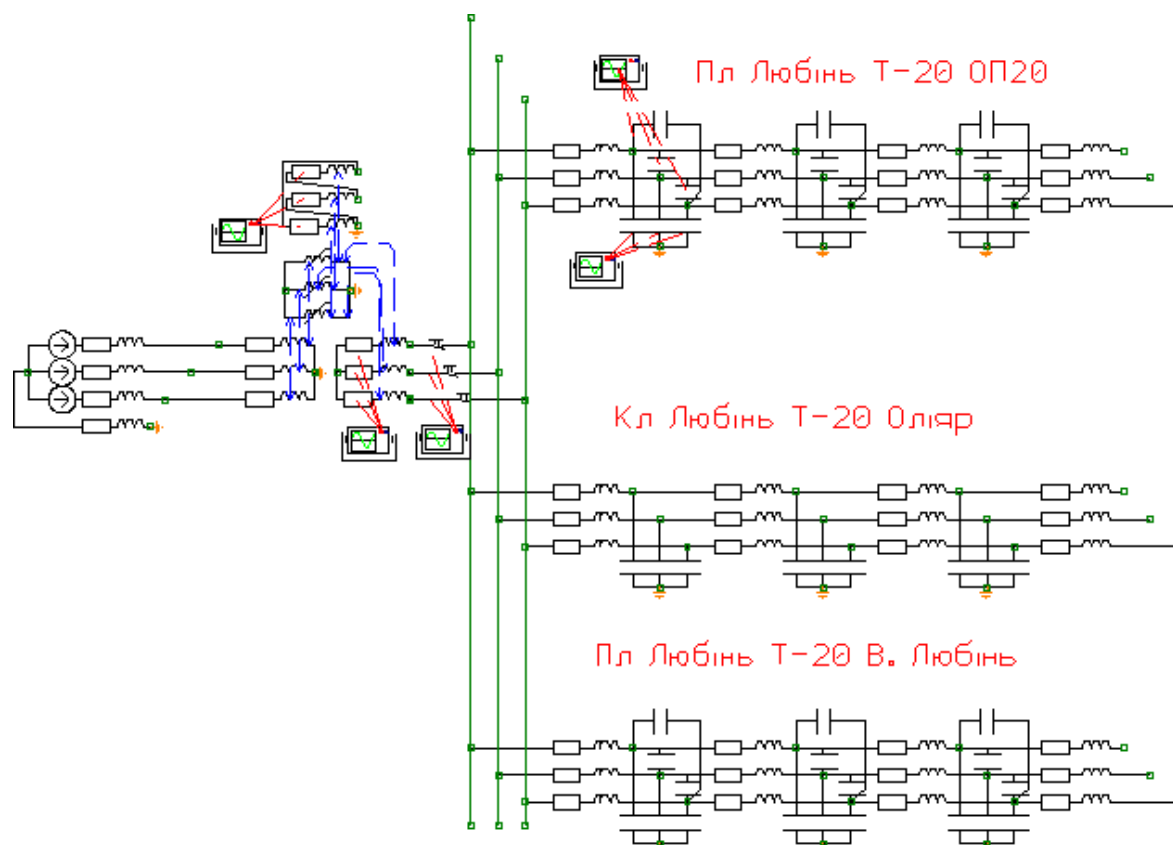


Рис. 2

Указані елементи електричної мережі були представлені параметрами, обчисленими відповідно до їхнього типу та конструктивного виконання. Для отримання адекватної картини перехідного процесу та рівня перенапруг було детально враховано активні опори струмопроводів з урахуванням поверхневого ефекту, ємності фаз і міжфазні ємності, провідності току та параметри трансформаторів напруги.

Із відомих теорій виникнення та розвитку перенапруг під час ОЗЗ в ЕМ Петерсена, Петерса-Слепяна та Белякова-Джуварли, теорія Петерсена дає найбільші теоретичні значення перенапруг, які перевищують $4U_{mf}$ [3, 6, 7]. Авторами була отримана кратність дугових перенапруг за теорію Петерсена $4,67U_{mf}$. Тому під час комп'ютерного моделювання дугових перехідних процесів у досліджуваній мережі для отримання можливих максимальних кратностей перенапруг використовувалася теорія Петерсена.

Дослідження дугових перехідних процесів у ЕМ 35 кВ виконано без КЛ «Любін-Т-Оліяр» та з КЛ за умови виникнення ОЗЗ у різних місцях мережі: на 34-й опорі ПЛ «В.Любін-Будзень» (зафіксовано експлуатацією) та на шинах 35 кВ підстанцій мережі. У таблиці наведено результати отриманих максимальних перенапруг та їхні кратності відносно номінальної фазної напруги $U_{mf \text{ ном}}$ за ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любін-Будзень».

У місці дугового ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любін-Будзень» було отримано кратність перенапруги 4,3. Було виявлено, що значення перенапруг на шинах всіх підстанцій досліджуваної електричної мережі перевищувало значення перенапруги в місці ОЗЗ. Так, на шинах 35 кВ підстанцій «Городок 108» і «Городок 146» було отримано значення найбільшої кратності перенапруги 5,4, яке на 25 % перевищує кратність перенапруги в місці ОЗЗ.

ПС	без КЛ		з КЛ	
	$u(t)_{\max \text{ ф}}$	K_U	$u(t)_{\max \text{ ф}}$	K_U
Будзень	135,53	4,7	160,25	5,6
Глинна	126,71	4,4	130,16	4,6
Городок 108	155,61	5,4	162,94	5,7

Городок 146	153,64	5,4	175,05	6,1
В.Любін	133,98	4,7	148,24	5,2
Любін-Т	133,87	4,7	141,5	5,0
Щирець	144,84	5,1	131,6	4,6
Пустомити	129,87	4,5	131	4,6
Оброшино	136,32	4,8	132,8	4,6
Оліяр	0,0	0,0	142,13	5,0
місце ОЗЗ	123,13	4,3	123,13	4,3

На рис. 3 наведено розраховані миттєві значення фазних напруг на підстанції «Глин-

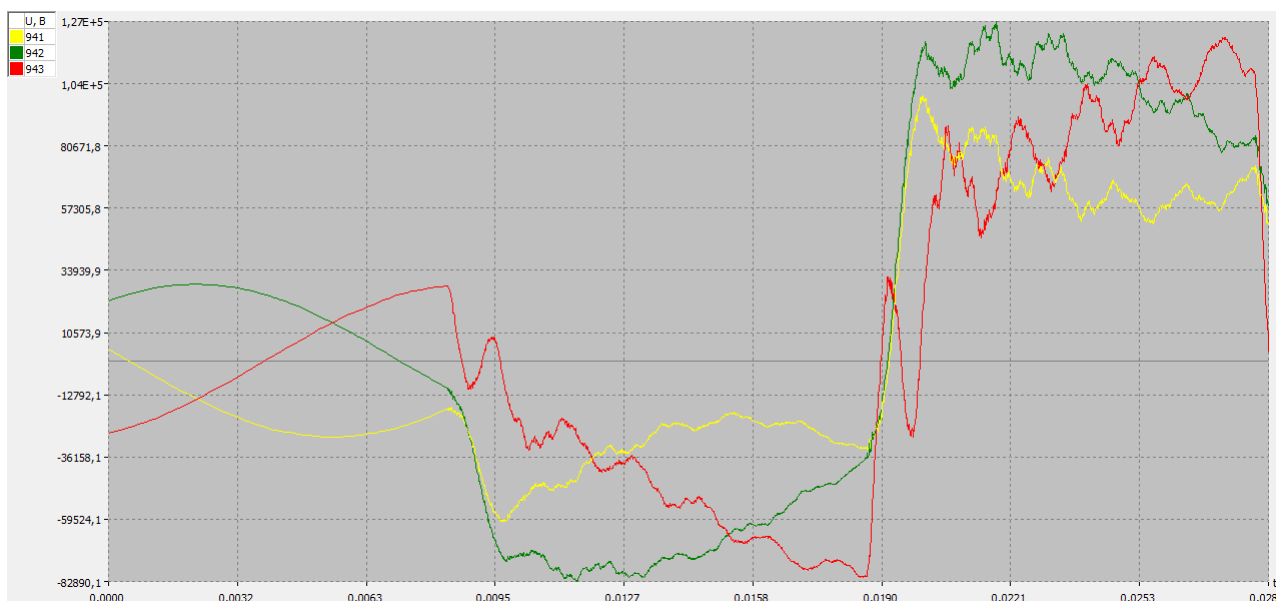


Рис. 3

на» за розвитку ОЗЗ на 34-й опорі ПЛ «В.Любін–Будзень» з КЛ «Любін-Т–Оліяр».

Збільшення ємнісного струму замикання на землю в електричній мережі завдяки приєднанню КЛ «Любін-Т–Оліяр» призводить до такого результату: кратність перенапруги в місці ОЗЗ не змінилася, $K_U = 4,3$; поширення перенапруги в лініях мережі від місця ОЗЗ до шин підстанцій супроводжується збільшенням її рівня. Максимальна кратність перенапруги 6,1 була зафіксована на шинах 35 кВ ПС «Городок 146», що на 42 % перевищує кратність перенапруги в місці ОЗЗ. Кабельна лінія впливає на поширення перенапруги в мережі. На шинах групи підстанцій мережі спостерігалось підвищення рівня напруги порівняно з мережею без КЛ, а на інших підстанціях – зниження (таблиця).

Дослідження дугових ОЗЗ у різних місцях мережі (шини 35 кВ підстанцій) показали, що кратність перенапруг у місцях ОЗЗ може перевищувати значення 4,3, а на шинах 35 кВ підстанцій мережі, віддалених від місця ОЗЗ, може перевищувати 6. Так, у разі дугового ОЗЗ на шинах 35 кВ ПС «Глинна» з урахування КЛ «Любін-Т–Оліяр» (за ємнісного струму замикання мережі 56,1 А) у місці виникнення ОЗЗ було отримано кратність перенапруги 4,8. Водночас рівень перенапруг на шинах 35 кВ підстанцій мережі відрізнявся від рівня перенапруги в місці ОЗЗ. Були отримані кратності перенапруг на шинах підстанцій мережі в межах від -5 % до 37 % відносно $K_U = 4,8$.

Висновки. Перенапруги під час дугових ОЗЗ переривчастого характеру в ЕМ 35 кВ з ізолюваною нейтраллю можуть перевищувати відомий теоретично обґрунтований рівень перенапруги за теорією Петерсена. Кратність перенапруги, отримана під час комп'ютерного моделювання, перевищила 6, що корелюється із результатами досліджень інших авторів [5, 6].

Поширення перенапруги в мережі від місця виникнення дугового ОЗЗ супроводжується як зростанням, так і зниженням її кратності відносно кратності перенапруги в місці виникнення ОЗЗ. Підсилення й ослаблення рівня перенапруг в електричній мережі залежить від схеми мережі та місця ОЗЗ у мережі, тому для отримання якісної картини про максимально можливий рівень перенапруг в електричній мережі з ізольованою нейтраллю необхідно враховувати поширення перенапруги від місця виникнення ОЗЗ.

Будівництво нових кабельних ліній в повітряних ЕМ 35 кВ з ізольованою нейтраллю можуть призводити до підвищення рівня перенапруг та змінювати характер їхнього поширення в мережі під час дугового ОЗЗ.

1. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Форт, 2017. 760 с.
2. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. *Электричество*. 1957. № 5. С. 31–36.
3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостного тока. М.: Энергия, 1971. 152 с.
4. Сабарно Л.Р., Кошман В.І., Севастюк І.М. Дослідження дугових перенапруг у випадку одно- і двофазних замикань на землю у розподільній мережі з ізольованою нейтраллю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. 2017. № 1(6). С. 17–21.
5. Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk A. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. Proc. of VII Int. Symp. *Short Circuit Currents in Power Systems*, Warsaw, 1996. Pp. 1.20.1-1.20.4.
6. Кротенок В.В. Расчет перенапряжений в распределительной сети при прерывистых дуговых замыканиях на землю с различными режимами заземления нейтрали. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistykh-dugovykh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>. (дата звернення: 10.08.2021).
7. Шуин В. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/09.php> (дата звернення: 10.08.2021).
8. Сегеда М.С., Бахор З.М., Равлик Н.О., Бакало Г.Ш. Внутрішні перенапруги в електричних мережах 6...10 кВ та захист від перенапруг. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2006. № 1 (13). С. 23–30.
9. Равлик Н.О., Равлик О.М., Сегеда М.С. Перенапруги в електричних мережах власних потреб електростанцій, що виникають під час комутацій вакуумними вимикачами, та їх обмеження. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.063>
10. Сегеда М.С., Равлик Н.О. Обмеження внутрішніх перенапруг в електричних мережах власних потреб електростанцій під час однофазних замикань на землю. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2014. № 6. С. 116–119.
11. Варецький Ю.О., Равлик О.М., Бахор З.М. Особливості моделювання процесів при замиканнях на землю у мережах з ізольованою нейтраллю. *Технічна електродинаміка*. 1994. № 2. С. 61–63
12. O. Ravlyk, N. Ravlyk. Digital Complex for Modeling Processes in Electric Circuits with Protection and Automatic Devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.01.023>

OVERVOLTAGE DURING ARC SINGLE-PHASE EARTH FAILURES IN 35 KV ELECTRICAL NETWORKS

M.S. Sehed, O.M. Ravlyk, Z.M. Bakhor, A.Ya. Yatseyko, N.B. Diachenko

Lviv Polytechnic National University,

S. Bandera str., 12, Lviv, 79013, Ukraine

e-mail: msehed@ukr.net, Ravlyk.OM@gmail.com

The study results of overvoltages during arc single-phase earth faults of intermittent nature in the 35 kV electric network with isolated neutral are presented. With the help of computer simulations of transients in the electrical network, the maximum multiplicities of overvoltages at the point of occurrence of single-phase arc earth faults have been obtained. According to known theories of the occurrence and development of overvoltages, it exceeds theoretically expected. The change of the overvoltage level on the 35 kV busbars of the network substations, electrically connected to the place of occurrence of the single-phase earth fault, has been shown. The influence of the cable line on the overvoltage multiplicity is shown. Ref. 12, fig. 3, table.

Keywords: overvoltage, single-phase circuit, electrical network, computer simulation.

