



ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ • ВІДДІЛЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ
ТА УСТАНОВКИ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ
В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

№ 5
2024

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

Кириленко О.В. головний редактор,
академік НАН України
Шидловський А.К. академік НАН України
Блінов І.В. докт.техн.наук
Буткевич О.Ф. заступник головного
редактора, професор
Жаркін А.Ф. академік НАН України
Кенсицький О.Г. докт.техн.наук
Кондратенко І.П. член-кор. НАН України
Кузнецов В.Г. член-кор. НАН України,
Липківський К.О. заступник головного
редактора, професор
Мазуренко Л.І. професор
Михальський В.М. член-кор. НАН України
Стогній Б.С. академік НАН України
Шаповал І.А. докт.техн.наук
Шидловська Н.А. член-кор. НАН України
Щерба А.А. член-кор. НАН України
Юрченко О.М. докт.техн.наук
Городжа Л.В. відповідальний секретар
канд.техн.наук

EDITORIAL BOARD*

Kyrylenko O.V. Editor-in-Chief,
Member of NAS.Ukraine
Shydlovskiy A.K. Member of NAS Ukraine
Blinov I.V. Dr.Sc. (Eng.)
Butkevych O.F. Deputy Editor-in-Chief, Professor
Zharkin A.F. Member of NAS Ukraine
Kensitskiy O.H. Dr.Sc. (Eng.)
Kondratenko I.P., Corresponding Member of NAS Ukraine
Kuznetsov V.H. Corresponding Member of NAS Ukraine
Lypkivskiy K.O. Deputy Editor-in-Chief,
Professor
Mazurenko L.I. Professor
Mykhaskiy V.M. Corresponding Member of NAS Ukraine
Stohnii B.S. Member of NAS Ukraine
Shapoval I.A. Dr.Sc. (Eng.)
Shydlovska N.A. Corresponding Member of NAS Ukraine
Shcherba A.A. Corresponding Member of NAS Ukraine
Yurchenko O.M. Dr.Sc. (Eng.)
Gorodzha L.V. Executive Managing Editor,
Ph.D.

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Kyrylenko O.V. Member of NAS Ukraine, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv
Shydlovskiy A.K. Member of NAS Ukraine, Institute of electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv
Hubanski S. Professor, Chalmers University of Technology, Sweden
Zhuikov V.Ya. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Zagirnyak M.V. Professor, The Kremenchuk M.Ostrogradskiy National University, Ukraine
Clare Jon C. Professor, The University of Nottingham, Great Britain
Kulyk M.M. Member of NAS Ukraine, Institute of General Energy of NAS Ukraine, Kyiv
Oleshchuk V. Professor, Institute of Power Engineering of AS Moldova, Kishinev
Pavlik M. Member of NAS Ukraine, Technical University of Lodz, Poland
Peresada S.M. Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Pivniak H.H. Member of NAS Ukraine, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine
Rozov V.Yu. Corresponding Member of NAS Ukraine, State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS Ukraine, Kharkiv
Rossi K. Professor, The University of Bologna, Italy
Sokol Ye.I. Corresponding Member of NAS Ukraine, National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Ukraine, Kharkiv
Stakhiv P.H. Professor, National University "Lviv Polytechnica", Ukraine, Lviv
Strzelecki R. Professor, Gdansk University of Technology, Poland
Vasko P.F. Dr.Sc. (Eng.), Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Журнал "Технічна електродинаміка" включено до Переліку наукових фахових видань України категорія «А», представлений у загальнодержавній реферативній базі даних "УКРАЇНІКА НАУКОВА" та у міжнародних наукометричних базах даних SCOPUS, COMPENDEX, EBSCO, PROQUEST, CROSSREF, INDEX COPERNICUS, DOAJ.

Адреса редакції:

03057, м. Київ, проспект Берестейський, 56,
Інститут електродинаміки НАН України.

Тел. (044) 366 26 57. Email: ted@ied.org.ua <https://techned.org.ua>

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05>

ЗМІСТ

Теоретична електротехніка та електрофізика

ЩЕРБА А.А., ПОЛОЛЬЦЕВ О.Д., КУЧЕРЯВА І.М. Електричне поле напівпровідного екрана силового кабелю з полімерною ізоляцією з урахуванням структурних неоднорідностей.....3

Перетворення параметрів електричної енергії

АРТЕМЕНКО М.Ю., КУТАФІН Ю.В., ЧОПИК В.В., МИХАЛЬСЬКИЙ В.М., ШАПОВАЛ І.А., ПОЛІЩУК С.Й. Вимірювання та компенсація неактивних потужностей трифазних систем електроживлення засобами паралельної активної фільтрації12

ГУЦАЛЮК В.Я., ЗУБКОВ І.С. Цифрова система керування резонансного інвертора напруги з самозбудженням.....18

Електромеханічне перетворення енергії

ПОПОВИЧ О.М., ГОЛОВАНЬ І.В. Моделювання асинхронних машин у складі електромеханічних систем з урахуванням втрат у сталі ротора24

КРИЩУК Р.С. Застосування фазних струмових контурів для моделювання гармонійного магнітного поля магнітоелектричного генератора.....30

ІСАЄВ Є.В., ПЕТУХОВ І.С. Обертальний момент безпазового моментного двигуна з постійними магнітами та масивним магнітопроводом статора.....36

ГРЕБЕНІКОВ В.В., ПАВЛОВ В.Б., ГАМАЛІЯ Р.В., ПОПКОВ В.С., БОНДАРЕНКО С.Г. Порівняльний аналіз характеристик електродвигунів з постійними магнітами для електромобілів ...42

Електроенергетичні системи та установки

КИРИЛЕНКО О.В., СТОГНІЙ Б.С., ДЕНИСЮК С.П., СОПЕЛЬ М.Ф. Smart-моніторинг електроенергетичних систем.....48

ЖАРКИН А.Ф., ПОПОВ В.А., ЯРМОЛЮК О.С., ПАЛАЧОВ С.О., НАТАЛИЧ В.О. Багаторівневі гнучкі системи розподілу електричної енергії63

БЛІНОВ І.В., ПАРУС Є.В., ШИМАНЮК П.В., ВОРУШИЛО А.О. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії69

СТЕЛЮК А.О., ЛУК'ЯНЕНКО Л.М. Аналіз налаштування пристроїв автоматичного частотного розвантаження з урахуванням європейських вимог79

Електротехнологічні комплекси та системи

АЗЮКОВСЬКИЙ О.О., ПАПАЙКА Ю.А., БАБЕНКО М.В. Урахування змінної складової потенціалу підземних сталевих трубопроводів під час розробки електротехнічних комплексів для їхнього захисту від електрохімічної корозії85

Інформаційно-вимірювальні системи в електроенергетиці

ГИЖКО Ю.І., ЗВАРИЧ В.М. Особливості побудови компонентів багаторівневих експертних систем вібродіагностики вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням використання бездротових блоків зв'язку94

CONTENTS

Theoretical electrical engineering and electrophysics

SHCHERBA A.A., PODOLTSEV O.D., KUCHERIAVA I.M. Electric field of semiconducting screen in power cable with polymer insulation taking into account structural inhomogeneities3

Conversion of electric energy parameters

ARTEMENKO M.Yu., KUTAFIN Yu.V., CHOPYK V.V., MIKHALSKY V.M., SHAPOVAL I.A., POLISHCHUK S.Y. Measurement and compensation of three-phase power supply system inactive powers by shunt active filtering 12

HUTSALIUK V.Ya., ZUBKOV I.S. Self-oscillating digital control system of resonance voltage inverter 18

Electromechanical energy conversion

POPOVYCH O.M., GOLOVAN I.V. Modeling of induction motors in electromechanical systems considering stator iron losses24

KRYSHCHUK R.S. Application of phase current loops for modeling the harmonic magnetic field of a magnetolectric generator30

ISAYEV Ye.V., PETUKHOV I.S. Torque of a permanent magnet slotless torque motor with solid stator back iron36

GREBENIKOV V.V., PAVLOV V.B., GAMALIA R.V., POPKOV V.S., BONDARENKO S.G. Comparative analysis of the characteristics of permanent magnet motors for electric vehicles42

Electric power systems and installations

KYRYLENKO O.V., B. STOGNII B.S., DENYSIUK S.P., SOPEL M.F. Smart-monitoring of electrical power systems48

ZHARKIN A.F., POPOV V.A., YARMOLIUK O.S., PALACHOV S.O., NATALYCH V.O. Multi-level flexible electricity distribution systems63

BLINOV I.V., PARUS Ye.V., SHYMANIUK P.V., VORUSHYLO A.O. Optimization model of microgrid functioning with solar power plant and energy storage system.....69

STELIUK A.O., LUKIANENKO L.M. Configuration analysis of under-frequency load shedding relays considering european requirements79

Electrotechnological complexes and systems

AZIUKOVSKYI O.O., PAPAIIKA Yu.A., BABENKO M.V. Consideration of the variable storage potential of underground steel pipelines in the development of electrical complexes for their protection against electrochemical corrosion85

Information Measuring Systems in Electric Power Engineering

GYZHKO Yu.I., ZVARITCH V.M. Features of construction of elements of multilevel expert systems for diagnostics of electrical equipment units, taking into account the use of wireless system elements.....94

Науковий редактор К.О. ЛИПКІВСЬКИЙ
Редактори І.О. БРАГІНЕЦЬ

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ НАПІВПРОВІДНОГО ЕКРАНА СИЛОВОГО КАБЕЛЮ З ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ

А.А.Щерба¹, академік НАН України, О.Д. Подольцев², докт.техн.наук,
І.М. Кучерява, докт.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: podol@ied.org.ua.