1. Rules of arrangement of electrical installations. The publication is official. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. Kharkiv: Fort Publishing House, 2017. 760 p. (Ukr)
2. Belyakov N.N. Investigation of overvoltage at arc earth faults in 6 and 10 kV networks with isolated neutral. *Elektrichestvo*. 1957. No 5. Pp. 31–36. (Rus)
3. Likhachev F.A. Earth faults in networks with isolated neutral and capacitive current compensation. Moscow: Energiya, 1971. 152 p. (Rus)
4. Sabarno L.R., Koshman V.I., Sevastyuk I.M. Investigation of arc overvoltages in the case of single- and two-phase earth faults in a distribution network with isolated neutral. *Energy and computer-integrated technologies in agriculture*. 2017. No 1 (6). Pp. 17–21. (Ukr)
5. Varetsky Y., Bakhor Z., Ravlyk O. Transients in 10-35 kV electric networks with ungrounded neutrals under earth faults. *Proc. of VII Int. Symp. Short Circuit Currents in Power Systems*, Warsaw, 1996. Pp. 1.20.1-1.20.4.
6. Krotenok V.V. Calculation of overvoltage in the distribution network with intermittent arc earth faults with different modes of neutral grounding URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-perenapryazheniy-v-raspredelitelnoy-seti-pri-preryvistykh-dugovykh-zamykaniyah-na-zemlyu-s-razlichnymi-rezhimami-zazemleniya/viewer>. (accessed: 10.08.2021). (Rus)
7. Shuin V. Calculation of overvoltage at arc intermittent earth faults. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/09.php> (accessed: 10.08.2021). (Rus)
8. Sehed M.S., Bakhor Z.M., Ravlyk N.O., Bakalo G.S.H. Internal overvoltages in 6...10 kV electrical networks and overvoltage protection. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2006. No 1(13). Pp. 23–30. (Ukr)
9. Ravlyk N.O., Ravlyk O.M., Sehed M.S. Overvoltages in electric networks of own needs of power plants during the commutations of vacuum switches, and their limitations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.063> (Ukr)
10. Sehed M.S., Ravlyk N.O. Limitation of internal overvoltages in electric networks of own needs of power plants during single-phase earth faults. *Naukovy visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2014. No 6. Pp. 116–119. (Ukr)
11. Varetsky Yu.O., Ravlyk O.M., Bakhor Z.M. Features of modeling of processes at short circuits to the earth in networks with the isolated neutral. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1994. No 2. Pp. 61–63. (Ukr)
12. O. Ravlyk, N. Ravlyk. Digital Complex for Modeling Processes in Electric Circuits with Protection and Automatic Devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol. 3. No 1. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.01.023>

Надійшла: 30.08.2021

Received: 30.08.2021

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.044>

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ПОДАВЛЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В.В. Кучанський*, канд. техн. наук, **О.В. Савицький****

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Розглядається явище самозбудження генераторів, приєднаних до ненавантаженої лінії електропередавання. Значення провідності керованих шунтувальних реакторів, які підібрано відповідно до регульовального діапазону, дають змогу уникнути появи самозбудження генераторів. Дається фізичний аналіз процесів, що відбуваються під час самозбудження синхронного генератора, та розроблено розрахункові моделі. Встановлено, що в разі штучного підтримання по всій довжині лінії напруги рівня номінального значення за допомогою керованих компенсуювальних пристроїв електропередача матиме властивості, характерні для порівняно коротких ліній (довжиною до 500 км) незалежно від її геометричної довжини. Визначено, що довжина ділянки лінії, на кінцях якої підтримується постійна напруга, значно менше ніж 500 км, отже, за потужності, що передається, менше натуральної напруги вздовж ділянки буде перевищувати номінальне значення, і в лінії буде надлишок реактивної потужності, який компенсується через її споживання в пристроях проміжної компенсації (струм компенсації мусить мати індуктивний характер). Бібл.8, рис. 4., табл. 4.

Ключові слова: гнучкі системи передачі змінного струму, керований шунтувальний реактор, регулювання напруги та потужності, самозбудження синхронного генератора.

Загальна характеристика проблеми. У ненавантаженому режимі роботи лінії електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН) є проблема не тільки автопараметричного самозбудження парних гармонійних складових з резонансним підвищенням напруги, але й самозбудження генераторів. У такому режимі роботи зарядна потужність лінії може значно перевищувати номінальну потужність приєднаних до електропередачі генераторів, що призводить до самозбудження генераторів, за якого на їхніх затискачах і на лінії встановлюється напруга, що не відповідає струму збудження. Тобто, можливість виникнення самозбудження і його характер значною мірою залежать від співвідношення між номінальною потужністю генераторів станції та зарядною потужністю лінії.

Ступінь компенсації зарядної потужності лінії під час проектування розраховується на 60-80 % відповідно до наявних потужностей шунтувальних реакторів, які виготовляються на заводах. Забезпечення необхідного ступеня компенсації зарядної потужності для конкретного вирішення експлуатаційної задачі є проблематичним внаслідок неможливості регулювання індуктивності шунтувального реактора. У такому випадку гостро постає питання регульованої компенсації зарядної потужності для унеможливлення виникнення негативних явищ, зокрема самозбудження генераторів.

У роботах розглядаються питання трактування явища самозбудження [1–3]; математичного опису перехідного [3] і стаціонарного режимів роботи асинхронного генератора. У [1–3] намагалися описати процес самозбудження в режимі холостого ходу та в разі переходу від ємнісного до індуктивно-резистивного навантаження. Водночас математичні вирази стають занадто складними для обчислення та подальшого аналізу. Треба зауважити, що через обмежену потужність на той час обчислювальної техніки провести дослідження та виявити фактори, що понад усе впливають на умови виникнення самозбудження генераторів не було можливості. Також в роботах [1–3] не було зроблено повного математичного опису параметричного резонансу синхронного генератора, а також його якісного аналізу з використанням найпростішого математичного апарату.

У наведених роботах не розглядаються питання розроблення методів та математичних моделей аналізу ненавантаженого режиму ЛЕП НВН з пристроями керованої компенсації

реактивної потужності. Такий підхід дасть змогу виявити першопричини явища генерування електроенергії в синхронних генераторах. Техніко-економічне порівняння керованих пристроїв компенсації реактивної потужності було проведено в [7]. Було обґрунтовано використання саме керованих шунтувальних реакторів порівняно зі СТАТКОМ через більш прийнятні показники.

Мета статті – оцінювання впливу зміни провідності керованого шунтувального реактора на виведення ЛЕП НВН із зон самозбудження генераторів у ненавантаженому режимі.

Розглянемо умови регулювання керованого реактора з відхиленням напруги на прикладі схеми рис. 1.

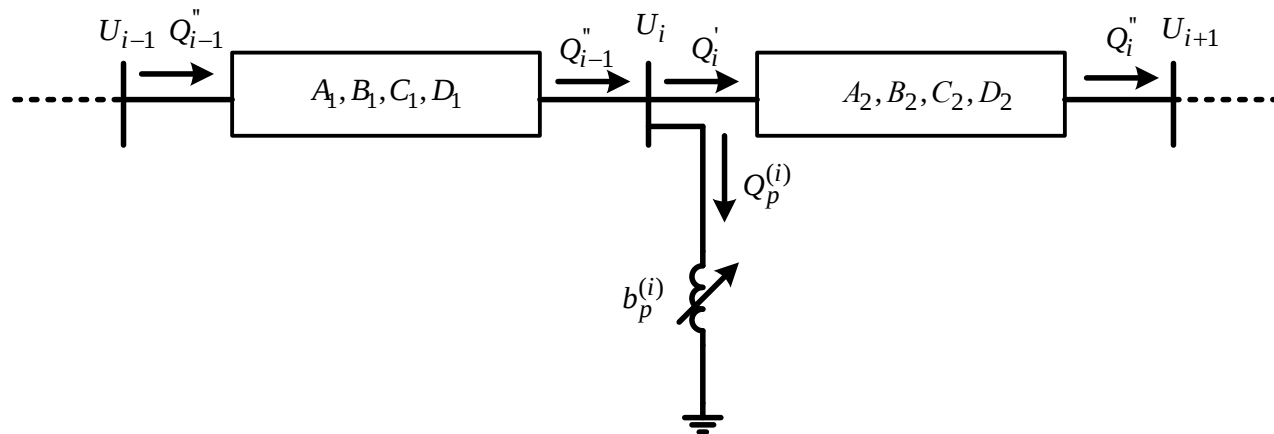


Рис. 1

Головною особливістю режимів ліній електропередачі з компенсованим реактивним опором є необхідність підтримання оптимального співвідношення між напругами на лініях електропередачі через високу чутливість реактивної потужності до цього співвідношення. Визначено взаємозв'язок між умовами регулювання КШР та режимними параметрами передачі електроенергії. Ідеалізоване рівняння управління КШР було прийнято у вигляді:

$$\Delta b_{CSR}^{(i)} (1 + p T_{csr}^{(i)}) = k_{0U}^{(i)} \Delta U_i, \quad (1)$$

де $b_{CSR}^{(i)}$ – провідність КШР i -ого вузла мережі; $T_{csr}^{(i)}$ – стала часу КШР; $k_{0U}^{(i)} \left[\frac{C_m}{B} \right]$ – коефіцієнт керування провідності КШР у разі відхилення напруги, $\Delta U_i = U_i - U_{i(0)}$, $\Delta b_{CSR}^{(i)} = b_{CSR}^{(i)} - b_{CSR0}^{(i)}$.

Реактивні потужності Q_{i-1}'' , Q_i'' та $Q_p^{(i)}$ за нехтування активних опорів лінії визначаються виразом:

$$Q_{i-1}'' = -U_i^2 \frac{A_1}{B_1} + \frac{U_i U_{(i-1)}}{B_1} \cos \delta_{(i-1)} \quad (2)$$

$$Q_i'' = U_i^2 \frac{D_2}{B_2} - \frac{U_i U_{(i+1)}}{B_2} \cos \delta_{(i+1)} \quad (3)$$

$$Q_p^{(i)} = Q_{(i-1)}'' - Q_i' = U_i \left(\frac{U_{(i-1)}}{B_1} \cos \delta_{(i-1)} + \frac{U_{(i+1)}}{B_2} \cos \delta_{(i+1)} \right) - U_i^2 \left(\frac{A_1}{B_1} + \frac{D_2}{B_2} \right) \quad (4)$$

На основі (4) знайдемо вираз для провідності $b_{CSR}^{(i)}$ реактора, яка необхідна для забезпечення заданого рівня напруги U_i у вузлі i :

$$b_{CSR}^{(i)} = \frac{U_{(i-1)}}{U_i B_1} \cos \delta_{(i-1)} + \frac{U_{(i+1)}}{U_i B_2} \cos \delta_{(i+1)} - \frac{A_1}{B_1} - \frac{D_2}{B_2} \quad (5)$$

де $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ – параметри ділянок лінії з постійною напругою на кінцях, прилеглих до вузла для підключення реакторів.

Залежність провідності реактора від довжини ділянки лінії й потужності, що передається нею, наводиться на рис. 2. Оцінімо кількісно значення коефіцієнта $k_{0U}^{(i)}$, за якого забезпечуватиметься досить високий рівень підтримання напруги в разі зміни потужності, що передається від нуля до $P_{нат}$ – Активна потужність, що передається лінією, визначається за виразами:

$$P = \frac{U_{(i-1)}U_i}{B_1} \sin \delta_{(i-1)i} \quad (6)$$

$$P = \frac{U_i U_{(i+1)}}{B_2} \sin \delta_{i(i+1)}$$

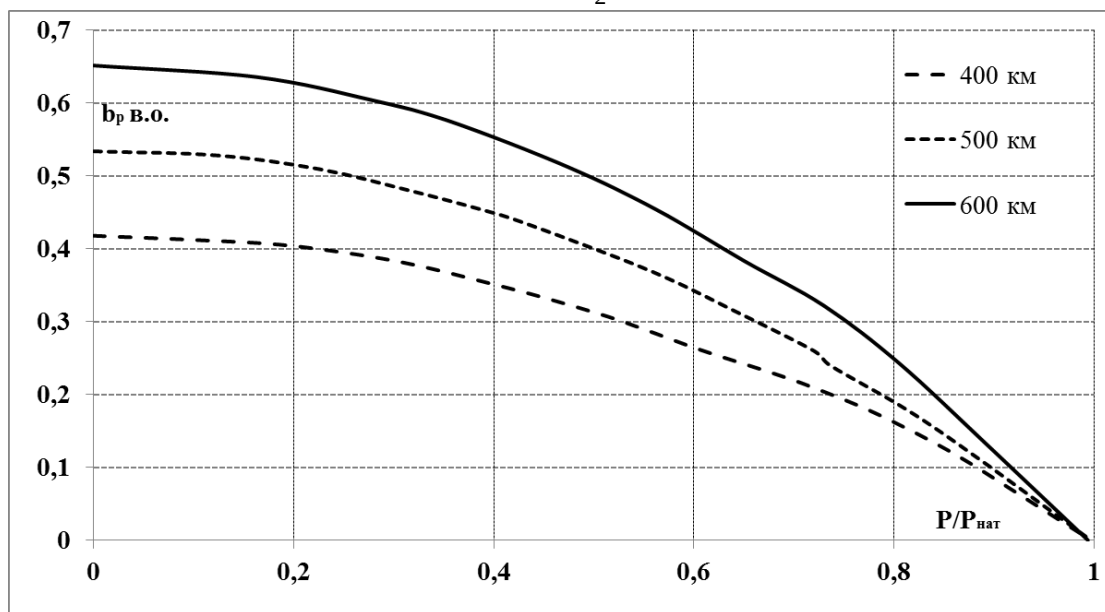


Рис. 2

Після лінеаризації виразів (1.21), (1.24) та (1.26) вилучення з них змінних $\Delta \delta_{(i-1)i}$ та $\Delta \delta_{i(i+1)}$, а також з огляду на $U_{(i+1)} = U_{(i-1)} = U_i = U$, $\delta_{(i-1)i} = \delta_{i(i+1)} = \delta_y$, $B_2 = B_1$, $D_2 = D_1$, отримаємо такий вираз:

$$\frac{\Delta U_i}{\Delta P} = \frac{tg \delta_{y0}}{\frac{U_0}{B_1} (\cos \delta_{y0} + tg \delta_{y0} \sin \delta_{y0} - A_1 - D_1) - U_0 b_{po}^{(i)} - \frac{U_0^2 k_{0U}^{(i)}}{2}} \quad (7)$$

З аналізу виразу (7) випливає, що для відносно коротких ділянок лінії додатному (від'ємному) приросту ΔP відповідає приріст ΔU_i . Таким чином, для зменшення зміни напруги у вузлі за зміни активної потужності, що передається, коефіцієнт регулювання $k_{0U}^{(i)}$ для прийнятого запису рівнянь (1) і (5) має бути додатним. Визначимо кількісну зміну напруги у вузлі підключення реактора за зміни потужності, що передається від нуля до $P_{нат}$ (ця залежність нелінійна, але досить хороше наближення можна отримати за умови її лінеаризації в такому діапазоні в точці $P_0 = 0.5P_{нат}$). Графіки залежності напруги за зміни потужності, що передається, від величини $k_{0U}^{(i)}$ наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що для підтримання напруги у вузлі підключення КШР у межах $5\%U_{ном}$ за зміни потужності від нуля до $P_{нат}$ достатньо встановити значення $k_{0U}^{(i)}$ не більшим 5 – 10 о.е. Якщо за базисний опір прийняти опір реактора у вихідному режимі $z_{\delta} = x_{P0}$, то значення $k_{0U}^{(i)}$, виражене в таких одиницях, істотно змінюватиметься залежно від режиму (рис. 3). Під час розрахунків передбачалося, що з $z_{\delta} = z_{\delta} k_{0U}^{(i)} = 5$ о.е. в усіх режимах довжина ділянки дорівнює 400 км.

У випадку встановлення КШР можна керувати ступенем компенсації зарядної потужності у такий спосіб, щоб відлаштуватися від зони самозбудження генераторів. Це стає можливим завдяки тому, що КШР здатні працювати з нормованим перевантаженням до 130 % і короточасним перевантаженням до 200 % [5–7]. У такому випадку зарядну потужність можна компенсувати у такий спосіб, що синхронний генератор не буде працювати з ємнісним навантаженням.

З аналізу виразу (7) видно, що коефіцієнт регулювання КШР, необхідний для підтримки напруг у і-му вузлі із заданою точністю, визначається лише параметрами ділянки, що прилягає до вузла підключення реактора і не залежить від довжини лінії. Аналітичні вирази для коефіцієнтів характеристичного полінома, отримані після розширення за потужністю оператора "р" визначника системи рівнянь малих збурень (з ігноруванням перехідних процесів у ланцюгах статора) за відсутності регулювання збудження та нехтування демпферними ланцюгами генераторів мають вигляд [8]:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{T_j T_{d0}}{\omega_0} B_q B_d' & a_1 &= \frac{T_j}{\omega_0} B_q B_d & a_3 &= B_q B_d S_E \\ a_2 &= T_{d0} \left[B_q B_d' S_E + (x_d - x_d')(2 - \frac{B_d}{B_q}) U_2^2 \sin^2 \delta_0 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

де T_j, T_{d0} – стала часу обмотки збудження та інерційна постійна агрегату.

$S_E = \frac{B_{q0} U_2}{B_d} \cos \delta_0 + \frac{U_2^2}{D} (\frac{1}{B_q} - \frac{1}{B_d}) \cos 2\delta_0$ – синхронізуюча потужність електропередач,

$B_d = B + D(x_d + x_{T1})$, $B_q = B + D(x_q + x_{T1})$ – сумарні опори електропередачі в поздовжній і поперечній осі; $B_d' = B + D(x_d' + x_{T1})$ – сумарний перехідний опір електропередавання, B, D – еквівалентні узагальнені параметри лінії, x_q, x_d, x_d' – синхронні опори генератора в поздовжній та поперечної осі, x_{T1} – індуктивний опір трансформатора, δ_0 – кут лінії електропередавання, ω_0 – кутова швидкість.

У діапазоні довжин $l = 150..350$ км можна виділити три найбільш характерні зони, на межі яких відбувається зміна знака B_d , B_q , або B_d' [8]:

$$\begin{aligned} \text{I зона} &- B_d > 0, B_q > 0, B_d' > 0 \quad (-z > (x_d + x_{T1})) \\ \text{II зона} &- B_d < 0, B_q > 0, B_d' > 0 \quad ((x_d + x_{T1}) \geq -z \geq (x_d + x_{T1})) \\ \text{III зона} &- B_d < 0, B_q < 0, B_d' > 0 \quad ((x_q + x_{T1}) \geq -z \geq (x_d' + x_{T1})), \end{aligned} \quad (9)$$

де $z = \frac{B}{D}$ – вхідний опір короткозамкненої на кінці лінії.

На рис. 3 наведені зона 1 синхронного самозбудження та зони 2, 3 асинхронного самозбудження [8].

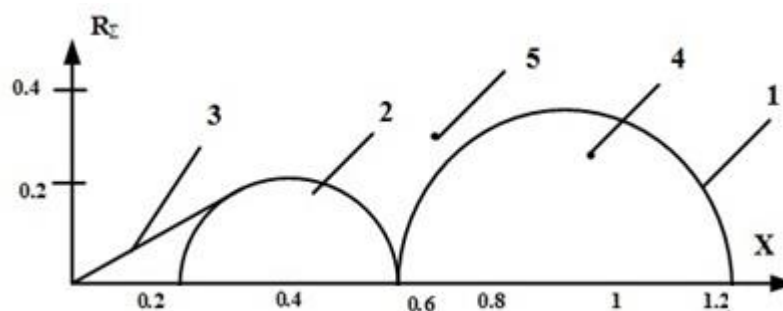


Рис. 3

Щоб виключити ці досить великі зони, необхідно зменшити вплив поперечного демпферного контуру, тобто стала часу цього контуру має бути або дуже малою або досить великою. Повністю виключити поперечний демпферний контур неможливо за умовами саморозкачування генератора в режимах малих навантажень. Збільшення активного опору лінії для придушення самозбудження неефективно, так як це призводить до зниження к.к.д. електропередачі. Тому для максимального збільшення зони стійкої роботи необхідні такі заходи: підбір параметрів демпферних контурів, що забезпечують максимальне зменшення зони асинхронного самозбудження; збільшення перехідного опору генератора; збільшення реактивних опорів кінцевих трансформаторів. Задля аналізу ефективності застосування керованих шунтувальних реакторів було оцінено вплив зміни індуктивності КШР на сумарний індуктивний опір (5).

Значення параметрів некерованих шунтувальних реакторів типу РОДЦ-110/750-У1 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

$U_{ном}$, кВ	X_p , Ом	R_p , Ом	$S_{ном}$, МВАр
750	1880	6	110

Значення параметрів некерованих шунтувальних реакторів типу УШРТ наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Тип КШР	$S_{ном}$, МВАр	$U_{ном}$, кВ	Уставка по напрузі, кВ	Уставка по потужності, МВАр	Уставка по опорі, Ом
УШРТ	330 МВАр	750	645÷750	9÷429	8

Значення параметрів синхронних генераторів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

$U_{ном}$, кВ	X_d , в.о.	X_q , в.о.	X'_d , в.о.	T_j	T_0
18.75	1,5	0.98	0.32	10	7

Для аналізу самозбудження генераторів було проведено розрахунки для лінії електропередавання надвисокої напруги з такими значеннями параметрів: $l=300$, км – довжина лінії, $U=750$, кВ – номінальна напруга лінії, конструкція фази проводу 4хАС-400/93, що характеризується такими параметрами: $r_0=0.019$ Ом/км; $x_0=0.289$ Ом/км; $g_0=0.0325$ мкСм/км; $b_0=4.13$ мкСм/км.

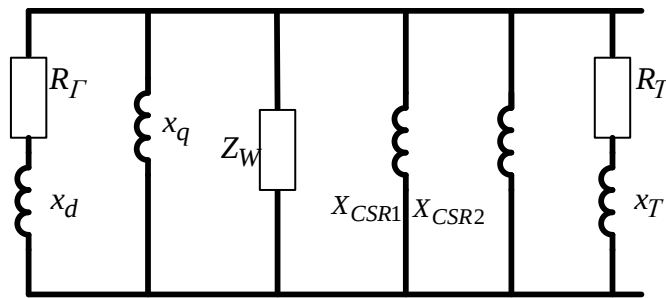


Рис. 4

Для того, щоб запобігти самозбудження генераторів, точки з координатами X_Σ та R_Σ мають опинитись поза межами ділянок самозбудження. Координати X_Σ та R_Σ визначаються за такими формулами:

$$X_\Sigma = \frac{Z_W(X_1 + X_{CSR})(X_{CSR1} + X_{CSR2})\cos\lambda + (Z_W^2(X_1 + X_{CSR1}) - X_{CSR1}X_1X_{CSR2})\sin\lambda}{(X_{CSR1}X_{CSR2} - Z_W^2)\sin\lambda - Z_W(X_{CSR} + X_{CSR2})\cos\lambda}, \quad (10)$$

де X_1 – еквівалентний опір генератора, Z_W – хвильовий опір лінії, X_{CSR} – еквівалентний опір двох груп КШР. X_{CSR1}, X_{CSR2} – опір першої та другої групи КШР відповідно, λ – хвильова довжина лінії.

Значення R_Σ для схеми рис. 4 знаходять за формулою:

$$R_\Sigma = R + R_T + R_G \quad (11)$$

Результати розрахунку виведення ЛЕП із зон самозбудження наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Пристрій компенсації реактивної потужності	R_Σ	X_Σ	Точка на рис. 3
КШР	0,31	0,62	4
ШР	0,26	0,94	5

Результати розрахунків у разі встановлення некерованих шунтувальних реакторів в електричній мережі наведено на рис. 2 точкою під номером 4, яка потрапляє в зону синхронного самозбудження.

У статті аналізується самозбудження синхронного генератора під час відновлення енергосистеми, спричиненого ємнісним навантаженням. Використання КШР на лініях (замість ШР) дає змогу усунути причину самозбудження синхронного генератора без застосування спеціальних додаткових заходів. У роботі обґрунтовано застосування КШР у разі виведення синхронного генератора з режиму самозбудження за допомогою одночасного застосування підходу визначення зон і точки з координатами X_Σ та R_Σ .

Фінансується за держбюджетною темою "Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії" ("Нова енергетика"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 13.02.2019 № 34. Державний реєстраційний номер роботи 0119U006587.

1. Электротехнический справочник. Том 3 под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. Производство, передача и распределение электрической энергии. Москва: МЭИ, 2004, 964 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург, Питер, 2008, 350 с.

3. Гуревич Б.Е., Либова Л.Е. Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
4. Кучанський В., Малахатка Д. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж: монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 120 с. DOI: <https://doi.org/10.36074/ztzpermmrm-monograph.2021>
5. Дорожко Л.И., Либкинд М.С. Реакторы с поперечным подмагничиванием. М.: Энергия, 1977. 177 с.
6. Кадомская К. П. Высоковольтные ВЛ. Эффективность и управляемость шунтирующих реакторов. Новости электротехники. 2008. 3(51). С. 70–71.
7. Александров Г.Н. К методике расчета управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа. Электричество, 1998. № 4.
8. Рагозин А.А., Таланов С.Б. Улучшение свойств дальних линий электропередачи без средств промежуточной компенсации. Электричество, 1998. № 10.

TECHNICAL MEANS FOR SUPPRESSION OF RESONANCE PHENOMENA IN ELECTRICAL NETWORKS

V.V. Kuchanskyy, O.V. Savytskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

The self-excitation phenomenon of generators connected to an unloaded power line is considered. Accordingly, the selected values of the conductivity of the controlled shunt reactors, following the control range (especially in the overload mode), avoid the occurrence of self-excitation of the generators. The physical analysis of the processes occurring at self-excitation of the synchronous generator is given, and the calculated models are developed. It is established that in the case of artificial support along the entire length of the voltage line at the nominal value using controlled compensating devices, the transmission will have properties characteristic of relatively short lines (up to 500 km) regardless of its geometric length. It is determined that the length of the line section at the ends of which the DC voltage is maintained is much less than 500 km. Therefore, less than the natural voltage along the section length will exceed the nominal value at the transmitted power, and the line will have excess reactive power. Consumption in intermediate compensation devices (compensation current must be inductive). Ref.8, fig. 4, tables 4.

Keywords: flexible alternating current transmission systems, STATCOM, controlled shunt reactor, self-exciting synchronous generator

1. Electrotechnical reference book. Volume 3 total. ed. professors MPEI V.G. Gerasimov and others. Production, transmission and distribution of electrical energy. Moskva: MPEI, 2004, 964 p. (Rus)
2. Voldek A.I., Popov V.V. Electric cars. AC machines. St. Petersburg, Piter, 2008, 350 p. (Rus)
3. Gurevich B.E., Libova L.E. Oкин A.A. Stability calculations and emergency automation. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 390 p. (Rus)
4. Kuchansky V., Malahatka D. Measures and technical means to increase the efficiency of the main electrical networks. Vinnytsia: HO Ievropeiska naukova platforma, 2021, 120 p. DOI: <https://doi.org/10.36074/ztzpermmrm-monograph.2021> (Ukr)
5. Dorozhko L.I., Libkind M.S. Transverse bias reactors. M : Energiya, 1977. 177 p. (Rus)
6. Kadomskaya K.P. High-voltage overhead lines. Efficiency and controllability of shunt reactors News of electrical engineering. 2008. 3 (51). Pp. 70–71 (Rus)
7. Alexandrov G.N. On the method of calculating controlled transformer-type reactors. Elektrichestvo, 1998. No 4. (Rus)
8. A.A. Ragozin, S.B. Talanov. Improving the properties of long-distance power lines without intermediate compensation. Elektrichestvo, 1998. No 10. (Rus)

Надійшла: 22.06.2021

Received: 22.06.2021

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.051>

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСТОВІРИЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВУЗЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В.О. Мірошник*, П.В. Шиманюк**

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: miroshnyk.volodymyr@gmail.com, shymanp@ied.org.ua

В умовах лібералізованого ринку електроенергії України у його учасників виникають стимули до підвищення ефективності операційної діяльності, у тому числі в операторів систем розподілу. Одним з аспектів їхньої діяльності є прогнозування втрат у мережах для купівлі відповідних обсягів електричної енергії на оптовому ринку. Перспективним підходом є прогнозування вузлового навантаження та розрахунок втрат з урахуванням топології мережі. До того ж точний прогноз вузлового навантаження необхідний для оцінювання запасу стійкості енергосистеми. Під час побудови прогностичних моделей вирішальне значення має якість даних, на яких оцінюються параметри моделі. У статті запропоновано метод виявлення та заміни аномальних значень часового ряду на основі кластеризації. Проведено порівняльний аналіз методів кластеризації для виявлення пропусків та аномальних значень у часових рядах погодинного споживання електричної енергії. Для оцінки методів достовіризації використано дані північно-західного регіону США. За результатами аналізу було виявлено, що використання методу DBSCAN призводить до значно меншої кількості хибно позитивних спрацювань. Бібл.9, рис. 3., табл. 3.

Ключові слова: достовіризація даних, Smart Grid, алгоритм кластеризації, прогнозування, енергосистема

У новому ринку електричної енергії [1] оператори систем розподілу (ОСР) та системи передачі (ОСП) повинні купувати електроенергію для покриття втрат у власних мережах. Логіка роботи ринку вказує на те, що купівля електричної енергії (укладення договору на постачання) якомога раніше до дати споживання дає змогу знизити вартість електроенергії [2]. Це призводить до необхідності прогнозування майбутніх втрат електричної енергії. Отже, в учасників ринку з'являються прямі економічні стимули до підвищення точності прогнозів. На практиці для подання заявок на ринку «на добу наперед» використовуються короткострокові прогнози з горизонтом упередження від 12 до 36 годин.

Розрахунок економічного ефекту від зниження похибки короткострокових прогнозів обсягу втрат енергорозподільчих компаній [3] показує, що зниження похибки на 5 % дасть змогу знизити сумарні витрати операторів мереж для компенсації небалансів на 184 млн грн на рік за середньої ціни похибки у 225 грн/МВт-год, що дозволить знизити тарифи на розподіл та тариф на передачу електричної енергії для всіх кінцевих споживачів.

Найбільш розповсюдженим підходом є прямий прогноз часового ряду втрат, але за таких умов не враховується топологія мережі, за зміни якої в часовому ряді втрат виникають аномальні викиди, які ускладнюють побудову адекватної моделі та знижують точність прогнозування. Більш коректним буде розрахунок втрат на основі прогнозу вузових навантажень з урахуванням параметрів режиму та прямого розрахунку втрат з огляду на топологію мережі.

Крім того, на основі прогнозу вузлового навантаження можна ефективно вирішувати низку технологічних задач, пов'язаних з управлінням режимом роботи

енергосистеми. Так, зі зміною порядку формування графіку покриття навантаження, яка пов'язана з переходом від централізованого планування (що здійснювало ДП «Енергоринок») до використання комерційних графіків, суттєво збільшилось навантаження на диспетчерську службу ОЕС України, спричинене частою зміною режимів роботи генеруючих агрегатів. Водночас виникає необхідність оцінювання запасу динамічної та статичної стійкості енергосистеми, надійності яких залежить від точності прогнозів навантаження в вузлах електричної мережі.

Під час побудови статистичних моделей електричного навантаження вирішальне значення має якість вихідної інформації. Спотворені дані та пропуски завжди присутні під час звичайної роботи енергосистеми. Вони можуть бути пов'язані з помилками та похибками вимірювань, шумами в інформаційному тракті або людським фактором. За структурою їх можна розділити на одиничні та групові. Під час побудови математичних моделей для прогнозування, різкі зміни навантаження, викликані аварійними відключеннями або раптовими змінами режимів роботи великих споживачів, також слід відносити до аномальних значень, оскільки вони вносять похибку в модель взаємозв'язку між навантаженням та зовнішніми факторами.

З огляду на тенденції щодо зростання автоматизації енергосистеми, втілення ідей концепції Smart Grid [4,5] на практиці та підвищення кількості активних споживачів виникає необхідність в ускладненні інструментів аналізу даних та визначення аномальних значень.

Метою цієї роботи є порівняння методів кластеризації, які використовуються для виявлення та заміни аномальних значень у часових рядах електричного навантаження на етапі побудови статистичних моделей прогнозування вузлового навантаження.

Основою будь-якого методу визначення аномальних значень є застосування критерію аномальності, що може бути інтерпретовано як кластеризація даних на два класи: нормальні та аномальні значення. У роботі проведено аналіз ефективності найбільш розповсюджених методів кластеризації, які можуть використовуватись для цієї задачі.