Методом скінченно-елементного аналізу досліджено неоднорідний розподіл електричного поля в зшитополіетиленовій ізоляції силового кабелю на напругу 330 кВ із багатопровідниковою жилою та в залежності від електропровідності та товщини напівпровідного екрана, а також за різної частоти прикладеної напруги (від 50 до 10⁴ Гц). Показано, що у разі врахування періодичної структури поверхні струмопровідної жили, задля отримання однорідного електричного поля в основній ізоляції кабелю на границі з внутрішнім напівпровідним екраном, електропровідність матеріалу цього екрана повинна перевищувати 10⁻⁶ См/м, а його товщина має бути не менше 1,5 мм. Розглянуто вплив різних видів поверхневих та об'ємних дефектів у напівпровідному екрані на неоднорідність розподілу електричного поля в ізоляції кабелю. Показано, що наявність дефектів у напівпровідному екрані може призводити до значного підвищення електричного поля в локальних зонах їхнього розташування (до 5 разів по відношенню до поля у разі відсутності дефектів), а отже сприяти утворенню та розвитку тріщинних структур в ізоляції. Отримані результати пояснюють причини мікро- та макрорівневої деградації ізоляції силових кабелів і обґрунтовують необхідність забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідного екрана і струмопровідної жили у технологічному процесі виготовлення силових кабелів зі зшитополіетиленовою ізоляцією. Бібл. 23, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: зшитополіетиленова (ЗПЕ) ізоляція, напівпровідний екран, електрофізичні властивості, поверхневі та об'ємні дефекти, неоднорідне електричне поле, скінченно-елементний аналіз.

В енергосистемі України впродовж останніх десятиліть в розподільні мережі та мережі передачі електроенергії впроваджуються силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) [1, 2]. Передумовою для цього поряд з їхніми високими експлуатаційними показниками, надійністю та безпекою стало налагоджене вітчизняне виробництво таких кабелів різних класів напруги (до 330 кВ), зокрема на харківському заводі "Південкабель" [3–5].

Монолітна полімерна ізоляція силових кабелів виготовляється методом екструзії та складається з трьох шарів: основної ізоляції та внутрішнього й зовнішнього напівпровідних екранів (рис. 1, а). Екрани призначаються для вирівнювання розподілу електричного поля на поверхні основної ізоляції. Це особливо важливо, враховуючи складну структуру поверхні багато провідникової жили, що показано на рис. 1, а. Наявність таких екранів може призводити до додаткових діелектричних втрат, що залежать від електрофізичних властивостей (діелектричної проникності та провідності) поліетиленового матеріалу екранів [6, 8] та змінюються з частотою [7].

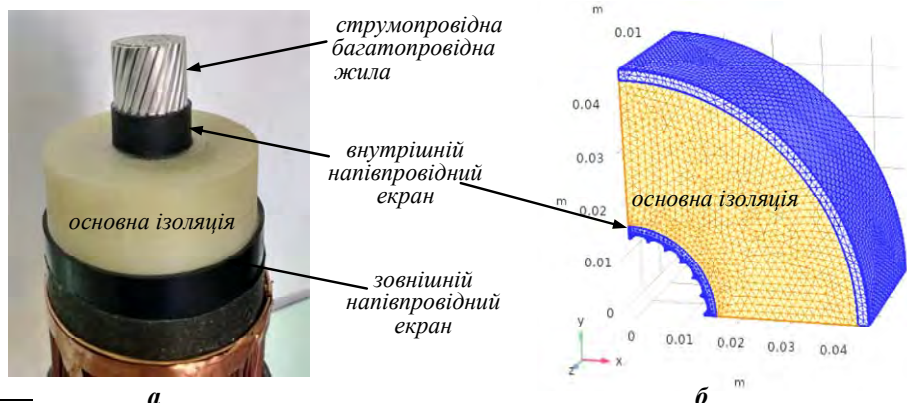


Рис. 1

© Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., 2024

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; ² <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Поліетиленовий матеріал напівпровідних екранів є композитним. Введення в полімерний матеріал технічного вуглецю (сажі) дає змогу змінювати електропровідність екранів [8–10]. Наприклад, у разі збільшення об'ємної частки сажі в два рази електропровідність зростає теж у два рази [8]. У свою чергу, електрофізичні характеристики напівпровідних покриттів (діелектрична проникність та питома електропровідність) впливають на розподіл електричного поля, втрати в кабелі та його пропускну спроможність [8, 11]. У разі наявності дефектів в об'ємі екранів ізоляції, збільшення в їх локальних областях напруженості електричного поля впливає не тільки на утворення триїнгових структур і виникнення часткових розрядів, але й призводить до механічних розривів матеріалу [12]. Загалом основним механізмом старіння ЗПЕ ізоляції силових кабелів є поширення в присутності води (вологи) та під впливом сильного електричного поля водних та електричних триїнгів у місцях розташування дефектів та забруднень [1, 13]. Розвиток триїнгів призводить до погіршення властивостей ізоляції і, перш за все, до зниження її електричної міцності, а згодом створює умови для пробоя ізоляції, що становить небезпеку виходу кабелю з ладу [13].

Напівпровідні екрани силових кабелів в залежності від вмісту технічного вуглецю можуть характеризуватися різними діелектричними властивостями в широкому діапазоні змінення частоти (питомою електропровідністю від 10^{-1} до 10^{-14} См/м [9]), при цьому діелектрична проникність дорівнює 2,3–2,5 і слабо залежить від частоти [7].

У роботі [14] показано, що діелектричні втрати в напівпровідних шарах ізоляції мають переважне значення лише на частоті більше 10 МГц. У даній роботі діелектричні втрати не розглядаються, а досліджується вплив електропровідності екранів на розподіл електричного поля в ізоляції на частоті нижче вказаної.

Відмітимо, що середній термін служби та надійність кабелів залежать від електропровідності та теплових властивостей складових елементів. Згідно з експериментальними даними [15] питомий об'ємний опір матеріалу напівпровідних екранів зменшується із збільшенням вмісту сажі. Крім того, теплопровідність збільшується відповідно до зростання вмісту сажі і температури нагріву, а електропровідність σ екранів зменшується із зростанням температури T . На основі вимірювань [15] у таблиці наведено залежність $\sigma(T)$ для композиційного матеріалу СВ/HDPE з 20% часткою сажі.

Як підтверджують дані таблиці, у режимі короткотривалого перегріву, наприклад, у разі короткого замикання, внаслідок зростання температури електропровідність напів-

$T, ^\circ\text{C}$	40	60	80	100	120	140	145	150
$\sigma, \text{См/м}$	3,17	3,17	3,17	2,52	0,63	10^{-4}	10^{-6}	10^{-7}

провідного екрана може суттєво зменшуватися, що може привести до послаблення його екрануючих властивостей, а з часом – до прискорення старіння ізоляції. Для напівпровідного екрана важливо підбирати матеріали за умови, що за критичної температури (до прикладу, 140°C) його електропровідність має бути не менше певного достатньо низького значення.

У роботі [16] підкреслюється, що напівпровідний екрануючий шар відіграє важливу роль для досягнення однорідності електричного поля в ізоляції кабелю високої напруги, а електричні та теплові властивості шару безпосередньо впливають на загальні характеристики всієї ізоляції. Експериментальні дані [16] також свідчать, що питомий опір напівпровідного композиту поступово зростає зі збільшенням температури і зменшується зі збільшенням вмісту сажі. Крім того, стійкість до пробоя композиційної структури напівпровідного екрана значно зменшується з підвищенням температури (для дослідженого в [16] матеріалу: від 307 кВ/мм за 25°C до 203 кВ/мм за 90°C).

Надійність кабелів у процесі тривалої експлуатації (до 40 років) багато в чому пов'язана не тільки з властивостями матеріалів, а й з бездефектністю елементів, станом поліетиленової ізоляції та інтенсивністю її старіння [1, 13, 17]. Дефекти поліетиленової ізоляції на мікро- та макрорівнях призводять до неоднорідності і локальної концентрації електричного поля, зниження електричної міцності ізоляції. У процесі експлуатації кабелів дефекти здатні поширюватися, змінювати властивості та структуру ізоляції [13, 17].

Структура напівпровідного екрана не є досконалою, однорідною і гладкою як на макро-, так і на мікрорівні [16, 18–20]. Вона може мати дефекти різної форми та розмірів. Такі дефекти можна умовно поділити на:

- об’ємні дефекти у вигляді, наприклад, каналів або порожнин у напівпровідних екранах, заповнених водою, з триїнгом в основній ізоляції (рис. 2, а [18]), тріщин, що йдуть від поверхні жили в основну ізоляцію (рис. 2, б [19]);
- поверхневі дефекти напівпровідного екрана у вигляді викривлення, різних нерівностей, спрямованих в ізоляцію (рис. 2, в [20]) або виступів, нерівностей струмопровідної жили (рис. 2, г).

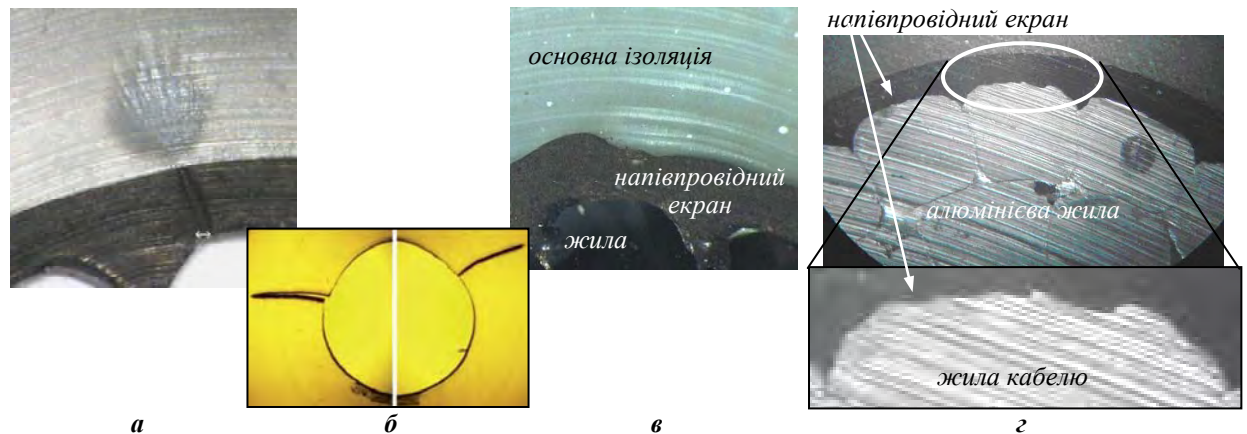


Рис. 2

Дослідження розподілу електричного поля та ступеня його неоднорідності для характерних дефектів в напівпровідному екрані та визначення кількісних залежностей збільшення локальних значень поля за різних електрофізичних властивостях ізоляційних шарів становить важливу практичну задачу і, перш за все, з точки зору вдосконалення технології отримання багатошарової ізоляції з підвищеним терміном експлуатації.

У зв’язку з вище обґрунтованими доцільністю вивчення електричного поля в напівпровідних екранах і основної ізоляції силових кабелів та практичною стороною задачі **метою роботи** є обґрунтування необхідності забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідних екранів і струмопровідної жили в технологічному процесі виготовлення кабелів зі зшито-поліетиленовою ізоляцією.

У роботі проводиться кількісне дослідження та виявлення особливостей розподілу електричного поля у внутрішньому напівпровідному екрані силового кабелю на напругу 330 кВ за різних електричних властивостях шару, його товщині та за наявності найбільш характерних дефектів. Для дослідження вибрані такі дефекти напівпровідного екрана: наскрізний канал, заповнений водою, із триїнгом в основній ізоляції [18] (рис. 2, а); тріщина в ізоляції від поверхності жили [19] (рис. 2, б); викривлення поверхні екрана на границі з основною ізоляцією [20] (рис. 2, в); нерівність поверхні напівпровідного екрана біля жили кабелю (рис. 2, г).

У разі, коли побудова експериментальної моделі та проведення натурних експериментів є ускладненими та затратними, перевага віддається обчислювальним експериментам. Саме математичне і комп’ютерне моделювання, що надає можливості вивчення найбільш широкого діапазону змінення параметрів об’єкту, вибрано методом дослідження в роботі.

Дослідження електричних процесів в ЗПЕ ізоляції проводиться на основі скінченно-елементного розрахунку та аналізу тривимірного електричного поля в пакеті програм *Comsol* [21], а також з використанням загальних положень і результатів попередніх робіт [1, 8, 10, 22]. Результати роботи пояснюються теоретично та узгоджуються з кількісними даними, представленими в роботах [1, 8, 18, 20, 22, 23]. Достовірність отриманих результатів полягає в тому, що наукові положення і висновки ґрунтуються на перевірених математичній моделі та численних комп’ютерних розрахунках у програмі *Comsol* для конкретних геометричних параметрів та електричних характеристик ЗПЕ ізоляції досліджуваного кабелю за ретельного підбору в комп’ютерній моделі обчислювальної точності та кінцево-елементного поділення розрахункової області.

Далі наведені результати розрахунків електричного поля в ізоляції кабелю, коли враховується періодична структура поверхні струмопровідної жили: 1) за відсутності дефектів в напівпровідному екрані; 2) за наявності таких дефектів.

Неоднорідне електричне поле під час врахування періодичної структури поверхні жили.

Модель для дослідження. У роботі досліджується електричне поле в ізоляції силового кабелю АПВЄВнгд 1х630/185 на напругу 330 кВ, фотографію якого наведено на рис. 1, а. Поставлена задача передбачає розрахунок електричного поля в об'ємі кабелю в декартовій системі координат $Oxyz$. Розглядається складна структура поверхні струмопровідної жили – періодична структура з елементом, зображеним на рис. 1, б, та вибираються реальні розміри всіх складових кабелю.

Тривимірний розрахунковий об'єкт (рис. 1, б) обрано на основі підходів багатомасштабного моделювання [22]. Область являє собою елементарний об'єм структури так, що в цілому картина поля в ізоляції кабелю відтворюється шляхом періодичного повторення картини поля в такому об'ємі за кутовою координатою.

Електричний потенціал, прикладений до жили кабелю та змінюваний за гармонійним законом, є джерелом потенціальної складової змінного електричного поля (квазіелектростатичного поля) в поліетиленовій ізоляції кабелю. З урахуванням цього на поверхні жили задається електричний потенціал $\phi = U$ ($U = 330 \text{ кВ}/\sqrt{3}$), а на граничній поверхні зовнішнього напівпровідного екрана – $\phi = 0$. Вплив об'ємного електричного заряду, що інjektується з поверхні електродів в ізоляцію, не розглядається.

Електричний потенціал ϕ в розрахунковому об'ємі (рис. 1, б) визначається з диференціального рівняння, записаного в частотній області

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{J}}_{tot} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_o\epsilon_r)\nabla\phi = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } \dot{\mathbf{J}}_{tot} = (\sigma + j\omega\epsilon_o\epsilon_r)\dot{\mathbf{E}}, \quad \dot{\mathbf{E}} = -\nabla\phi.$$

У цих виразах $\dot{\mathbf{J}}_{tot}$ – густина повного електричного струму (струму провідності та струму зміщення), ϵ_o та ϵ_r – відповідно, абсолютна діелектрична проникність вакууму та відносна діелектрична проникність середовища (різних шарів ізоляції); σ – електропровідність середовища; $\omega = 3,14 \text{ рад/с}$ – кругова частота (встановлена частота $f = 50 \text{ Гц}$). Крапкою зверху позначені комплексні величини.

Граничні умови доповнюються наступним чином: на бокових зовнішніх поверхнях задається умова електричної ізоляції: $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}}_{tot} = 0$ (\mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі одиничної довжини), на внутрішніх поверхнях – умова неперервності $\mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{J}}_{tot,1} - \dot{\mathbf{J}}_{tot,2}) = 0$.

Після розрахунку потенціалу ϕ напруженість електричного поля визначається як $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\phi$.

Для кількісної оцінки ступеня неоднорідності електричного поля в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном використовується коефіцієнт неоднорідності

$$k = \frac{|\dot{\mathbf{E}}|_{\max} - |\dot{\mathbf{E}}|_{\min}}{0,5(|\dot{\mathbf{E}}|_{\max} + |\dot{\mathbf{E}}|_{\min})}. \quad (2)$$

Результати моделювання електричного поля. Початкові дані для розрахунків: діаметр жили – 30 мм (кількість провідників жили за довжиною кола – 24); діаметр основної ізоляції – 88 мм, товщина зовнішнього напівпровідного екрана – 4 мм; товщина внутрішнього екрана $\Delta = 1,5 \text{ мм}$; діелектрична проникність усіх ізоляційних шарів $\epsilon_r = 2,4$; електропровідність основної ізоляції / зовнішнього / внутрішнього екранів відповідно $\sigma = 10^{-14}/10^{-6}/10^{-10} \text{ См/м}$. Водне середовище в розглянутих дефектах (тріщині, каналі) характеризується $\epsilon_r = 5$, $\sigma = 0,05 \text{ См/м}$.

Окремо під час дослідження впливу заданих характеристик внутрішнього напівпровідного екрана на змінення електричного поля варіюються частота f та Δ і σ .

Електричне поле за різних характеристиках внутрішнього екрана. Змінення електричного поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ на границі між основною ізоляцією і екраном за його електропровідності $\sigma = 10^{-10} \text{ См/м}$ та різній товщині Δ показано на рис. 3, а. Характер змінення поля (з періодичними піковими значеннями) відповідає заданій геометрії жили кабелю.