Метод DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [6] є широко поширеним методом кластеризації на основі щільності даних. Такий підхід був представлений М. Естером у 1996 році. Особливістю цього методу є мінімальна кількість кластерів, які використовуються як параметри. Кількість потенційних кластерів регулюється параметром мінімальної щільності.

Метод «Ізольованих лісів» IF-Isolation forest [7] може чітко виявляти аномальні значення порівняно з іншими методами, які будують профілі даних та ідентифікують їх на відповідність нормальному профілю. До таких методів можна віднести методи класифікації та кластеризації. Цей підхід використовує алгоритм машинного навчання. Деревоподібна структура алгоритму дає змогу ізолювати кожен окремий екземпляр.

Метод локального рівня викиду (LOF – Local outlier factor) [8] для виявлення аномальних даних використовує підхід щільності даних. За своєю концепцією він подібний до методу DBSCAN, оскільки так само використовує допустиму відстань для оцінки локальної щільності. LOF досить непогано виявляє аномальні значення, хоча в деяких випадках алгоритм розпізнає добові провали та піки навантаження як аномальні. Також цей алгоритм не здатний виявляти явні пропуски даних, що можна виправити за допомогою попередньої заміни та інтерполяції пропущених даних.

Метод Еліптичної обвідної (EE – Elliptic Envelope) [9] для виявлення аномальних даних використовує розподіл Гауса. Алгоритм формує еліпс навколо даних на основі надійної коваріації, що дає змогу ідентифікувати вихідні дані без впливу викидів. Відповідно будь-які значення, що знаходяться поза межею даного еліпсу, вважаються викидами. Метод EE моделює дані, як високорівневий розподіл Гауса з можливою коваріацією між розмірними ознаками. Тобто, такий метод має намір знайти межу еліпса з найбільшою кількістю даних в ньому. Метод EE здатний виявляти як аномальні, так і

пропущені дані, але при великих об'ємах ретроспективних даних алгоритм спотворює нормальні дані за усередненим значенням усієї вибірки.

Порівняльний аналіз результатів роботи методів виявлення аномальних даних показав, що більшість методів здатні виявляти аномальні та в деяких випадках пропущені значення. Метод DBSCAN добре справляється зі значними аномальними викидами, але за тривалих спотворень даних алгоритм ігнорує ці значення. Для покращення роботи цього алгоритму необхідно масштабувати дані та змінювати розмірність вхідних даних для більш точної їх ідентифікації. Метод «Ізольованих лісів» показав один з найгірших результатів. Метод EE здатний виявляти як аномальні, так і пропущені дані, але при великих об'ємах ретроспективних даних алгоритм спотворює нормальні дані за усередненим значенням усієї вибірки. Метод локального рівня викиду LOF демонструє також хороші результати, хоча він не здатний виявляти пропущені дані, які можна вирішити завдяки попередньому виділенню пропущених даних та їхній інтерполяції.

Для перевірки ефективності методів достовіризації було використано дані з відкритих джерел про споживання електричної енергії північно-західного регіону енергосистеми США, які включають погодинні значення для 10 вузлів за період з 2015 до 2019 року.

Аналіз такого набору даних показав наявність аномальних значень, як одиничних, так і групових. За природою виникнення їх можна розділити на два класи: пропущені дані та помилки (від'ємні та аномально великі значення), які виникли в процесі передачі даних. У табл. 1 наведено статистичні показники даних США до застосування алгоритму достовіризації.

Таблиця 1

Вузли	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середнє значення, МВт·год	2735	2347	6295	554	577	1376	3396	1104	230	182
Стандартне відхилення, МВт·год	36836	447	978	112	80	289	640	221	96	46
Max, МВт·год	3340061	21556	11827	998	982	11297	5504	11583	591	397
Min, МВт·год	-90964	630	2600	-12	362	748	679	0	-819	0

Подальший аналіз виявив, що алгоритми на базі кластеризації спричиняють значну кількість хибно позитивних спрацювань у вузлах зі значною добовою та тижневою періодичністю. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати метод декомпозиції часових рядів за допомогою двосторонніх ковзних середніх з різною глибиною усереднення.

Кінцевий алгоритм виявлення та заміни для одного вузла складається з таких етапів:

1. Виділення часових зрізів із суцільного часового ряду навантаження $\mathbf{R}^{n \times 1} \rightarrow \mathbf{R}^{\frac{n}{24} \times 24}$.

2. Виявлення в часових зрізах грубих аномальних значень за

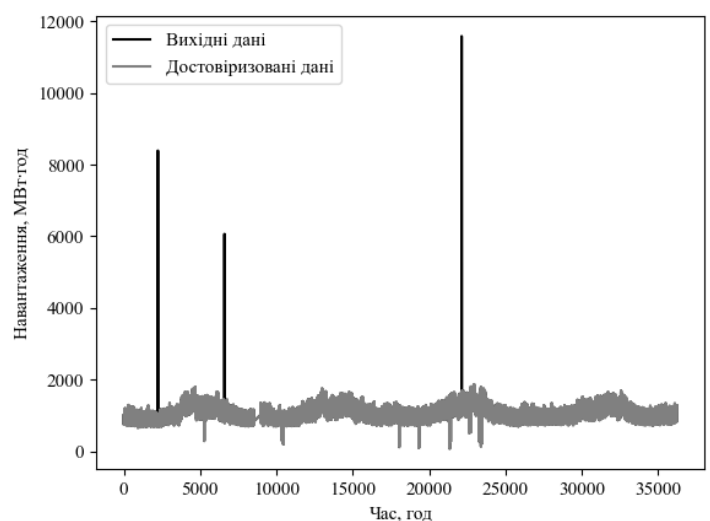


Рис.1

допомогою

методу кластеризації DBSCAN. Аномальними приймаються значення, які не належать до першого кластеру.

3. Заміна аномальних значень за допомогою інтерполяції (рис. 1).

4. Розгортка часових зрізів у суцільний ряд навантаження $\mathbf{R}^{\frac{n}{24} \times 24} \rightarrow \mathbf{R}^{n \times 1}$.

5. Декомпозиція часового ряду на трендову, сезонну та залишкову складові (рис. 2).

6. Виявлення аномальних значень (пункт 2) у часовому ряді залишкової складової.

7. Заміна виявлених значень за допомогою лінійної інтерполяції (рис. 3).

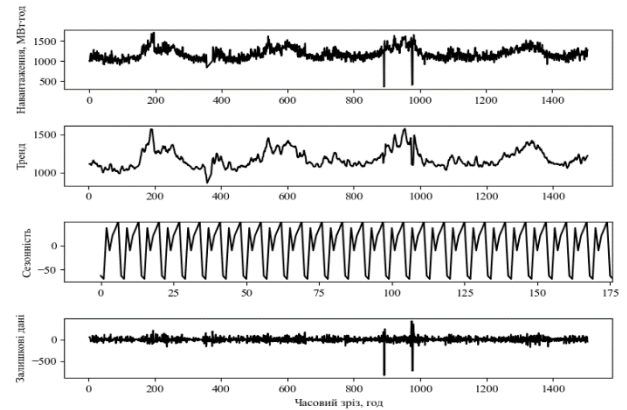


Рис. 2

На рисунках 1–3 наведено приклад двоетапної достовіризації даних для вузла № 8. даних США.

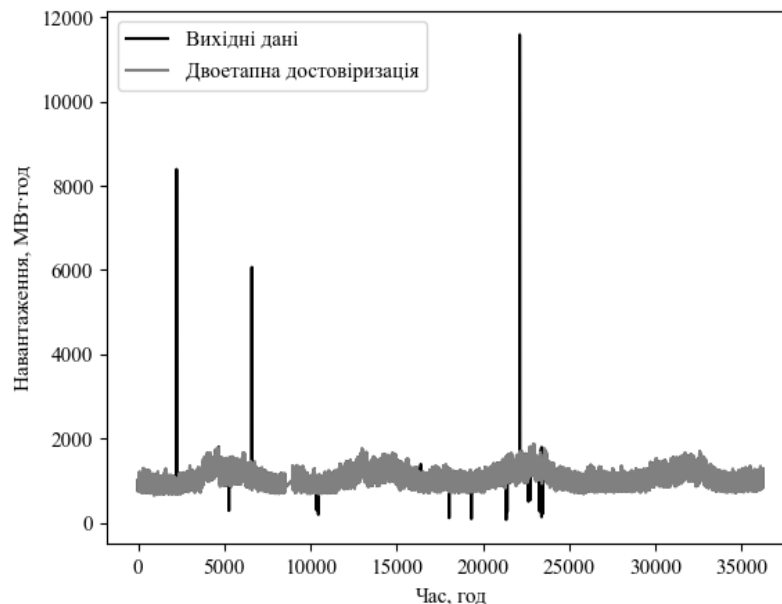


Рис. 3

Особливістю задачі виявлення аномальних значень є розбалансованість вибірки: зазвичай кількість аномальних значень значно нижча за кількість нормальних. Це призводить до неадекватності оцінки алгоритму класифікації за показником точності класифікації:

$$A = \frac{(TP + TN)}{n}, \quad (1)$$

де A – точність; TP – кількість правильно виявлених аномальних значень; TN – кількість правильно виявлених нормальних значень; n – загальна кількість значень у вибірці. У цьому випадку, якщо алгоритм класифікує всі значення ряду як нормальні, то значення точності буде 0,99884, але практична цінність такого підходу відсутня.

Для оцінки якості класифікатора на незбалансованих даних використовується показники Precision (коректність виявлення аномальних значень) та Recall (чутливість):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

де FP – кількість нормальних значень класифікованих як аномальні; FN – кількість аномальних значень класифікованих як нормальні. Для можливості однозначного ранжування методів класифікації використовують показник F-score, який є середнім гармонічним показників Precision та Recall:

$$F = \frac{2}{Recall^{-1} + Precision^{-1}} = \frac{2TP}{TP + (FP + FN)} \quad (2)$$

Для розрахунку TP , FP , TN , FN фактичні аномальні значення було визначено на підставі суджень експерта. Усього виявлено 420 аномальних значень з 362 160. У табл. 2 наведено значення показників якості класифікації для всіх розглянутих методів.

Таблиця 2

	TN	FN	FP	TP	Precision	Recall	F
DBSCAN	360 961	66	779	354	0,312	0,843	0,456
IF	292 440	26	69 300	394	0,006	0,938	0,011
Lof	294 999	125	66 741	295	0,004	0,702	0,009
EE	290 714	27	71 026	393	0,006	0,936	0,011

Ураховуючи переваги та недоліки наведених алгоритмів кластеризації, для подальшого використання вирішено застосовувати метод DBSCAN, який об'єднує в собі високу точність, специфічність визначення аномальних викидів та ефективність з погляду використання обчислювальних ресурсів.

Для оцінки похибки прогнозу використовувались ті ж самі дані США. Всі дані було розділено на навчальну та тестові вибірки. Останні 744 погодинні значення, які не використовувались для навчання моделі, віднесено в тестову вибірку, на якій розраховувались значення показника похибки прогнозу.

Для порівняння результатів прогнозування використано розроблену нейронну мережу глибинного навчання типу LSTM (long- short term memory). Нейронна мережа складається з рекурентного модуля LSTM після якого йдуть два прихованих повноз'язних шари. Як активаційна функція прихованого шару використовується функція selu (scaled exponential linear unit). Навчання нейронної мережі виконується за допомогою алгоритму оптимізації ADAM.

У табл. 3 наведено результати прогнозування за допомогою нейронної мережі на даних до та після усунення аномальних значень. Для оцінки середньої похибки прогнозу використовується MAPE.

Наведені результати показують, що усунення аномальних значень значно знижує середню похибку прогнозу з 17,3 до 5,8 % та підвищує стабільність прогнозів, зниження стандартного відхилення похибки з 35,1 до 1,6 %.

Таблиця 3

Вузли	з аномальними значеннями	без аномальних значень
Мінімальна похибка, %	4,1	3,6
Максимальна похибка, %	117,2	7,8
Середня похибка, %	17,3	5,8
Стандартне відхилення похибки, %	35,1	1,6

Висновки. Метод достовіризації на базі алгоритму DBSCAN ефективно визначає значні одиничні аномальні викиди, але за тривалих групових викидів такий алгоритм

ігнорує ці значення. Для покращення роботи алгоритму необхідно масштабувати та змінювати розмірність вхідних даних.

Використання алгоритмів на базі кластеризації IF, LOF, EE призводять до більшої кількості хибно позитивних спрацювань у вузлах зі значною добовою та тижневою періодичністю, ніж використання методу DBSCAN. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати метод декомпозиції часових рядів за допомогою двосторонніх ковзних середніх із різною глибиною усереднення.

Метод двоетапної достовіризації даних за допомогою методу DBSCAN та методу декомпозиції часових рядів дає змогу зменшити кількість хибно позитивних спрацювань, подальше використання достовіризованих даних для прогнозу дозволяє зменшити середню похибку з 17.3 до 5.8 %.

За результатами досліджень для задач виявлення аномальних даних та пропусків найбільш доцільним є метод DBSCAN, використання та розвиток якого дасть змогу збільшити ефективність виявлення аномальних значень.

Фінансується за держбюджетною темою «Науково-технічні засади розвитку та керованості сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генеруючих потужностей електроенергетичних систем» (шифр «СЕГМЕНТ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України, протокол №11 від 04.07.2017. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007711. КПКВК 6541030.

1. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку нової моделі ринку електричної енергії в Україні (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). *Вісник Національної академії наук України*. 2021. № 3. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020>
2. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
3. Блінов І. В., Мірошник В. О., Шиманюк П.В. Оцінка вартості похибки прогнозу «на добу наперед» технологічних втрат в електричних мережах України. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>.
4. IEC 63097/TR/Ed1: Smart Grid Roadmap. International Electrotechnical Commission, 2016, 308 p.
5. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С.47–48.
6. Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. AAAI Press, 1996. Pp. 226–231.
7. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z. Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy. 2008. Pp. 413–422. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17>
8. Breunig M.M., Kriegel H.P., Ng R.T., Sander J. LOF: identifying density-based local outliers. *ACM Sigmod Record* 29. 2000. Pp. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1145/342009.335388>.
9. Rousseeuw P.J., Van Driessen K. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. *Technometrics*. 1999. Vol. 41 (3). Pp. 212–23. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1999.10485670>.

ANALYSIS OF METHODS OF INCREASING DATA RELIABILITY FOR PROBLEMS OF SHORT TERM FORECASTING OF NODAL LOAD

V. O. Miroshnyk, P. V. Shymaniuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine
e-mail: miroshnyk.volodymyr@gmail.com, shymanp@ied.org.ua

A comparative analysis of clustering methods was performed to identify gaps and anomalous values in the data. Data from the northwestern region of the United States were used for evaluation. According to the analysis results, it was found that the use of the DBSCAN method leads to a much smaller number of false positives. An algorithm for two-stage data validation using clustering and time series decomposition methods is proposed. Ref. 9, fig. 3, tables 3.

Keywords: anomaly detection, Smart Grid, clustering algorithm, forecasting, power system.

1. Blinov I.V. Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine (According to the scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 3, 2021) *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2021. No 3. Pp. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020> (Ukr)
2. Blinov I., Miroshnyk V., Shymaniuk P. Short-term interval forecast of total electricity generation by renewable energy sources producers. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy* . 2019. No 54. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005> (Ukr)
3. Blinov I., Miroshnyk V., Shymaniuk P. The cost of error of "day ahead" forecast of technological losses of electrical energy. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070> (Ukr)
4. IEC 63097/TR/Ed1: Smart Grid Roadmap. International Electrotechnical Commission, 2016, 308 p.
5. Kyrylenko, O.V., Blinov, I.V., Tankevych, S.E. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 47–48. (Ukr)
6. Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. AAAI Press, 1996. Pp. 226–231.
7. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z. Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, Pisa, Italy, 2008. Pp. 413–422. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17> .
8. Breunig M.M., Kriegel H.P., Ng R.T., Sander J. LOF: identifying density-based local outliers. *ACM Sigmod Record* 29, 2000. Pp. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.1145/342009.335388> .
9. Rousseeuw P.J., Van Driessen K. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. *Technometrics*. 1999. Vol. 41(3). Pp. 212–223. DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1999.10485670> .