Результати розрахунку коефіцієнта неоднорідності поля за виразом (2) в залежності від електропровідності екрана σ та за різних значеннях його товщини Δ наведено на рис. 3, б. Як видно, зі збільшенням товщини екрана його екрануючі властивості покращуються – поле стає більш однорідним, про що свідчить зменшення значення коефіцієнта k . Існує критичне значення

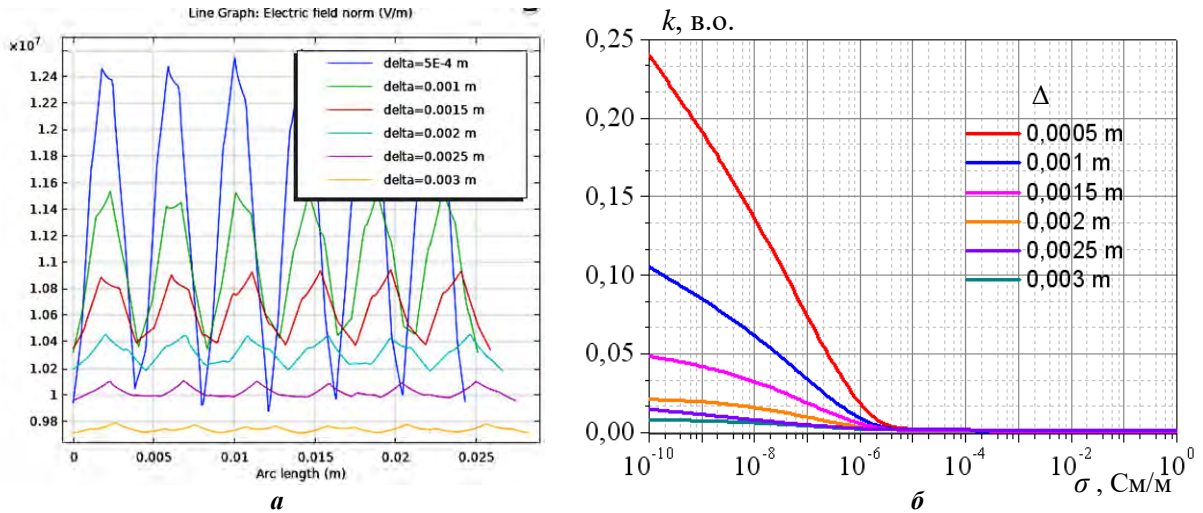


Рис. 3

електропровідності екрана $\sigma^* \approx 10^{-6}$ См/м, у разі перевищення якого коефіцієнт неоднорідності $k \rightarrow 0$ для всіх розглянутих значень Δ . За результатами проведених розрахунків у діапазоні зміння $\sigma = 10^{-6} - 10^0$ См/м коефіцієнт неоднорідності $k \leq 0,002$ для $\Delta = 0,5 \div 3$ мм.

На рис. 4 наведено змінення електричного поля $|\dot{E}|$ в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном товщиною $\Delta = 1,5$ мм за різних значеннях його електропровідності σ , за частоти $f = 50$ Гц = const (рис. 4, а) та різних значеннях частоти напруги ($f = 50, 10^3$,

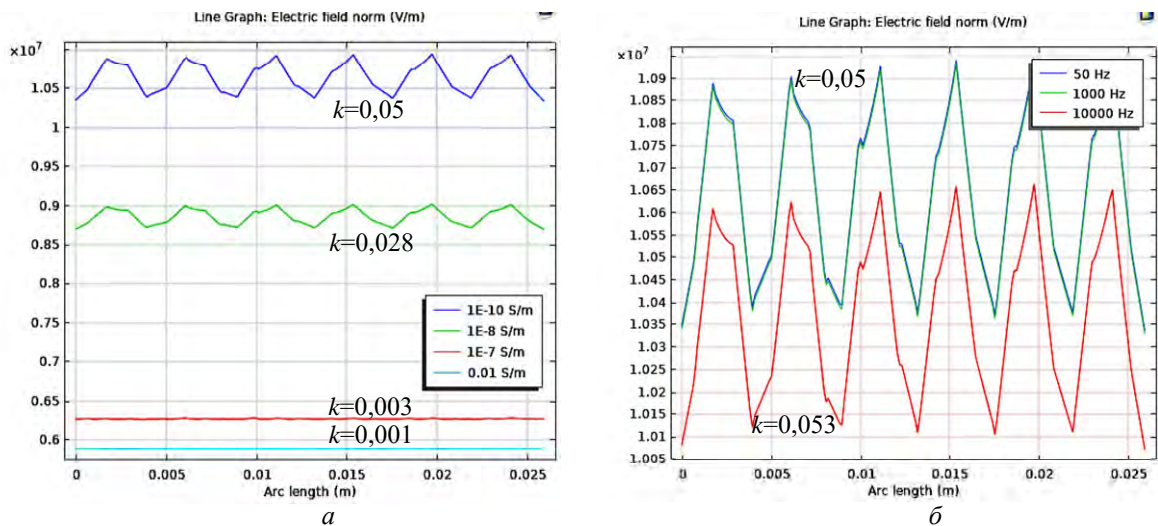


Рис. 4

10^4 Гц) за $\sigma = 10^{-10}$ См/м = const (рис. 4, б). Наведено значення коефіцієнта неоднорідності k для відповідних кривих. Комп'ютерні результати показують, що із зростанням електропровідності екрана σ поле стає більш однорідним (значення k для електричного поля зменшуються). Разом з цим у такому випадку збільшуються втрати в напівпровідному екрані [8]. Дані рис. 4, б також ілюструють, що за вибраних параметрах матеріалів активної зони кабелю частота слабо впливає на неоднорідність розподілу електричного поля в основній ізоляції.

Неоднорідне електричне поле за наявності локальних дефектів в напівпровідному екрані. У наведених далі результатах моделювання враховується як періодична структура поверхні струмопровідної жили кабелю (що досліджувалося у попередньому розділі статті), так і додатково наявність різних типів дефектів в області внутрішнього напівпровідного екрана. Відповідно до дефекту на рис. 2, а, рис. 5 представляє розподіл в ізоляції електричного поля $|\dot{E}|$ на віддаленні від каналу, наповненого водою, в екрані ($|\dot{E}|_{\max} = 14,2$ кВ/мм) (рис. 5, а) та в різних фрагментах площини, що включає цей канал (рис. 5, б). Поле у разі водного каналу підвищується до 72,9 кВ/мм,

тобто майже в 5,1 разів у порівнянні з максимальним полем у разі бездефектного екрана. Коefіцієнт

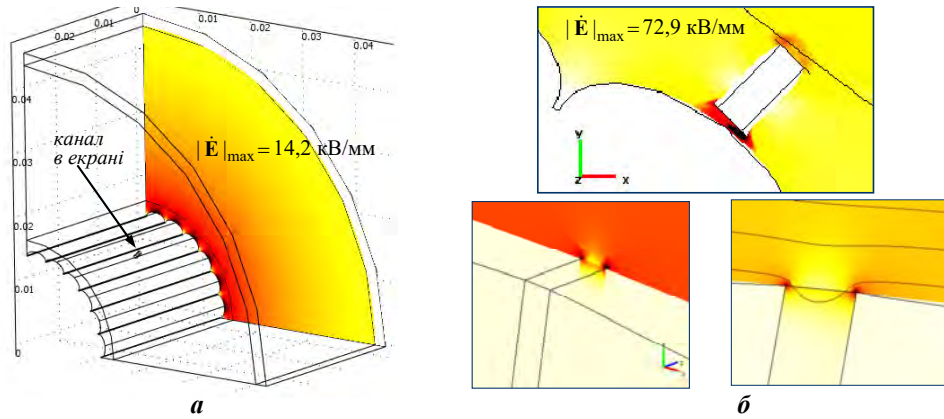


Рис. 5

неоднорідності поля $k \approx 1,95$.

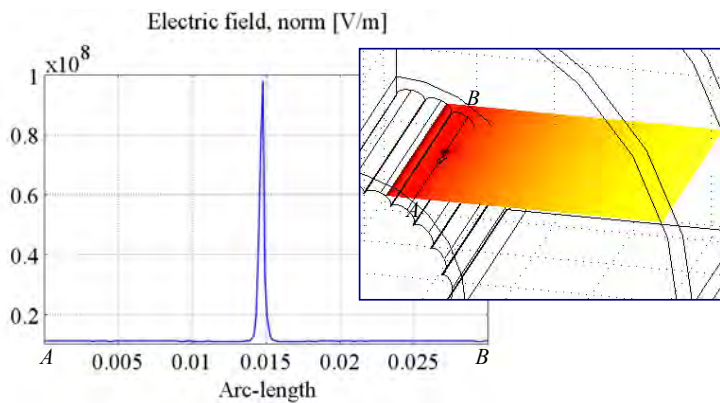


Рис. 6

Рис. 6 відображає змінення поля $|\dot{E}|$ вздовж лінії AB на площині, показаній праворуч, яка проходить безпосередньо над каналом в екрані, та різке зростання $|\dot{E}|$ в зоні, що відповідає цьому дефекту. Рис. 7 подає ліворуч розподіл $|\dot{E}|$ біля тріщини відповідно до рис. 2, б та з нерівністю напівпровідного екрана відповідно до рис. 2, в (картина праворуч). Максимальне поле за наявності тріщини збільшується майже в 4,1 рази, а у випадку викривлення поверхні екрана – в 3,2 разів.

Результати дослідження поля для нерівності жили кабелю відповідно до рис. 2, г представлено на рис. 8, а саме розподіл $|\dot{E}|$ в площині, що включає нерівності жили, (рис. 8, а) та змінення поля $|\dot{E}|$ вздовж границі напівпро-