Надійшла: 11.06. 2021

Received: 11.06. 2021

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.058>

ПРИНЦИПИ УДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ

І.В. Волков*, чл.-кор. НАН України, **В.В. Голубєв****, канд. техн. наук,**В.І. Зозульов*****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: dep8ied@ied.org.ua

У статті розглянуті властивості найбільш часто використовуваних дво- та багаторівневих інверторних топологій, що застосовуються в системах перетворення електроенергії декількох первинних джерел живлення в необхідну вихідну напругу підвищеної якості для низьковольтних мереж і високовольтних споживачів. Однак загальним недоліком більшості відомих багаторівневих перетворювачів є зростання складності силових структур, збільшення кількості первинних джерел живлення, силових елементів і вартості пристроїв у міру збільшення числа їхніх рівнів напруги. Запропоновано дві схеми альтернативних трирівневих автономних інверторів напруги з високочастотним автотрансформатором із середньою точкою та приклад побудови їхньої цифрової системи керування. Проведено аналіз їхньої роботи на PSpice-моделях в системі проєктування OrCAD. Показано можливість отримання шести підрівнів напруги з меншою кількістю силових елементів і збільшеною якістю вихідної напруги порівняно з відповідними каскадними багаторівневими інверторами. Наведено переваги та галузі застосування автотрансформаторних мостових інверторів напруги за енергетичними й функціональними можливостями порівняно з відовими багаторівневими інверторами. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: багаторівневі автономні інвертори напруги, високочастотний автотрансформатор з середньою точкою, якість електроенергії.

Вступ. У засобах силової перетворювальної техніки та електроніки, автоматики, побутової техніки, а також в агрегатах безперебійного живлення, електроприводі, електротранспорті, енергетиці тощо широко використовуються імпульсні перетворювачі постійної напруги в змінну – автономні інвертори напруги (АІН). Значна різноманітність споживачів викликає необхідність забезпечення відповідних вимог до АІН. Здебільшого в діапазонах середніх і великих потужностей основними вимогами є: високий ККД, надійність, якість вихідної напруги й можливість знижувати чи підвищувати її значення порівняно з напругою джерела живлення. Остання вимога пов'язана з необхідністю стабілізації або імпульсного регулювання параметрів вихідної змінної напруги в необхідних межах, що так само впливає на якість електроенергії, особливо в процесі живленні перетворювачів від нестабільних джерел електроживлення.

Метою цієї статті є поліпшення основних характеристик запропонованих і альтернативних структур силових частин двозонних АІН (ДАІН) з автотрансформатором із середньою точкою та алгоритмів керування ними, порівнюючи з відповідними широко використовуваними АІН відомих типів.

Для підвищення точності формування вихідної синусоїдальної напруги силові схеми АІН мають давати змогу розділяти весь діапазон зміни вихідної напруги на зони модуляції з кількома рівнями вузькодіапазонного регулювання. Отримання необхідної кількості зон формування вихідної напруги досягається через поділення напруги за допомогою конденсаторів, багатообмоткових трансформаторів мережевої та підвищеної частоти або збільшеної кількості первинних джерел живлення постійного струму, акумуляторів, поновлюваних джерел енергії та паливних елементів.

Останнім часом широкого застосування набули багаторівневі інвертори (БР АІН), що забезпечують означені вище вимоги. Вони побудовані на основі каскадних або гібридних з'єднань однофазних Н-мостових одноплечових трирівневих АІН або модулів інших типів [1–3].

Одноплечовий АІН, принципова схема котрого показана на рис. 1, містить чотири послідовно включених транзисторно-діодних ключа $S1-S4$, а також два фіксуючих діоди (*Clamped diode*) $CD1$, $CD2$ і конденсаторний подільник напруги, який завдяки наявності

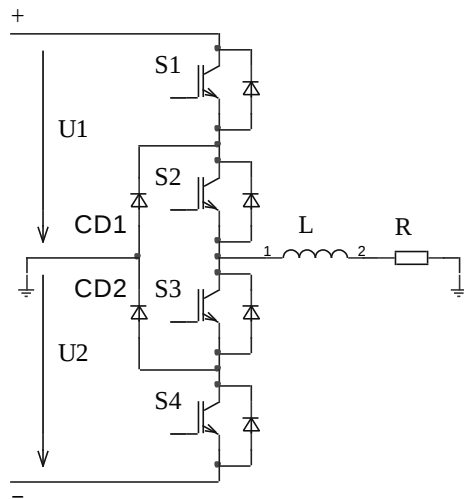


Рис. 1

середньої точки отримує можливість формувати третій рівень і покращену форму додатної та від'ємної півхвилі синусоїдальної вихідної напруги.

Перетворювачі з каскадним з'єднанням цих модулів живляться від окремих ізольованих джерел з фіксованою нульовою точкою або «летючими» конденсаторами (*flying capacitors*) і фіксуючими діодами [3]. Звідси виникають недоліки БР АІН такого типу: утруднення керування зарядом і розрядом конденсаторів та контролю рівнів напруги на них; підвищені амплітуди зворотних напруг на фіксуючих діодах, необхідна кількість яких квадратично пов'язана з кількістю рівнів напруги; неможливість двосторонньої передачі енергії. Загальним недоліком усіх багаторівневих перетворювачів є ускладнення силових схем, зростання кількості елементів і вартості пристроїв у міру

збільшення кількості рівнів їхньої напруги.

Більш привабливими для промисловості та енергетики вважаються топології БР АІН на основі двох і більше з'єднаних послідовно однофазних Н-мостових комірок АІН. Вперше каскадні БР АІН такого типу описано в патенті [4] ще в 1975 році. На рис. 2 показано один із варіантів принципової схеми силової частини двозонного (трирівневого) каскадного АІН (рис. 2 а) такого типу та діаграми напруг на виході комірок (рис. 2 б).

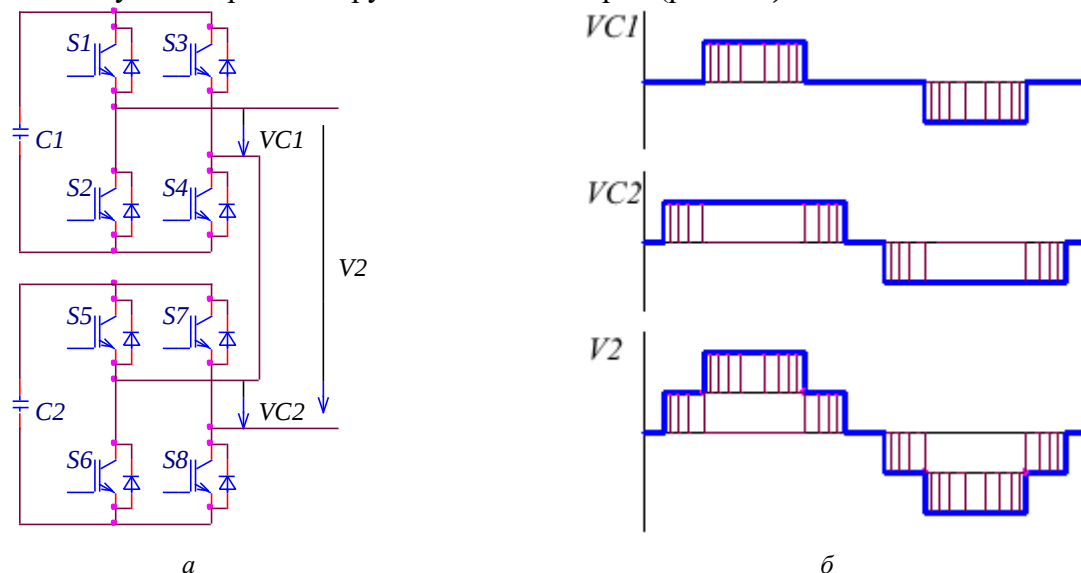


Рис. 2

Недоліком вищеповисаних топологій є також необхідність наявності кількох незалежних джерел живлення, що обмежує сферу їхнього застосування.

Для низьковольтних мереж як альтернативні пропонуються схеми з високочастотними імпульсними автотрансформаторами (АТ) із середньою точкою, що спроможні підвищити їхню вихідну напругу, покращити її гармонічний склад та знизити габарити, масу та

кількість транзисторно-діодних ключів перетворювачів завдяки використанню підвищеної робочої частоти автотрансформатора та сучасних магнітних матеріалів [5].

На рис. 3 показана силова схема пропонованого трирівневого АІН-1, що містить трифазний міст на шести діодно-транзисторних ключах $S1-S6$, високочастотний АТ із середньою точкою та вихідний LC -фільтр нижніх частот.

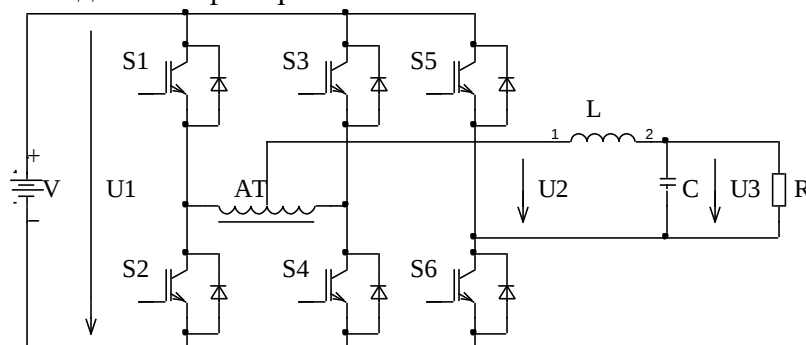


Рис. 3

Силовa схема та система керування АІН-1 досліджувалися на PSpice-моделях у системі проектування OrCAD.

На рис. 4 показано результати моделювання: епюри імпульсів керування анодної (верхньої) групи ключів $S1$ і $S3$, (нижні ключі $S2$ і $S4$ працюють в протитакті з верхніми) в схемі рис. 3 і вихідної напруги $U3$ після LC -фільтра. Ключі $S5$ і $S6$ працюють в протитакті з частотою вихідної напруги. Результати моделювання отримано для параметрів схеми: $U1=300$ В, $L1=500$ мкГ, $C1=5$ мкФ, $R=10$ Ом.

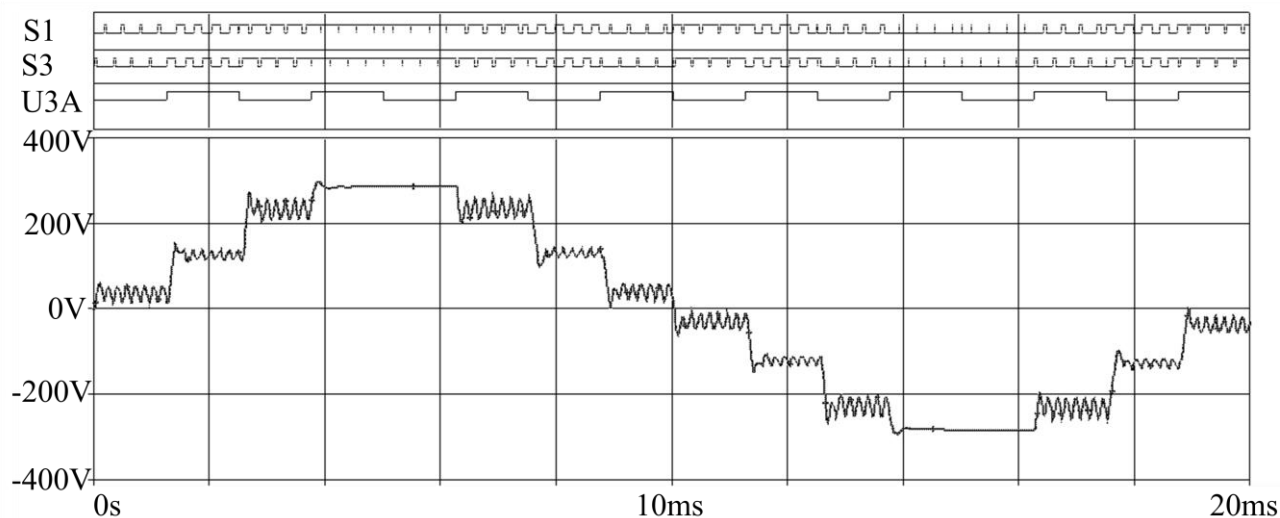


Рис. 4

Згідно з епюрами $S1$ і $S3$ у разі одночасного вмикання відповідних ключів на виході формується верхній рівень вихідної напруги $U2=U3=U1$ (рис. 3), рівний напрузі джерела живлення V . Коли ж ці ключі замикаються по черзі, після фільтра утворюється середній рівень $U3=U1$. І, нарешті, коли ключі $S2$ і $S4$ одночасно замкнуті, на виході отримуємо нижній (нульовий) рівень вихідної напруги $U2=U3=0$.

Отже, автотрансформатор АТ із середньою точкою дає змогу створити додатково третій (середній) рівень, у результаті чого весь діапазон імпульсної модуляції ділиться на дві зони, що водночас дає змогу істотно підвищити точність формування кривої вихідної напруги за аналогією з регуляторами змінної напруги з вольтододавальними трансформаторами. Але, на відміну від них, маємо меншу масу автотрансформатора порівняно з вольтододатком на основній частоті [6], а також меншу вдвічі кількість ключів і відповідно більшу надійність порівняно з вольтододатком на високій частоті [7].

Отримання вихідної напруги U_2 , удвічі вищої (за амплітудою) за напругу живлення U_1 , досягається в АІН-2 за схемою [5], показаною на рис. 5.

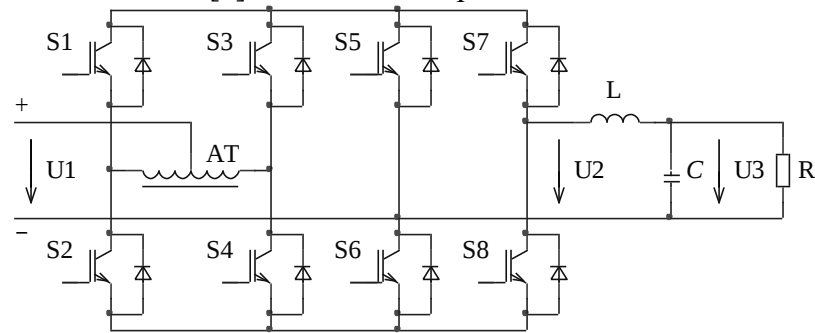


Рис. 5

Перетворювач містить додаткову транзисторно-діодну стійку S_7, S_8 , а середню точку АТ під'єднано до додатного затискача джерела живлення, від'ємний затискач якого під'єднано до навантаження R .

На рис. 6 наведено результати дослідження PSpice-моделі цифрової системи керування АІН-2: епюри сигналів керування верхніми ключами (рис. 5): $S_1(U39)$, $S_3(U41)$, $S_6(U44)$ і $S_7(U45)$ (в дужках указано номери мікросхем на рис. 7, вихідні сигнали котрих подаються на драйвери відповідних транзисторів), сигналу перемикання зон модуляції U_{20} , сигналу молодшого розряду U_{3A} (U_{9A} , U_{16A} , U_{21A}), що перемикає підзони модуляції (про які йтиметься нижче), і епюра вихідної напруги на навантаженні АІН-2. Результати отримано для таких параметрів схеми: $U_1=300$ В, $L=500$ мкГн, $C=5$ мкФ, $R=10$ Ом.

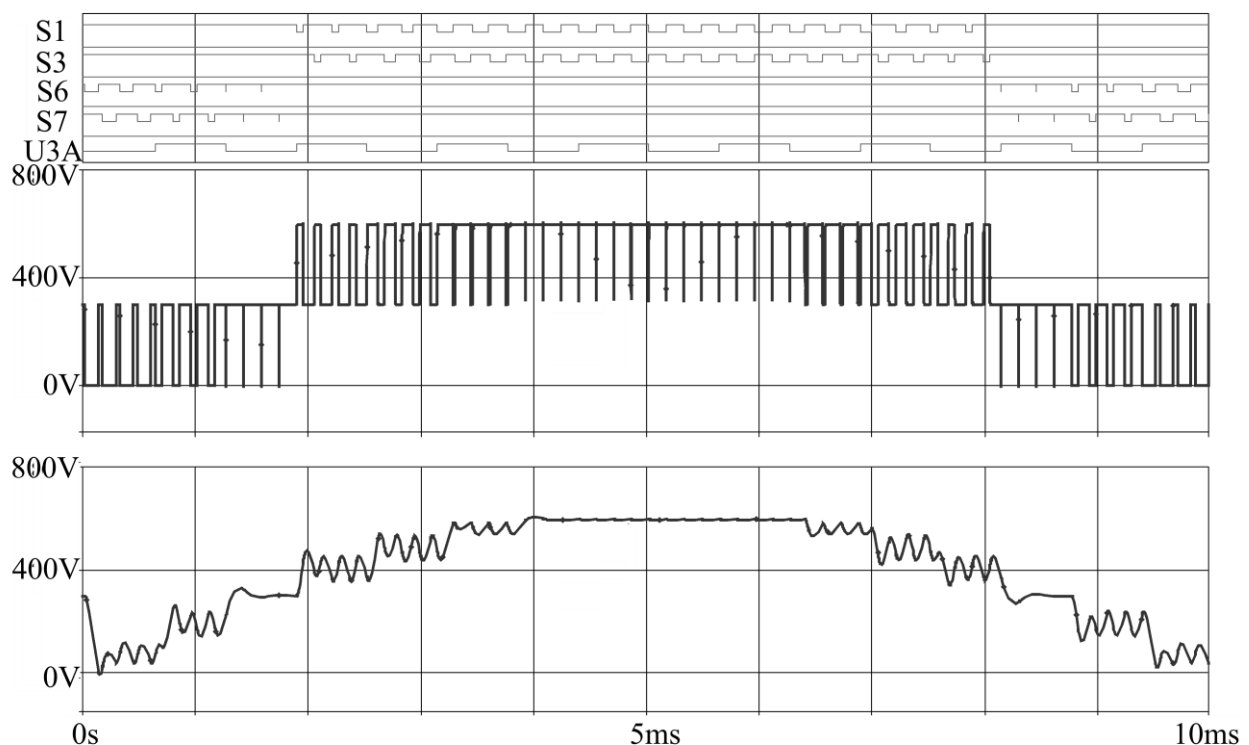


Рис. 6

У пропонованих схемах використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), завдяки якій у кожній зоні вихідної напруги створюється не один, а кілька рівнів напруги (див. рис. 4 і 6), що наближають його форму до синусоїдної.

Вихідна напруга АІН-2 (рис. 6) удвічі більша вихідної напруги АІН-1 (рис. 4), отримана за ідентичних вихідних параметрів і незмінного принципу роботи системи керування. Але завдяки збільшенню вдвічі кількості підзон модуляції (зادля експерименту)

отримано вдвічі більше ступенів і кращу форму вихідної напруги, за якістю рівноцінну шестирівневою БР АІН.

Системи керування синусоїдною ШІМ виконуються аналоговим і цифровим, апаратним і програмним методами [2]. На рис. 7 показано цифрову PSpice-модель частини системи керування АІН-2, яка реалізується в програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС).

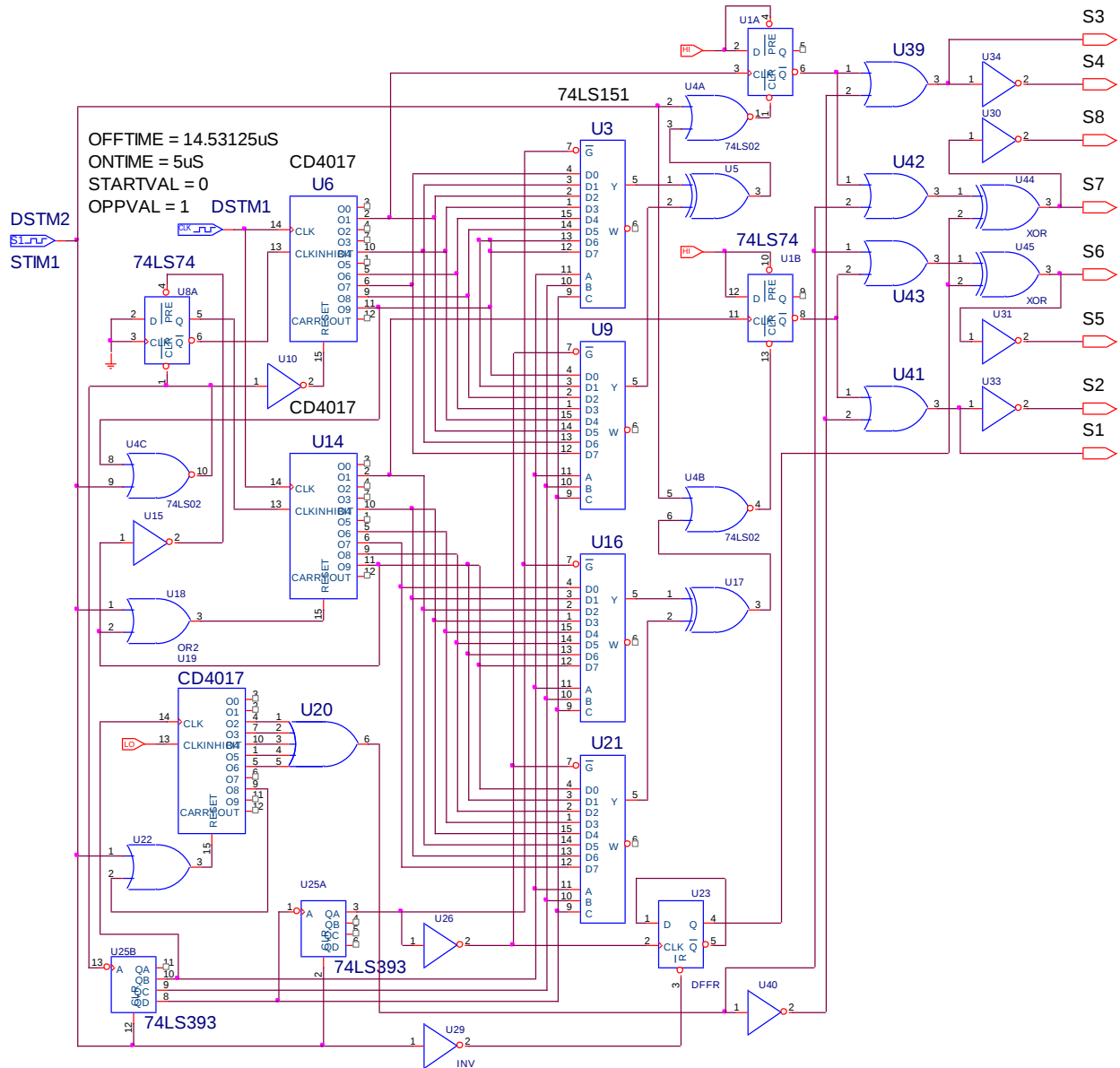


Рис. 7

Основними елементами цієї схеми є мікросхеми CD4017 (U6 і U14) і 74151 (U3, U9, U16 і U21). Позначення в дужках є позиціями наведеної схеми. Опишемо коротко її роботу.

Мікросхема CD4017 – десятковий лічильник з дешифратором, що дає змогу переводити код у двійковій системі в електричний сигнал і виводити останній на один з десяти виходів лічильника. Частина імпульсних сигналів із виходів лічильника в певному порядку розподіляються входами мультимплексора 74151.

Мультимплексор 74151 містить селектор даних із восьми вхідних сигналів, на входи котрого (A, B, C) подається трирозрядний двійковий код, що виділяє необхідний вхідний сигнал. Виділений сигнал з'являється на двох виходах: прямому – Y та інверсному – W. Тому впродовж кожного півперіоду сигналу молодшого розряду двійкового лічильника селектора мультимплексора відбувається зміна шпаруватості вихідного сигналу, чим пояснюється

утворення горизонтальних сходинок, що рівносильно збільшенню числа рівнів у вихідній напрузі.

Подальше покращення форми вихідної напруги можливе ускладненням системи керування завдяки збільшенню кількості лічильників і мультиплексорів, що формують додаткові підзони у вихідній напрузі без зміни кількості силових елементів, застосуванням додаткових джерел напруги, відводів автотрансформатора, а також каскадним з'єднанням кількох АІН.

Регулювання ж вихідної напруги можливе лише каскадним з'єднанням інверторних модулів або за допомогою підвищувальних DC/DC конверторів. Запропоновані й досліджені інвертори АІН-1 та АІН-2 є більш перспективними порівняно з класичними Н-мостовими інверторними модулями для побудови каскадних багаторівневих АІН середніх і великих потужностей, оскільки вимагають меншого числа незалежних джерел електроенергії, менше силових елементів, мають підвищену надійність і універсальність, тобто за відповідної зміни алгоритму керування силовими ключами вони можуть виконувати роль безпосередніх перетворювачів змінної напруги з вільною циркуляцією реактивної енергії [5].

Висновки. Розглянуто принципи побудови та зроблено оцінювання властивостей відомих багаторівневих автономних інверторів напруги.

Аналіз роботи запропонованих інверторів на PSpice-моделях показав можливість отримання шести й більше підрівнів із меншою кількістю силових елементів і поліпшеною якістю вихідної напруги, аналогічно відповідним каскадним багаторівневим інверторам.

Представлені автотрансформаторні мостові інвертори за відповідного керування дають змогу не тільки підвищувати вихідну напругу (АІН-2) та покращувати її якість, але, як порівняти з відомими БР АІН, також виконувати інші функції: регулювати та стабілізувати змінну напругу; працювати в режимі синхронного випрямляча; працювати в реверсному режимі, передаючи енергію у зворотному напрямку.

1. Malinowski M. et al. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 57. No. 7. Pp. 2197–2206. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030767>
2. Holmes D. Grahame, Lipo Thomas A.. *Pulse Width Modulation For Power Converters Principles and Practice*. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470546284>
3. Rodríguez J, Bernet S., Wu B., Pontt J. O. and Kouro S.. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives. *IEEE transactions on industrial electronics*. December 2007. Vol. 54. No 6. Pp. 2930–2945. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>
4. Baker R. H. and L. Bannister H. Electric Power Converter, U.S. Patent 3 867 643, Feb. 1975.
5. Голубев В.В. Двухзонные импульсные преобразователи переменного напряжения с высокочастотным автотрансформатором. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2007. Вип. 2(17). С. 94–100.
6. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наук. думка, 1983. 216 с.
7. Кобзев А.В. Многоступенчатая импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
8. Харрис Дэвид М., Харрис Сара Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. Дополнение по архитектуре. 1622 с.
https://picloud.pw/media/resources/posts/2018/03/08/Харрис_Цифровая_схемотехника_и_архитектура.pdf

PRINCIPLES OF IMPROVEMENT OF MULTILEVEL AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS

I.V. Volkov, V.V. Golubev, V.I. Zozulev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: dep8ied@ied.org.ua

The article considers the properties of the most commonly used two-and multilevel inverter topologies used in systems for converting electricity from several primary power sources into the required high-quality output voltage for low-voltage networks and high-voltage consumers. However, a common disadvantage of most known multilevel converters is the increasing complexity of power structures, an increase in the number of primary power sources, power elements, and the cost of devices as the number of their voltage levels increases. Two schemes of alternative three-level autonomous voltage inverters with a high-frequency autotransformer with a midpoint and an example of constructing their digital control system are proposed. The analysis of their work on PSpice models in the OrCAD design system is

carried out. The possibility of obtaining six voltage sublevels with fewer power elements and increased output voltage quality is shown, compared to the corresponding cascade multilevel inverters. The advantages and applications of autotransformer bridge voltage inverters in terms of energy and functionality compared to well-known multilevel inverters are presented. Ref. 8, fig. 7.

Keywords: multilevel autonomous voltage inverters, high-frequency autotransformer with a midpoint, power quality.

1. Malinowski M. et al. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 57. No 7. Pp. 2197–2206. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030767>
2. Holmes D. Grahame, Lipo Thomas A.. Pulse Width Modulation For Power Converters Principles and Practice. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470546284>
3. Rodríguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J. O. and Kouro S.. Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives. IEEE transactions on industrial electronics. December 2007. Vol. 54. No 6. Pp. 2930–2945. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044>
4. Baker R. H and Bannister L. H. Electric Power Converter, U.S. Patent 3 867 643, Feb. 1975.
5. Golubev V.V. Two-zone pulse converters of alternating voltage with a high-frequency autotransformer. *Pratsi Instytutu elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy* . 2007. No 2(17). Pp. 94–100. (Rus)
6. Lipkovsky K.A. Transformer-key executive structures of alternating voltage converters. Kyiv: Nauk. dumka, 1983. 216 p. (Rus)
7. Kobzev A.V. Multi-zone pulse modulation. Theory and application in electrical energy parameter conversion systems. Novosibirsk: Nauka, 1979. 304 p. (Rus)
8. David M. Harris, Sarah L. Harris. Digital circuitry and computer architecture. *Architecture supplement*. 1622 p. https://picloud.pw/media/resources/posts/2018/03/08/Харрис_Цифровая_схемотехника_и_архитектура.pdf (Rus)

Надійшла: 01.11.2021

Received: 01.11.2021

ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

УДК 621.586

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.065>

ЩИТОВИЙ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИЙ ВИМІРЮВАЧ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Б.А. Кромпляс*, канд. техн. наук, **А.С. Левицький****, докт. техн. наук, **Є.О. Зайцев*****,
докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: b_kromp@i.ua, levitskiyanatoliymail@gmail.com, zaitsev@i.ua

Проведено аналіз функціональних можливостей електронних щитових вимірювачів електричних експлуатаційних параметрів енергогенеруючих об'єктів. Доповнено перелік функцій вимірювачів, що дало змогу підвищити їхні експлуатаційні характеристики. Для щитового інтелектуалізованого вимірювача напруги змінного струму наведено методи і результати реалізації цих функцій. Описано структурну схему розробленого щитового інтелектуалізованого вимірювача та наведено основні його технічні характеристики. Запропоновано метод мобільного калібрування приладу, за якого застосовується джерело калібраційного сигналу з окремим фіксованим значенням, а сам процес калібрування керується з клавіатури приладу. Наведено розгорнутий та спрощений модернізований алгоритми калібрування. Бібл. 12, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: енергогенеруючий об'єкт, блок щитового управління, електричний параметр, інтелектуалізований щитовий вимірювач, метод мобільного калібрування.

Постановка проблеми. Надійна робота та безпечна експлуатація об'єктів енергосистеми є однією з основних складових енергобезпеки будь-якої країни. Важливим аспектом забезпечення надійної та безаварійної експлуатації об'єктів енергосистеми є контроль та моніторинг їхнього фактичного технічного та функціонального стану [1, 2]. В умовах "Індустрії 4.0" забезпечення реалізації контролю та моніторингу здійснюється через впровадження в структуру об'єктів енергосистеми комплексу сучасних інтелектуалізованих щитових контрольно-вимірювальних приладів і автоматики онлайн самоконтролю [3].