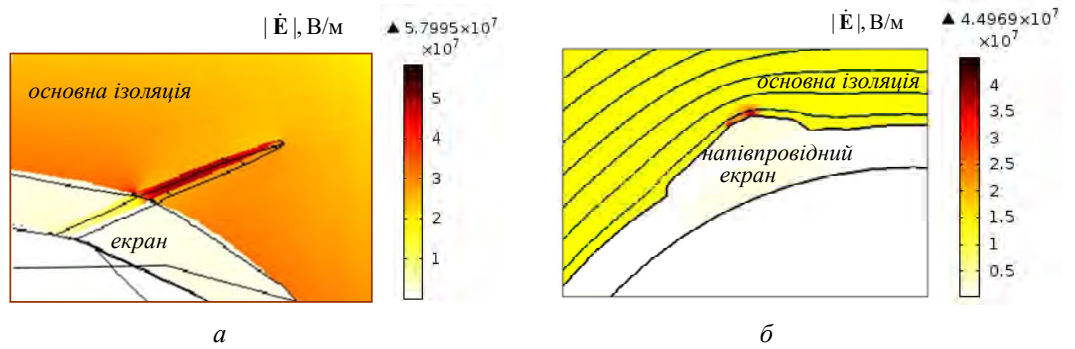


Рис. 7

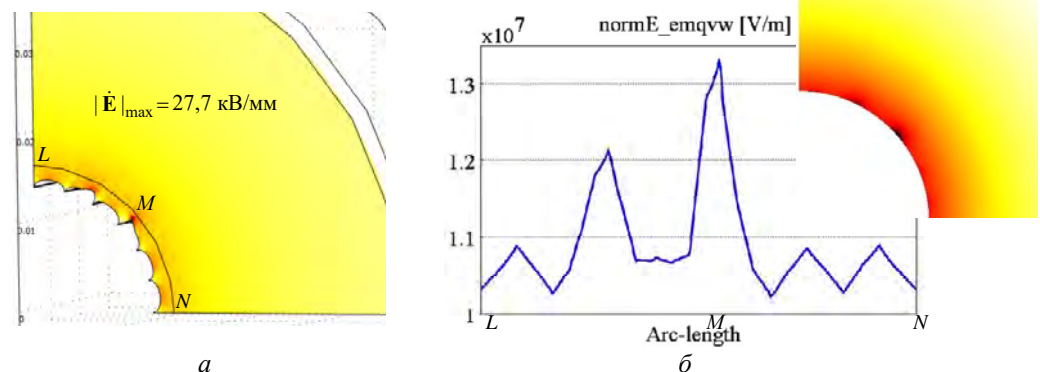


Рис. 8

відного екрана LMN – рис. 8, б, де на вставці праворуч показано окремо розподіл поля в основній ізоляції над екраном з нерівностями. Видно, що електричне поле навіть на віддаленні від дефектів поверхні жили реагує стрибками, збільшуючися до 1,23 рази біля границі з основною ізоляцією. Коефіцієнт неоднорідності поля для випадку нерівності жили $k \approx 1,86$.

Слід зазначити, що поле поблизу поверхні, на якій змінюються електрофізичні параметри, залежить від кривизни поверхні. До того ж, локальні значення поля в місцях розташування розглянутих гострих дефектів в напівпровідному екрані теоретично дуже великі і швидко змінюються з віддаленням від них. Представлені результати відносно неоднорідності електричного поля відповідають випадку однакового вибору скінченно-елементного розбиття розрахункової області за тривимірною комп'ютерною моделювання (рис. 1, б).

Висновки. За допомогою комп'ютерного скінченно-елементного аналізу проведено дослідження електричного поля в ізоляції, зокрема в її внутрішньому напівпровідному екрані, для силового кабелю на напругу 330 кВ з урахуванням електрофізичних характеристик екрана та наявності в ньому характерних поверхневих та об'ємних дефектів.

Виконано кількісний аналіз залежності екрануючого ефекту від електропровідності внутрішнього напівпровідного екрана кабелю та його товщини. Показано, що для отримання однорідного електричного поля в основній ізоляції на границі з внутрішнім напівпровідним екраном електропровідність його матеріалу повинна перевищувати 10^{-6} См/м, а його товщина має бути не менше 1,5 мм.

За результатами проведених розрахунків показано, що із зростанням електропровідності екрана поле стає більш однорідним – значення розглянутого коефіцієнта неоднорідності електричного поля зменшується. При цьому збільшуються втрати в екрані. Виявлено, що за вибраних параметрах активних матеріалів силового кабелю частота слабко впливає на неоднорідність розподілу електричного поля в основній ізоляції.

Наявність поверхневих та об'ємних дефектів у напівпровідному екрані може призводити до значного підвищення електричного поля в локальних зонах їхнього знаходження (до 5 разів по відношенню до поля без дефектів в екрані), а отже призводити до утворення і розвитку триїнгових структур в ізоляції. Отримані результати пояснюють причини мікро- та макрорівневої деградації ізоляції силових кабелів та обґрунтовують необхідність забезпечення однорідної структури та гладкої поверхні напівпровідних екранів і струмопровідної жили в технологічному процесі виготовлення кабелів зі шито-поліетиленовою ізоляцією.

Дослідження виконані за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue. CRC Press, 2011, 460 p.
3. ПАО «Южкабель». URL: <https://www.yuzhcable.info/> (дата звернення 22.04.2024).
4. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. Харьков: Майдан, 2017. 64 с.
5. Золотарев В.М. Завод "Южкабель": веги пути (75 лет заводу "Южкабель"). *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 5. С. 12–16.
6. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, 18-21 October 2009. Pp. 246–249. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostiukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No 3. Pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со шитой изоляцией. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47.
9. Rothon R. Fillers for Polymer Applications. Springer International Publishing, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.

10. Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable. Proceedings of International Symposium on *Electrical Insulating Materials* (ISEIM'2005), 2005, 5–9 June 2005. Vol. 3. Pp. 616–619.
11. Кучерявая И.Н. Применение метода многомасштабного моделирования для исследования электрического поля в изоляции силового кабеля на 330 кВ в аварийном режиме. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 13–18.
12. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. No 6. Pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
13. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
14. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: Sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 1. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
15. Lee K.Y., Nam J.C., Park Dong-Ha, Park Dae-Hee. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154KV power cable. IEEE Proceedings of 2005 International Symposium on *Electrical Insulating Materials*, (ISEIM 2005), Kitakyushu, Japan, June 5–9, 2005. Vol. 3. Pp. 616–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2005.193444>.
16. Wei Y., Liu M., Li X., Li G., Li N., Hao C., Lei Q. Effect of temperature on electric-thermal properties of semiconductive shielding layer and insulation layer for high-voltage cable. *High Voltage*. 2021. Vol. 6. Pp. 805–812. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve2.12089>.
17. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29. No 5. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
18. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 11. Pp. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784563>.
19. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей. *Кабель-news*. 2008. № 10. С. 58–60.
20. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. *JiCable 2007*. URL: http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf (дата звернення 22.04.2024).
21. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення 22.04.2024).
22. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. 256 с.
23. Mashikian M.S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 4. Pp. 24–32.

ELECTRIC FIELD OF SEMICONDUCTING SCREEN IN POWER CABLE WITH POLYMER INSULATION TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL INHOMOGENEITIES

A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: podol@ied.org.ua.

The non-homogeneous electric field distributions in the cross-linked polyethylene insulation of 330 kV power cable with multi-conductor core depending on the electrical conductivity and thickness of the semiconducting screen as well as at different frequency of applied voltage (from 50 to 10^4 Hz) are studied by finite-element analysis. As shown, taking into account the periodic structure of core surface, the electrical conductivity of the material of internal semiconducting screen should exceed 10^{-6} S/m and its thickness should be at least 1.5 mm in order to obtain the uniform electric field in the basic insulation of the cable at the boundary with the screen. The paper also considers the effect of various types of the surface and volumetric defects in the semiconducting screen on the electric field inhomogeneity in cable insulation. It is shown that the defects in the screen can lead to a significant increase of the electric field in the local zones of their location (up to 5 times as compared to the field without defects) and therefore contribute to the formation and development of treeing structures in the insulation. The revealed results explain the reasons for the micro- and macro-level degradation of power cable insulation and confirm the need to ensure the uniform structure, smooth surface of both semiconducting screen and core during the technological process of manufacturing the power cables with cross-linked polyethylene insulation. References 23, figures 8, table 1.

Key words: cross-linked polyethylene insulation, semiconducting screen, electrophysical properties, surface and volumetric defects, non-uniform electric field, finite-element analysis.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2013. 550 p. (Rus)
2. Electrical power cable engineering. Third Edition. Ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
3. Private Joint-Stock Company «Yuzhcable Works». URL: <https://www.yuzhcable.info/lang/en> (accessed at 22.04.2024). (Rus)
4. Guiding technical material on the construction, testing and operation of modern extra-high-voltage power cable lines. Kharkiv: Maidan, 2017. 64 p. (Rus)
5. Zolotaryov V.M. Plant «Yuzhcable works»: milestones of the road (75 years to Plant «Yuzhcable works»). *Elektrotehnika I Elektromekhanika*, 2018, No. 5, p. 12–16. (Rus)
6. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, 18-21 October 2009. Pp. 246–249. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostiukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No 3. Pp. 47–51. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moscvitin E.S. Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2010. No 3. Pp. 44–47. (Rus)
9. Rotheron R. Fillers for Polymer Applications. Springer International Publishing, 2017. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.
10. Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable. Proceedings of International Symposium on *Electrical Insulating Materials (ISEIM'2005)*, 2005, 5–9 June 2005. Vol. 3. Pp. 616–619.
11. Kucheriava I.M. Application of multiscale modeling for study of electric field in insulation of 330 kV power cable at emergency operation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 4. Pp. 13–18. (Rus)
12. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. No 6. Pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
13. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22.
14. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: Sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 1. Pp. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
15. Lee K.Y., Nam J.C., Park Dong-Ha, Park Dae-Hee. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154KV power cable. IEEE Proceedings of 2005 International Symposium on *Electrical Insulating Materials (ISEIM 2005)*, Kitakyushu, Japan, June 5–9, 2005. Vol. 3. Pp. 616–619. DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2005.193444>.
16. Wei Y., Liu M., Li X., Li G., Li N., Hao C., Lei Q. Effect of temperature on electric-thermal properties of semiconductive shielding layer and insulation layer for high-voltage cable. *High Voltage*. 2021. Vol. 6. Pp. 805–812. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve2.12089>.
17. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2013. Vol. 29. No 5. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6585854>
18. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16. No 11. Pp. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4784563>.
19. Kovrigin L.A. Technological and operating defects in cable insulation. *Kabel-news*. 2008. No 10. Pp. 58–60. (Rus)
20. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. *JiCable 2007*. URL: http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf (available at 22.04.2024).
21. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (available at 22.04.2024).
22. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Multiscale modeling in electrical engineering. Kiyv: Insitut elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2011. 255 p. (Rus)
23. Mashikian M.S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2006. Vol. 22. No 4. Pp. 24–32.