Електронні щитові вимірювачі функціональних параметрів енергогенеруючих об'єктів знаходять дедалі ширше застосування замість електромеханічних [4–7], попри те, що вони вимагають окремого безперебійного електроживлення [8–10]. Аналіз ефективності застосування таких вимірювачів та оцінок операторів пультів управління об'єктів енергетики виявив доцільність їхнього удосконалення [9], тому було розроблено концепцію побудови удосконалених інтелектуалізованих щитових вимірювачів функціональних параметрів об'єктів енергетики [10].

Концепція передбачає реалізацію в електронних щитових вимірювачах додаткових властивостей, а саме:

- наявність матричного індикатора розмірності вимірюваного параметра, а в програмі обробки вхідного сигналу – зміну розмірності залежно від значень цього сигналу;
- регулювання яскравості свічення світлодіодних індикаторів (ручне встановлення);
- встановлення діапазону для аналогової шкали (у межах встановленого діапазону вхідного параметра), що дасть змогу збільшити розрізняльну здатність аналогової шкали та покращити можливість відстежувати невеликі зміни вхідного параметра;
- у програмному забезпеченні приладу передбачення наявності програми приймання через інтерфейс пакета налаштувань приладу від загальносистемного контролера та їхнього встановлення.

вал сума ділиться на число відліків N , і з результату обчислюється квадратний корінь. У приладі застосовано лінійний алгоритм визначення інтервалу [11], за якого вимірювання здійснюється протягом фіксованого числа періодів частоти вхідного сигналу N_U . У цьому разі N визначається як

$$N = \frac{N_U}{f_u \cdot f_d}, \quad (2)$$

де f_u – частота вхідної напруги; f_d – частота відліків АЦП.

За вибраного для приладу $N_U = 10$ і $f_d = 1/5580$ число відліків N для діапазону частоти вхідного сигналу (45...55) Гц знаходиться в межах (1240...1014) відповідно. Початок і закінчення інтервалу вимірювання визначається в моменти переходу через нуль від негативного до позитивного значення вхідної напруги. Значення константи N_U та інших технологічних даних заносяться до електропрограмованого запам'ятовуючого пристрою (ЕПЗП) DSP у процесі первинних налаштувань під час виготовлення приладу.

Сформований в DSP код діючого значення вхідної напруги через схему гальванічної розв'язки ГР1 передається системному мікроконтролеру (СМК). Протокол передачі – пакетний асинхронний: DSP після обчислення чергового результату вимірювання формує пакет, в який входять відповідно маркер початку пакета, код результату та контрольна сума пакета.

На підставі отриманих даних, а також даних налаштувань та калібрування, що знаходяться в електропрограмованій постійній пам'яті запам'ятовуючого пристрою (ЕППЗП), СМК формує коди відображення даних, які відтворюються в зрозумілій для оператора формі блоком індикації (БІ) відповідними засобами формування зображення (рис. 2), а саме:

- у лінійній аналого-дискретній шкалі (ЛШ);
- у матричному індикаторі розмірності результату вимірювання (МІ);
- у 4-х розрядному цифровому індикаторі значення результату (ЦІ).

Для досягнення мінімальної споживаної потужності вся індикація (динамічна і статична) формується відповідними контролерами, а саме: лінійної шкали – КЛШ, матричного індикатора – КМІ, цифрового індикатора – КЦІ. Ці ж контролери за відповідними командами від СМК встановлюють і підтримують задану яскравість свічення індикаторів.

Обмін даними приладу із зовнішньою інформаційною системою здійснюється через інтерфейс RS 485. Для забезпечення гальванічної розв'язки апаратної частини адаптера інтерфейсу від основних вузлів приладу введений елемент ГР2, через який і здійснюється обмін даними системи та СМК.

Живлення приладу забезпечує блок живлення (БЖ), подача живлення на гальванічно розв'язані блоки ВБ та RS485 реалізована через перетворювачі DC–DC з гальванічно розв'язаними виходами.



Рис. 2

Основні технічні характеристики реалізованого щитового інтелектуалізованого вимірювача змінної напруги такі:

- частота вимірювального струму – (45...55) Гц;
- діапазони вимірюваної напруги: 1) від 0 до 120 В; 2) від 0 до 250 В; 3) від 0 до 500 В. Усі діапазони встановлюються з клавіатури приладу або через інтерфейс RS – 485, протокол MODBUS RTU. Параметри з'єднання встановлюються з клавіатури приладу.

Границі основної зведеної похибки становлять $\pm 0,5\%$, за нормуюче прийнято значення 500,0 В.

На рис. 2 показано, як результати вимірювань вхідного параметра виводяться на:



Рис. 3

- цифровий чотирирозрядний індикатор;
- лінійну двоколірну світлодіодну шкалу (світло-зелений та червоний кольори);
- індикатор розмірності вимірюваного параметра.

Лінійна двоколірна світлодіодна шкала індикуює значення вхідного параметра з розрізняювальною здатністю 1/16 верхньої межі індикації вхідного параметра. На світлодіодній лінійній шкалі засвічується кількість світлодіодів, пропорційна значенню вхідного параметра. Відлік ведеться від нижньої поділки шкали.

Діапазон встановлення значення верхньої межі індикації вхідного параметра на лінійній шкалі – від 50,0 до 100,0 % значення вимірюваного діапазону. Крок налаштування – 0,1 %.

Для лінійної двоколірної світлодіодної шкали передбачено можливість встановлення верхньої межі індикації вхідного параметра через клавіатуру або інтерфейс.

У вимірювачі встановлено функцію зміни кольору лінійної двоколірної світлодіодної шкали залежно від рівня вхідного сигналу за алгоритмом: вимірювана величина в інтервалі між верхнім та нижнім порогами – основний колір (світло-зелений), за межами інтервалу – тривожний (червоний). Діапазон встановлення значень порогів зміни кольору лінійної шкали від 0,1 до 100,0 % від значення вимірюваного діапазону. Крок установки – 0,1 %. Значення порогів встановлюється з клавіатури або програмно через інтерфейс.

Для забезпечення комфортності оперативного зчитування показів оператором зі щитового інтелектуалізованого вимірювача змінної напруги передбачено можливість регулювання яскравості індикаторів за допомогою клавіатури. Всього доступно 15 рівнів яскравості. Встановлене значення яскравості запам'ятовується в EEPROM контролера.

У програмному забезпеченні приладу реалізовано такі функції обробки результатів вимірювань:

1. Функція цифрового фільтра, що дає змогу зменшити вплив випадкових перешкод на процес вимірювання. Робота фільтра описується параметрами, що задаються в процесі програмування:

- **int** (інтегрування): від 2 до 255 відліків вхідної напруги;
- **AVE** (осереднення): від 2 до 255 відліків.

2. Функція примусового (програмного) обнуління показів індикатора у випадку значення вхідного сигналу, меншого за заданий пороговий. Встановлення значення порога – з клавіатури або через інтерфейс. Діапазон обнуління показів приладу від 0.01 до 40 % діапазону вимірювань. Крок встановлення – 0,01 %.

3. Функція масштабування значень вхідної напруги та індикації перерахованого значення. Відповідні налаштування коефіцієнта трансформації здійснюються з клавіатури або через інтерфейс.

Живлення вимірювачів здійснюється від джерел:

- змінного струму напругою (75...242) В і частотою (50/60 ± 5) Гц;
- постійного струму напругою (100...380) В;

Споживана вимірювачем повна потужність не перевищує 3.0 В·А.

Габаритні розміри вимірювача становлять 96×96×114 мм, маса не перевищує 0,4 кг.

Ручне налаштування виконується за допомогою клавіатури, вмонтованої в нижню частину передньої панелі. З метою запобігання несанкціонованого втручання в роботу приладу клавіатура закривається кришкою, для якої передбачено можливість пломбування.

Зовнішній вигляд п'ятикнопкової клавіатури наведено на рис. 3.

Кнопка **М** «Меню» має три функції:

- вхід в режим програмування вимірювача простим натисканням;
- вихід з режиму програмування вимірювача простим натисканням у разі знаходження в головному меню;
- вихід з режиму набору числа зі збереженням вже встановленого значення цього числа.

Кнопки «Зміна» ,  мають дві функції:

- переміщення пунктами меню в режимі «кільце»;
- зміна значення на одиницю десяткового розряду числових параметрів у момент їхнього встановлення.

Кнопка  «Ввести» має дві функції:

- вхід в пункт меню (підменю);
- занесення в пам'ять СМК та в ЕППЗП набраного значення параметра.

Кнопка **ESC** «Скасування» має три функції:

- вихід із режиму підменю на верхній рівень меню простим натисканням;
- у режимі набору числа скасування вводу цифри у встановленому розряді та повернення на старший розряд;
- вихід з режиму програмування в момент знаходження в основному меню.

Введення кожного з видів налаштувань організовано у вигляді пунктів основного меню, які можуть містити в собі й підменю, якщо налаштування потребує встановлення кількох параметрів. Вхід у режим налаштувань з режиму вимірювань – кнопка **М**, водночас на індикаторах відкривається вікно пункту основного меню. На рис. 4 для прикладу зображені вікна деяких пунктів основного меню, а саме: *a* – встановлення коефіцієнта трансформації; *б* – встановлення параметрів лінійної шкали; *в* – встановлення ступеня яскравості індикаторів.

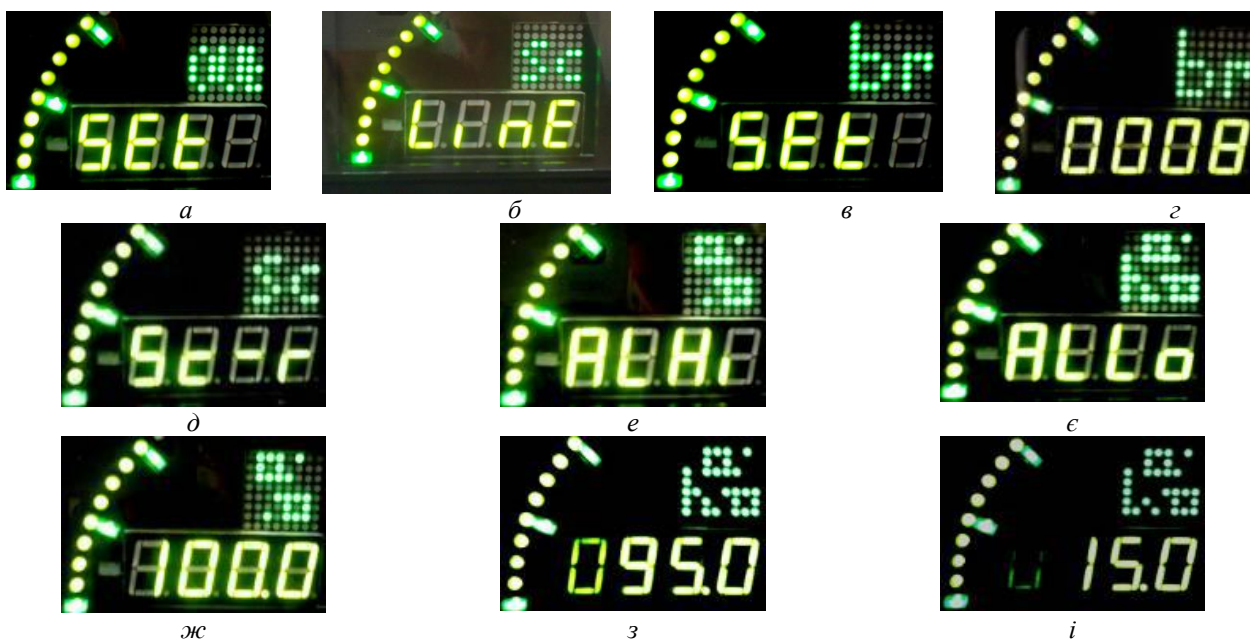


Рис. 4

Встановлення рівня яскравості свічення індикаторів виконується так. Оператор обирає вікно цього пункту (рис. 4 *в*).

Вхід в пункт меню з основного меню здійснюється за допомогою кнопки . За цих умов відкривається вікно підменю (рис. 4 *г*), де на цифровому індикаторі відображений встановлений рівень яскравості. Кнопками   змінюється рівень яскравості від одного до п'ятнадцяти. Водночас зі зміною рівня встановлюється і відповідна яскравість індикаторів.

Фіксація вибраного рівня яскравості відбувається за допомогою кнопки . За цих умов виконується повернення в основне меню. Натисканням кнопок **М** або **ESC** здійснюється вихід з пункту в основне меню без зміни ступеня яскравості.

Для налаштування лінійної шкали оператор обирає вікно пункту (рис. 4 *б*), після чого потрапляє в підменю, до якого входять такі підпункти:

- введення діапазону індикації значень вхідного сигналу на лінійній шкалі (рис. 4 *д*);

- введення значення верхнього порогу зміни кольору ЛШ (рис. 4 е);
- введення значення нижнього порогу зміни кольору ЛШ (рис. 4 є).

Після вибору потрібного вікна підпункту та входу в підпункт відкривається відповідне вікно набору значення параметра з індикацією встановленого значення (рис. 4 ж, з, і). Алгоритм введення є однаковим для всіх підпунктів. Значення параметра набирається в процентах від верхньої границі встановленого діапазону вимірювання вхідного сигналу, починаючи зі старшого розряду. У програму приладу закладено функцію перерахунку в значення вимірюваного параметра. Такий спосіб вводу дає можливість певної універсалізації програмного забезпечення та процесу налаштувань для вимірювачів різних параметрів, але вимагає попереднього обрахунку числа для вводу.

Занесення набору в пам'ять приладу і повернення в підменю здійснюється кнопкою  повернення в підменю без зміни параметра – кнопкою **М**.

Функція встановлення для лінійної шкали діапазону відображення вхідного сигналу, що відрізняється від номінального діапазону вимірювання, і пропорційного встановлення порогів світлової сигналізації виходу вхідного сигналу за допустимі межі суттєво покращує наочність рівня цього сигналу на ЛШ, що полегшує роботу операторів, підвищуючи в такий спосіб надійність управління об'єктом у різних режимах роботи.

Аналогічно встановлюються й інші числові параметри налаштувань. Програмою приладу забезпечується запис налаштувань у комірки пам'яті, які використовуються також і вхідними регістрами для встановлення цих самих налаштувань через інтерфейс.

Встановлення і підтримування заданої точності вимірювання досягається шляхом періодичних калібрувань. Для електронних серійних щитових вимірювачів калібрування виконується за допомогою точних універсальних калібраторів і спеціальної програми калібрування через системний інтерфейс [7, 3, 12]. Отже, для проведення калібрування стає необхідним також і системний контролер (найчастіше – персональний комп'ютер або ноутбук) зі встановленим спеціальним програмним забезпеченням, а також інтерфейсний адаптер.

Зазвичай серійні універсальні калібратори – стаціонарні великогабаритні прилади або установки з досить жорсткими вимогами до умов експлуатації. Практично це вимагає знімання приладу з щита управління й проведення калібрування в спеціальній лабораторії, що суттєво збільшує як витрати часу, так і трудомісткість операції.

Авторами розроблений і пропонується до застосування метод мобільного калібрування, за якого застосовується джерело калібраційного сигналу з одним фіксованим значенням, а керування процесом калібрування здійснюється з клавіатури приладу.