Надійшла 08.05.2024
Остаточний варіант 17.06.2024

ВИМІРЮВАННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТРИФАЗНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗАСОБАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

М.Ю. Артеменко^{1*}, докт. техн. наук, **Ю.В. Кутафін**^{1**}, докт. філос., **В.В. Чопик**^{2***}, канд. техн. наук, **В.М. Михальський**^{2****}, докт. техн. наук, **І.А. Шаповал**^{2*****}, докт. техн. наук, **С.Й. Поліщук**^{2*****}, канд. техн. наук

¹ НТУ України «КПІ ім. І. Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

² Інститут електродинаміки НАН України, пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: mikhalsky@ied.org.ua.

В даній роботі отримала подальший розвиток теорія потужності трифазних систем електроживлення шляхом обґрунтування нових формул розрахунку потужності небалансу трифазних чотирипровідних систем електроживлення на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз, що можуть бути використані для формування компенсаційних сигналів в розподіленій активній фільтрації з централізованим керуванням. Запропоновано нову структурну схему керування автономним паралельним активним фільтром з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній системах електроживлення. Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність нових формул для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для мінімізації потужності втрат в лінії передачі. Бібл. 11, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: потужність небалансу, стратегія керування паралельним активним фільтром, мінімізація потужності втрат.

Вступ. Наявність неактивних потужностей в трифазних електромережах викликана як реактивним характером і нелінійністю навантаження, так і несиметрією завантаження окремих фаз [1]. Кількісна міра несиметрії навантаження стандарт [2] визначає потужність небалансу, але формули її визначення, наведені в [2, 3], містять лише квадрат цієї величини, що не дає змоги побудувати стратегії її компенсації засобами паралельної активної фільтрації. Окремі складові потужності небалансу трифазних систем визначені в частотній області через комплексні провідності, які обчислюються за відомими параметрами стаціонарного навантаження окремих фаз [4, 5], що не дає можливості застосування цієї теорії для фільтрації струмів нестационарного навантаження. Для потреб розподіленої активної фільтрації потужність небалансу доцільно представити максимальною кількістю окремих складових, струмові компоненти яких є взаємно ортогональними, що зумовлює окремі внески цих складових у потужність втрат та повну потужність [6–8]. **Метою даної роботи** є подальший розвиток теорії компенсації неактивних потужностей для динамічно змінюваного несиметричного навантаження в системах централізованої та децентралізованої розподіленої генерації відповідно до класифікації [9].

Вимірювання та компенсація неактивних потужностей трифазної чотирипровідної системи за централізованого керування розподіленою активною фільтрацією. Енергетичний процес в трифазній чотирипровідній мережі електроживлення за умов симетричного синусоїдного джерела та лінійного несиметричного навантаження повністю визначається трикоординатними векторами фазних напруг $u(t)$ та лінійних струмів $i(t)$, представленими в системі симетричних

© Артеменко М.Ю., Кутафін Ю.В., Чопик В.В., Михальський В.М., Шаповал І.А., Поліщук С.Й., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-9341-9238>; ** <https://orcid.org/0000-0002-8156-1277>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>; **** <https://orcid.org/0000-0002-8251-3111>;

***** <https://orcid.org/0000-0002-9107-5061>; ***** <https://orcid.org/0000-0002-6978-2747>

Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

координат частотної області [8]

$$\bar{\mathbf{u}} = \|\dot{U}_A \quad \dot{U}_B \quad \dot{U}_C\|^\wedge = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{u}(t) e^{-j\omega t} dt = U \bar{\mathbf{e}}_+; \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{i}} = \|\dot{I}_A \quad \dot{I}_B \quad \dot{I}_C\|^\wedge = \frac{\sqrt{2}}{T} \int_T \mathbf{i}(t) e^{-j\omega t} dt = \dot{I}_+ \bar{\mathbf{e}}_+ + \dot{I}_- \bar{\mathbf{e}}_- + \dot{I}_0 \bar{\mathbf{e}}_0 = [(P - jQ) \bar{\mathbf{e}}_+ + (D_R - jD_I) \bar{\mathbf{e}}_- + (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0] / U,$$

де $\bar{\mathbf{e}}_+ = \|1 \quad \tilde{a} \quad \dot{a}\|^\wedge / \sqrt{3}$; $\bar{\mathbf{e}}_- = \bar{\mathbf{e}}_+^* = \|1 \quad \dot{a} \quad \tilde{a}\|^\wedge / \sqrt{3}$; $\bar{\mathbf{e}}_0 = \|1 \quad 1 \quad 1\|^\wedge / \sqrt{3}$ – орти симетричних координат прямої, зворотної та нульової послідовності; $^\wedge, ^*$ – символи транспонування та комплексного спряження; U – діюче значення лінійної напруги; P, Q – активна та реактивна потужності; D_R, D_I, N_R, N_I – скалярні коефіцієнти розкладання потужності небалансу на ортогональні складові.

Вимірювання усіх складових повної потужності за формулами та схемами, запропонованими в [8], потребує 10 електронних ватметрів, що значно ускладнює систему керування активним фільтром. Знайдемо зв'язок зазначених потужностей з активними та реактивними потужностями окремих фаз.

Для лінійного несиметричного навантаження, що описується комплексними провідностями $\bar{Y}_A, \bar{Y}_B, \bar{Y}_C$, увімкненими до чотирипровідної системи живлення зіркою, комплексні потужності з (1) визначаються за формулою [8]

$$P - jQ = U^2 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) / 3; \quad D_R - jD_I = U^2 (\bar{Y}_A + \dot{a} \bar{Y}_B + \tilde{a} \bar{Y}_C) / 3; \quad N_R - jN_I = U^2 (\bar{Y}_A + \tilde{a} \bar{Y}_B + \dot{a} \bar{Y}_C) / 3.$$

Виразивши кожен комплексну провідність через активну та реактивну потужність відповідної фази та діюче значення фазної напруги $U_\phi = U / \sqrt{3}$

$$\bar{Y}_k = \dot{I}_k / \dot{U}_k = \dot{I}_k (\dot{U}_k)^* / \dot{U}_k (\dot{U}_k)^* = (P_k - jQ_k) / U_\phi^2 = 3(P_k - jQ_k) / U^2; \quad k = A, B, C,$$

матимемо матричний зв'язок зазначених потужностей

$$\begin{pmatrix} P - jQ \\ D_R - jD_I \\ N_R - jN_I \end{pmatrix} = \frac{U^2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{Y}_A \\ \bar{Y}_B \\ \bar{Y}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \tilde{a} \\ 1 & \tilde{a} & \dot{a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_A - jQ_A \\ P_B - jQ_B \\ P_C - jQ_C \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Виділивши дійсні та реальні частини лівої та правої частин (2), отримаємо систему рівнянь, що виражає потужності (1) через активні та реактивні потужності окремих фаз

$$\begin{aligned} X &= X_A + X_B + X_C; & X_2 &= \sqrt{3}(X_B - X_C) / 2; & X_3 &= X_A - X_B + X_C / 2, \\ D_R &= P_3 + Q_2; & D_I &= Q_3 - P_2; & N_R &= P_3 - Q_2; & N_I &= Q_3 + P_2 \end{aligned}, \quad (3)$$

де для скорочення запису використане позначення X , якщо відповідне рівняння справедливе як для активних потужностей, позначених P , так і реактивних потужностей, позначених Q . Отримані значення потужностей (3) можуть бути використані для формування сигналу компенсаційних струмів [8]

$$\mathbf{i}^c(t) = \begin{pmatrix} i_A^c \\ i_B^c \\ i_C^c \end{pmatrix} = \frac{Q}{U^2 \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{CA} \\ u_{AB} \end{pmatrix} + \frac{D_R}{U^2} \begin{pmatrix} u_A \\ u_C \\ u_B \end{pmatrix} + \frac{D_I}{U \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{AB} \\ u_{CA} \end{pmatrix} + \frac{N_R}{U^2} \begin{pmatrix} u_A \\ u_A \\ u_A \end{pmatrix} + \frac{N_I}{U^2 \sqrt{3}} \begin{pmatrix} u_{BC} \\ u_{BC} \\ u_{BC} \end{pmatrix} \quad (4)$$

у процесі розподіленої паралельної активної фільтрації струмів мережі, оскільки усі п'ять компонентів (4) є взаємоортогональними та можуть компенсуватися незалежно. Перевагою використання формул (3) є простий спосіб отримання неактивних потужностей шляхом перерахунку активних та реактивних потужностей окремих фаз, вимірювання яких є стандартною процедурою централізованого керування розподіленою генерацією [9].

Вимірювання та компенсація неактивних потужностей трифазних систем автономним паралельним активним фільтром. В трифазних трипровідних системах сума координат обох векторів з (1) дорівнює нулю як в часовій, так і в частотній областях, тому $N_R = N_I = 0$. Для швидкодіючого вимірювання інших неактивних потужностей та формування відповідних їм компенсаційних струмів запропонована структурна схема системи керування автономного паралельного активного фільтра (ПАФ) з розширеними функціональними можливостями [7], виділена пунктирною лінією на рис. 1. Вхідне перетворення трифазних координат струму та напруги

здійснюється відповідно до pq -теорії миттєвої потужності шляхом множення на скорочену матрицю

$$\text{Кларк } \mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}.$$

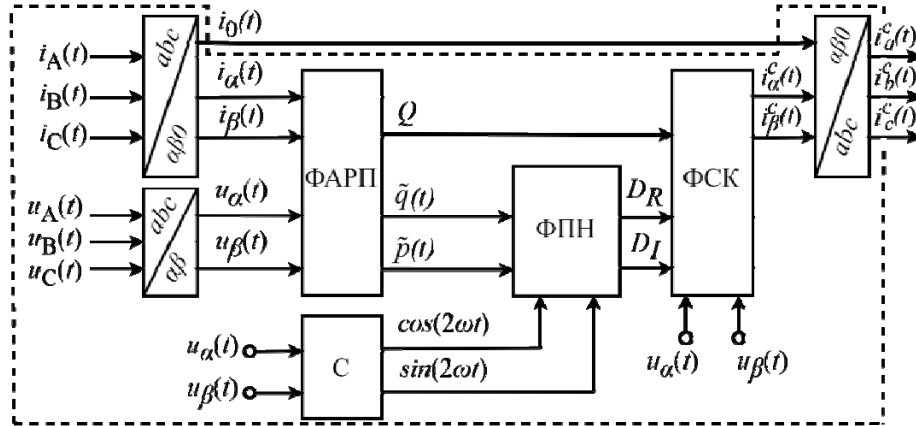


Рис. 1

Це веде до зниження розмірності відповідних векторів та набуття ними форм

$$\underline{\mathbf{u}} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \bar{\mathbf{u}} = \frac{U}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix}; \underline{\mathbf{i}} = \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \bar{\mathbf{i}} = \frac{1}{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \left(P \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} + Q \begin{bmatrix} \dot{U}_\beta \\ -\dot{U}_\alpha \end{bmatrix} + D_R \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ -\dot{U}_\beta \end{bmatrix} + D_I \begin{bmatrix} \dot{U}_\beta \\ \dot{U}_\alpha \end{bmatrix} \right). \quad (5)$$

Формувач складових активної та реактивної потужностей ФАРП виділяє реактивну потужність Q та пульсуючі складники відповідних потужностей

$$\tilde{p}(t) = p(t) - P = D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t); \quad \tilde{q}(t) = q(t) - Q = D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t). \quad (6)$$

В синхронізаторі C гармонічні функції подвійної частоти виражаються через миттєві значення перетворених напруг мережі $\underline{\mathbf{u}}^\wedge(t) = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix}$ за формулами

$$\cos(2\omega t) = \cos^2(\omega t) - \sin^2(\omega t) = (u_\alpha^2 - u_\beta^2) / U^2; \quad \sin(2\omega t) = 2 \sin(\omega t) \cos(\omega t) = 2u_\alpha u_\beta / U^2.$$

Це дає змогу формувачу потужностей небалансу ФПН неперервно виділяти складові цієї потужності

$$\begin{bmatrix} D_R \\ D_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) & \sin(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) & -\cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}(t) \\ \tilde{q}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} (u_\alpha^2 - u_\beta^2) \tilde{p} + 2u_\alpha u_\beta \tilde{q} \\ 2u_\alpha u_\beta \tilde{p} - (u_\alpha^2 - u_\beta^2) \tilde{q} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

На виході формувача струмів компенсації ФСК виділяється двокоординатний трикомпонентний сигнал

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta}^c(t) = \begin{bmatrix} i_\alpha^c \\ i_\beta^c \end{bmatrix} = \frac{Q}{U^2} \begin{bmatrix} u_\beta \\ -u_\alpha \end{bmatrix} + \frac{D_R}{U^2} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ -u_\beta \end{bmatrix} + \frac{D_I}{U^2} \begin{bmatrix} u_\beta \\ u_\alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

що далі перетворюється на трикоординатний сигнал керування фільтром шляхом множення на транспоновану матрицю $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$. Неперервне виділення потужностей небалансу у запропонований спосіб збільшує швидкодію автономного ПАФ для динамічного навантаження.

Розглянемо можливість розвинення розробленої схеми керування ПАФ на рис. 1 з метою поширення області його застосування на трифазні чотирипровідні системи. Пульсації миттєвих потужностей в такій системі визначаються виразами

$$\tilde{p}(t) = \text{Re}(\bar{\mathbf{u}}^\wedge \bar{\mathbf{i}}^\wedge e^{j2\omega t}) = \text{Re}\{U \bar{\mathbf{e}}_+ [(P - jQ) \bar{\mathbf{e}}_+ + (D_R - jD_I) \bar{\mathbf{e}}_- + (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0] / U\} =$$

$$= \text{Re}[(D_R - jD_I) e^{j2\omega t}] = D_R \cos(2\omega t) + D_I \sin(2\omega t); \quad \tilde{q}(t) = \text{Re}(-j \bar{\mathbf{u}}^\wedge \bar{\mathbf{i}}^\wedge e^{j2\omega t}) = D_R \sin(2\omega t) - D_I \cos(2\omega t),$$

аналогічними (6). Складові струмів компенсації з потужностями N_R та N_I , притаманні чотирипровідній мережі за несиметричного навантаження,

$$\dot{i}_0 \bar{\mathbf{e}}_0 = U^{-1} (N_R - jN_I) \bar{\mathbf{e}}_0 = (\bar{\mathbf{e}}_0^\wedge \bar{\mathbf{i}}) \bar{\mathbf{e}}_0 = \left[\frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3} \right] \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^\wedge$$

можуть бути легко реалізовані в часовій області розширеною матрицею Кларк $\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}$, як показано на рис. 1, та безпосередньо включені у вихідний сигнал компенсації через транспоновану розширену

матрицю Кларк. В результаті отримаємо структурну схему керування ПАФ з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній мережі.

Верифікація запропонованих стратегій активної фільтрації струмів комп'ютерним моделюванням. Векторний компенсаційний сигнал (4) з обчисленими відповідно до (3) потужностями використовувався для керування залежними джерелами струмів ПАФ в комп'ютерній моделі трифазної чотирипровідної системи (рис. 2), реалізованій в програмному середовищі *PLECS*. Значення активного опору фази *A* R_A дискретно змінюється з часом, починаючи від значення 1 Ом в момент часу $t=0$, і надалі зростає на 1 Ом кожні 0.1 секунди. Навантаження інших фаз відповідають комплексним опорам $\bar{Z}_B = R_B + jX_B = 4 - j$, $\bar{Z}_C = R_C + jX_C = 1 + 4j$. Напряга мережі 220 В.

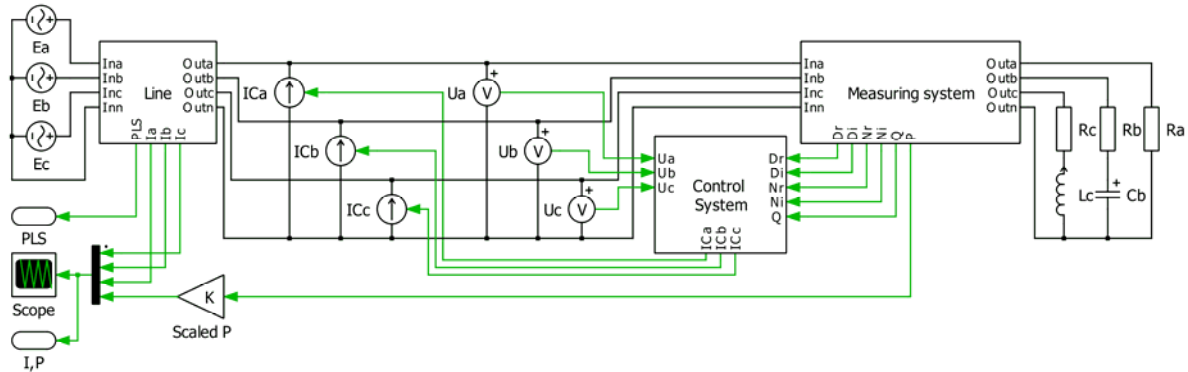


Рис. 2

Результати моделювання активної фільтрації для динамічного навантаження (рис. 3) показують, що по завершенні перехідних процесів струми лінії передачі I_{ra} , I_{rb} , I_{rc} залишаються синусоїдними та симетричними, а їхні амплітуди відповідають поточному значенню активної потужності P .