Для застосування цього методу, крім вимог до вимірювального кола приладу, згаданих вище, необхідне виконання додаткових умов, а саме:

- наявність джерела калібраційного сигналу зі значенням, близьким до верхньої границі діапазону вимірювання вхідного сигналу, атестованого з точністю, вищою за клас точності приладу в 3–5 разів, і з такою ж стабільністю до умов експлуатації;
- наявність у приладі спеціального режиму калібрування із захищеною від несанкціонованого втручання ініціалізацією цього режиму;
- забезпечення апаратної або програмної компенсації дрейфу і зміщення АЦП на рівні, у 4...5 разів меншому розрізняльній здатності приладу, оскільки в методі застосовано двоточкову апроксимацію, і першою точкою прийнято нульовий відлік вхідного сигналу;
- виконання процесу калібрування в режимі безпосереднього вимірювання, обчислення значень та індикації вхідного сигналу.

Граф-алгоритм мобільного калібрування показаний на рис. 5. Кроки алгоритму, зображені в подвійній рамці, виконуються безпосередньо оператором, ним же ініціалізується продовження виконання процесу калібрування через клавіатуру приладу. Кроки алгоритму, зображені з подвійними боковими сторонами, ініціалізуються до виконання оператором, решта виконуються автоматично системним мікроконтролером приладу.

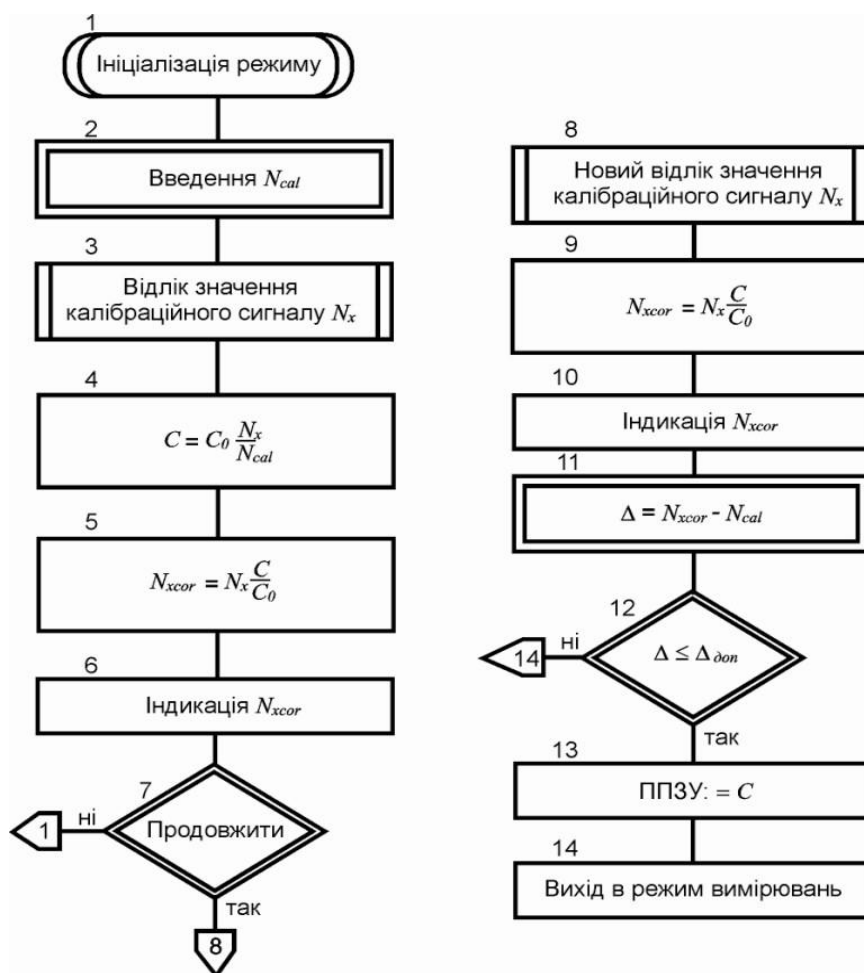


Рис. 5

Після надходження на вхід приладу калібраційного сигналу оператор у ручному режимі запускає процес калібрування. У вимірювачі цей крок алгоритму реалізовано апаратно-програмним способом: у момент подачі живлення на прилад має бути натиснута відповідна кнопка клавіатури. Після запуску режиму на табло приладу відкривається вікно набору значення калібраційного сигналу N_{CAL} . Після вводу оператором цього значення виконується вимірювання, отримання відліку значення калібраційного сигналу N_x та обчислення калібраційного коефіцієнта C за формулою, вказаною в блоці 4 (рис. 5) граф-алгоритму.

Константу C_0 введено для того, щоб можна було в програмному забезпеченні

приладу застосувати для обчислень цілочисельну арифметику, що суттєво збільшує швидкість виконання обчислень та зменшує місткість пам'яті програм для виконання. Після обчислення коефіцієнта C виконується корекція отриманого відліку N_x за формулою, вказаною в блоці 5 (рис. 5), отримане скореговане значення N_{Xcor} виводиться на табло, і програма очікує рішення оператора. Для уникнення грубих промахів у процесі вимірювання калібраційного сигналу в алгоритм було закладено коефіцієнт C , що залежить від числа значущих розрядів відліку калібраційного сигналу, розрядності мікроконтролера приладу та дає змогу врахувати обмежену точність обчислення.

Якщо оператор впевнюється в коректності отриманого результату, то ініціалізує продовження виконання. За цих умов прилад виконує нове вимірювання, корекцію відліку обчисленим коефіцієнтом C та індикацію отриманого результату. Оператор аналізує точність отриманого результату і приймає рішення про продовження процесу. У випадку успішного виконання калібрування в перепрограмовану постійну пам'ять приладу заноситься коефіцієнт C , який використовується для корекції всіх відліків до наступного калібрування, і виконується вихід у робочий режим вимірювань. В іншому випадку також виконується вихід у робочий режим, але без фіксації отриманого значення коефіцієнта C , і в усіх наступних вимірюваннях застосовується попереднє значення цього коефіцієнта. Повторне калібрування доцільно проводити після виявлення та усунення причин некоректного завершення виконаного процесу калібрування.

Для застосування описаного методу калібрування вимога безпосереднього вимірювання вхідного сигналу створює труднощі. Прилади на щитах управління застосовуються практично завжди з коефіцієнтами трансформації вхідного сигналу, відмінними від одиниці. За умови їхнього безпосереднього калібрування або перевірки це вимагає від оператора або оперативного перерахунку отриманих значень, або використання для кожного приладу спеціальних калібрувальних таблиць. Останнє вимагає суворої подачі калібраційного сигналу

відповідного значення. Встановлення одиничного коефіцієнта трансформації з наступним відновленням робочого створює незручності і є джерелом можливих помилок.

Для спрощення цієї операції пропонується модифікований алгоритм функціонування приладу: у випадку виявлення спеціальної ознаки програмно встановлювати режим безпосереднього вимірювання вхідного сигналу з одиничним коефіцієнтом трансформації або перерахунку і повертатися до режиму з робочим коефіцієнтом тільки після отримання ознаки повернення до робочого режиму.

У вимірювачі описаний вище алгоритм реалізовано апаратно-програмним способом. На задній панелі приладу, крім клем для підключення вхідної напруги та живлення, введено дві клем для ініціалізації режиму безпосереднього вимірювання вхідного сигналу. Цей режим ініціалізується виключно в момент подачі живлення за гальванічного з'єднання цих клем. Повернення до робочого режиму відбувається також у момент подачі живлення, але з розімкнутими клемми. Запропоноване рішення забезпечує високу надійність встановлення режиму роботи приладу.

Калібрування розглянутим методом дає змогу компенсувати певні інструментальні похибки вузлів приладу. У подільнику напруги вимірювального кола розробленого вимірювача застосовано резистори точністю $\pm 1\%$. Для калібрування приладу було застосовано атестоване джерело змінного струму напругою 249,45 В частотою 50 Гц. Після калібрування була проведена перевірка вимірювача за допомогою універсального калібратора М-142. Результати перевірки вимірювача на молодшому та старшому діапазонах вимірювання показано в табл. 1 та 2 відповідно.

Результати метрологічних досліджень ще кількох експериментальних зразків вимірювачів з тим самим джерелом сигналу тільки підтвердили ефективність застосованого методу калібрування. Джерела з фіксованим вихідним сигналом значно простіші, дешевші за серійні універсальні калібратори і випускаються в мобільному варіанті. Із застосуванням таких джерел і розглянутого методу калібрування цю операцію можна виконувати безпосередньо на місці встановлення приладу. Тому цей метод є мобільним.

За результатами дослідної експлуатації було отримано позитивні відгуки від користувачів таких приладів із побажаннями налагодити серійний випуск не тільки вимірювачів напруги змінного струму, але й щитових вимірювачів інших експлуатаційних параметрів обладнання об'єктів електроенергетики.

Таблиця 1

% $U_{вх}$ ном	Дійсне значення $U_{вх}$, В	Виміряне значення $U_{вх}$, В	Основна зведена похибка приладу, %	Допустиме значення основної зведеної похибки, %
5	6,000	6,0	0,00	$\pm 0,5$
10	12,000	11,9	-0,08	$\pm 0,5$
20	24,000	24,2	0,17	$\pm 0,5$
50	60,000	60,0	0,00	$\pm 0,5$
80	96,000	96,1	0,08	$\pm 0,5$
100	120,00 0	119,9	-0,08	$\pm 0,5$
120	144,00 0	144,0	0,00	$\pm 0,5$

Таблиця 2

% $U_{вх}$ ном	Дійсне значення $U_{вх}$, В	Виміря- не зна- чення $U_{вх}$, В	Основна зведена похибка приладу, %	Допустиме значення основної зведеної похибки, %
5	25,0	24,6	-0,09	$\pm 0,5$
10	50,0	49,3	-0,14	$\pm 0,5$
20	100,0	100,5	0,09	$\pm 0,5$
50	250,0	250,1	0,01	$\pm 0,5$
80	400,0	400,7	0,13	$\pm 0,5$
100	500,0	499,7	-0,06	$\pm 0,5$
110	550,0	551,1	0,21	$\pm 0,5$

Висновок. Розроблений інтелектуалізований щитовий вимірювач напруги з покращеними технічними характеристиками може бути використаний на енергогенеруючих об'єктах.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розвиток наукових засад, методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів обладнання електростанцій». Шифр «Параметр». Державний реєстраційний номер 0116U007285.

1. Zaitsev Ie., Levytskyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. *Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators*. Intechopen, 2020. Pp. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77988>.
2. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. In *Proc. of the Int. conf. on modern electrical and energy system (MEES-17)* November 15–17, 2017, Kremenchuk, Ukraine. Pp. 288–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.
3. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. S.M.A.R.T. technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. In *Proc. of the Int. conf. Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. 25–27, March 2021, Pichanur (India). Pp. 621–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>.
4. SMART AC Digital Voltmeter. URL: <https://pdf.indiamart.com/impdf/10828918755/MY-1485461/smart-ac-digital-voltmeter.pdf> (дата звернення: 31.08.2021).
5. Electronic panel ampermeters. URL: <http://www.uriel-shay.com/media/upload/files/564062.pdf> (дата звернення: 31.08.2021).
6. Измерители параметров электрической сети. URL: http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=116&Itemid=71&lang=ru (дата звернення: 31.08.2021).
7. Ц23.4 Амперметры и вольтметры постоянного тока для АЭС. URL: <https://www.elpribor.ru/catalog/56/1047/> (дата звернення: 31.08.2021).
8. Амперметры и вольтметры цифровые щитовые серии 3020. Руководство к эксплуатации 3.340.007 РЭ. – ОИУСН 140.003 РЭ. 45 с.
9. Кромпляс Б.А. Підвищення надійності роботи операторів щита управління енергогенеруючого об'єкта *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021)*. Чотирнадцята міжнародна науково-практична конференція 18–19 травня 2021 р. Київ, Україна. К.: НАУ, 2021. С. 85–86.
10. Кромпляс Б.А. Концепція побудови інтелектуалізованих щитових вимірювачів функціональних параметрів енергогенеруючих об'єктів. *XX Міжнародна науково-технічна конференція “Приладобудування: стан і перспективи”*. 18–19 травня 2021 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. С. 245–246.
11. 78M6610+PSD Energy Measurement Processor for Power-Supply Units. Data Sheet. 2017. Silergy Corp Proprietary information. 59 p.
12. Приборы для измерения унифицированных электрических сигналов постоянного напряжения, постоянного тока, температуры Ф1775.1 АД Ф/ 1775.2 АД. URL: <https://vbrspb.ru/product/odnokanalnye-panelnye-pribory-dlja-sistem-kontrolja-i-regulirovanija-f1775-ad-v-metallicheskom-korpuse/> (дата звернення: 12.07.2021)

SMART SHIELD PANEL AC VOLTMETER CELL

B.A. Kromplyas, A.S. Levytskyi, Ie.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

In this paper smart shield panel of electrical operating parameter meters of energy generating facilities functionality is analyzed. The list of functions of measuring instruments was supplemented, which allowed increasing their operational characteristics. Methods and results of realization of these functions given for the panel board intellectualized voltage meter of alternating current. The structural scheme of the developed panel board intellectualized meter is described, and its main technical characteristics are given. A method of mobile calibration of the device is proposed, in which a calibration signal source with a different fixed value is used, and the calibration process itself is controlled from the device keyboard. A modernized detailed, and simplified calibration algorithm is present. Ref. 12, fig. 5, tables. 2.

Keywords: energy generating object, panel control unit, electrical parameter, intellectualized panel meter.

1. Zaitsev Ie., Levytskyi A. Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. *Clean Generators - Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators*. Intechopen, 2020. Pp. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.77988>.

2. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. Hybrid capacitive sensor for hydro- and turbo generator monitoring system. *In Proc. of the Int. conf. on modern electrical and energy system (MEES-17)* November 15–17, 2017 Kremenchuk, Ukraine. Pp. 288–291. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.
3. Baranov G., Komisarenko O., Zaitsev I.O., Chernytska I. S.M.A.R.T. technologies for transport tests networks, exploitation and repair tools. *In Proc. of the Int. conf. Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. 25–27, March 2021, Pichanur (India). Pp. 621–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396055>.
4. SMART AC Digital Voltmeter. URL: <https://pdf.indiamart.com/impdf/10828918755/MY-1485461/smart-ac-digital-voltmeter.pdf> (accessed: 31.08.2021).
5. Electronic panel ampermeters. URL: <http://www.uriel-shay.com/media/upload/files/564062.pdf> (accessed: 31.08.2021).
6. Meters of parameters of an electric network. URL: http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.browse&category_id=116&Itemid=71&lang=ru (accessed: 31.08.2021). (Rus)
7. DC ammeters and voltmeters for NPP. URL: <https://www.elpribor.ru/catalog/56/1047/> (accessed: 31.08.2021). (Rus)
8. Digital panel ammeters and voltmeters 3020. Operation manual 3.340.007 РЭ. ОИУСН 140.003 РЭ. 45 p. (Rus)
9. Kromplyas B. Improving the reliability of the control panel operators of the power generation facility. Fourteenth International Scientific and Practical Conference. *Integrated intelligent robotic complexes (IIRTK-2021)*. Kyiv, Ukraine, May 18–19, 2021. Pp. 85–86. (Ukr)
10. Kromplyas B. The concept of construction of intellectualized panel meters of functional parameters of energy generating objects. XX International Scientific and Technical Conference "INSTRUMENT MANUFACTURING: state and prospects". Kyiv, Ukraine, May 18–19, 2021. Pp. 245–246. (Ukr)
11. 78M6610+PSD Energy Measurement Processor for Power-Supply Units. Data Sheet. 2017. Silergy Corp Proprietary information. 59 p.
12. Instruments for measuring unified electrical signals of direct voltage, direct current, temperature F1775.1 AD F/1775.2 AD. URL: <https://vbrspb.ru/product/odnokanalnye-panelnye-pribory-dlja-sistem-kontrolja-i-regulirovanija-f1775-ad-v-metallicheskom-korpuse/> (accessed: 12.07.2021). (Rus)

Надійшла: 18.09.2021
Received: 18.09.2021