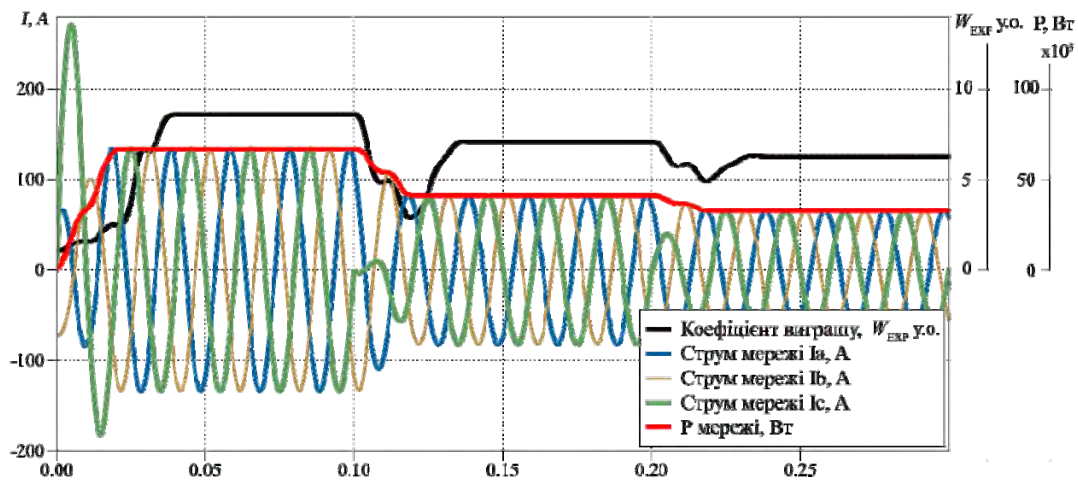


Рис. 3

Перевірявся також коефіцієнт вигащу за потужністю втрат $W = \Delta P / \Delta P_{MIN}$, де ΔP – потужність втрат в лінії передачі за відсутності ПАФ; ΔP_{MIN} – мінімально можливе значення потужності втрат для даного навантаження, що забезпечує ПАФ шляхом формування активного струму трифазної системи в лінії передачі. Відповідно до [10] цей коефіцієнт може бути використаний для експериментальної верифікації коефіцієнта потужності

$$A = P/S = \sqrt{\Delta P_{MIN} / \Delta P} = W^{-1/2}, \quad (9)$$

де під повною потужністю S розуміється її ефективне значення за визначенням [2]. Коефіцієнт потужності трифазної чотирипровідної системи з лінійним несиметричним навантаженням, що ідентифікується комплексними провідностями $\bar{Y}_k = 1 / \bar{Z}_k$, $k = A, B, C$, визначений в [11] як

$$A = \text{Re}(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) / \sqrt{3(Y_A^2 + Y_B^2 + Y_C^2 + \rho|\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C|^2)}, \quad (10)$$

де $\rho = r_N / r$ – відношення опору нейтрального проводу до опору лінійного проводу.

Підстановка (9) в (10) дає розрахунковий коефіцієнт виграшу за потужністю втрат

$$W = 3 \left(Y_A^2 + Y_B^2 + Y_C^2 + \rho |\bar{Y}_A + \bar{a}\bar{Y}_B + \bar{a}^2\bar{Y}_C|^2 \right) / \operatorname{Re}^2(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C). \quad (11)$$

Значення цього коефіцієнта для трьох часових інтервалів зміни навантаження, представлених на рис. 3, та $\rho = 3$ зведено в таблиці.

\bar{Z}_k	$\bar{Z}_A = 1, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$	$\bar{Z}_A = 2, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$	$\bar{Z}_A = 3, \bar{Z}_B = 4 - j, \bar{Z}_C = 1 + 4j$
\bar{Y}_k	$\bar{Y}_A = 1, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$	$\bar{Y}_A = \frac{1}{2}, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$	$\bar{Y}_A = \frac{1}{3}, \bar{Y}_B = \frac{4+j}{17}, \bar{Y}_C = \frac{1-4j}{17}$
W	8.617799787	7.078220359	6.284201798
W_{EXP}	8.610	7.061	6.263

Експериментальні значення коефіцієнта виграшу за потужністю втрат W_{EXP} , наведені на рис. 3 та в останньому рядку таблиці, відповідають всім розрахунковим значенням, що підтверджує адекватність нових формул (3) для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для формування активного струму в лінії передачі. Застосування стратегії керування ПАФ с формуванням неактивних потужностей за структурною схемою (рис. 1) дає аналогічні результати.

Висновки. 1. Обґрунтовано нові формули розрахунку чотирьох складових потужності небалансу трифазних чотирипровідних систем електроживлення на основі вимірювання активних та реактивних потужностей окремих фаз, що можуть бути використані для формування компенсаційних сигналів в розподіленій активній фільтрації з централізованим керуванням.

2. Теорія потужності трифазних систем отримала подальший розвиток, який полягає у поєднанні наявних методів розрахунку для трипровідних систем з розширеною матрицею Кларк, що дало змогу поширити ці методи для чотирипровідних систем.

3. Запропоновано нову структурну схему керування ПАФ з розширеними функціональними можливостями та підвищеною швидкодією, що може використовуватися як в трипровідній, так і в чотирипровідній системах електроживлення.

4. Комп'ютерне моделювання підтвердило адекватність нових формул для розрахунку складових потужності небалансу та ефективність запропонованих стратегій активної фільтрації для формування активного струму в лінії передачі.

1. Гриб О.Г., Сокол Е.И., Жаркин А.Ф., Васильченко В.И., Ущуповский К.В., Светелик А.Д., Гапон Д.А., Громадский Ю.С., Новский В.А., Михайлов В.П., Шевченко С.Ю., Иерусалимова Т.С., Олефир Д.А. Качество электрической энергии. Т. 3: Методы и средства повышения качества электрической энергии. Харьков: ПП Граф-Ікс, 2014. 292 с.

2. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>.

3. Сиротин Ю.А., Гриб О.Г., Гапон Д.А., Иерусалимова Т.С., Швец С.В. Учет неактивных составляющих полной мощности. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»: збірник наукових праць. Тематичний випуск: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2017. № 22 (1244). С. 71–76.

4. Czarnecki L.S. Currents Physical Components (CPC) in Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents. Part 2: Three-phase three-wire linear circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. 2006. Vol. XII. No 1. Pp. 3–13.

5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and its Reactive Compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 1. Pp. 53–63.

6. Santiago Benavides-Córdoba, Jorge-Humberto Urrea-Quintero, Nicolás Muñoz-Galeano, Juan-B Cano-Quintero, Salvador Segui-Chilet. Optimal distribution of the fundamental non-efficient load current terms between the energy gateways connected in grid-tied microgrids. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 2. e13650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13650>.

7. Artemenko M.Yu., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A. Integral power theory and active filtering using the α - β reference frame. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 60004–60014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393767>.

8. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.012>.

9. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018. Vol. 12. No 1. Pp. 6–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2789926>.

10. Majordomo J.G., Usaola J. Apparent Power and Power Factor Definitions for Polyphase Non-Linear Loads when Supply Conductors Present Different Resistances. *European Trans. on Electrical Power*. 1993. Vol. 3. No 6. Pp. 415–420.

11. Артеменко М.Ю., Костюк Р.Ю. Коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії трифазних систем живлення при лінійному несиметричному навантаженні. *Електроніка та зв'язок*. 2015. № 6. С. 17–23.

MEASUREMENT AND COMPENSATION OF THREE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEM INACTIVE POWERS BY SHUNT ACTIVE FILTERING

M.Yu. Artemenko¹, Yu.V. Kutafin¹, V.V. Chopyk², V.M. Mikhalsky², I.A. Shapoval², S.Y. Polishchuk²

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

² Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: mikhalsky@ied.org.ua.

In this paper, the power theory of three-phase power supply systems was further developed by substantiating new formulas for calculating the unbalance power of three-phase four-wire power supply systems based on the measurement of active and reactive powers of individual phases, which can be used to form compensation signals in distributed active filtering with centralized control. A new structural scheme for controlling an autonomous shunt active filter with extended functionality and increased speed is proposed, which can be used in both three-wire and four-wire power supply systems. Computer modeling confirmed the adequacy of the new formulas for calculating the unbalance power components and the effectiveness of the proposed active filtering strategies to minimize power losses in the transmission line. References 11, figures 3, table 1.

Key words: unbalance power, parallel active filter control strategy, power loss minimization.

1. Hryb O.H., Sokol Ye.I., Zharkin A.F., Vasilchenko V.I., Uschapovskiy K.V., Svetelik A.D., Hapon D.A., Hromadskiy Yu.S., Novskiy V.A., Mikhailov V.P., Shevchenko S.Yu., Ierusalymova T.S. Olefir D.A. Quality of electrical energy. Vol. 3. Methods and means of improving the quality of electrical power. Kharkiv: PP Hraf-X, 2014. 292 p. (Rus)

2. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal non-sinusoidal, balanced or unbalanced conditions. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>.

3. Syrotyn Yu.A., Hryb O.H., Hapon D.A., Ierusalymova T.S., Shvets S.V. Accounting for inactive components of apparent power. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI: zbirnyk naukovykh prats. Tematychnyi vypusk: Hidravlichni mashyny ta agregaty*. 2017. No 22 (1244). Pp.71–76. (Rus)

4. Czarnecki L.S. Currents Physical Components (CPC) in Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents. Part 2: Three-phase three-wire linear circuits. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. 2006. Vol. XII. No 1. Pp. 3–13..

5. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and its Reactive Compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 1. Pp. 53–63.

6. Santiago Benavides-Córdoba, Jorge-Humberto Urrea-Quintero, Nicolás Muñoz-Galeano, Juan-B Cano-Quintero, Salvador Segui-Chilet. Optimal distribution of the fundamental non-efficient load current terms between the energy gateways connected in grid-tied microgrids. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 2. e13650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13650>.

7. Artemenko M.Yu., Polishchuk S.Y., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A. Integral power theory and active filtering using the α - β reference frame. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 60004–60014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3393767>.

8. Artemenko M.Yu., Chopyk V.V., Mikhalsky V.M., Shapoval I.A., Polishchuk S.Y. The unbalance power identification in the three-phase four-wire power supply system for the needs of its distributed compensation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.02.012>.

9. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2018. Vol. 12. No 1. Pp. 6–24. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2789926>.

10. Majordomo J.G., Usaola J. Apparent Power and Power Factor Definitions for Polyphase Non-Linear Loads when Supply Conductors Present Different Resistances. *European Trans. on Electrical Power*. 1993. Vol. 3. No 6. Pp. 415–420.

11. Artemenko M.Yu., Kostyuk R.Yu. The power factor and efficiency of three-phase power systems under linear asymmetric load. *Elektronika ta zviazok*. 2015. No 6. Pp. 17–23. (Ukr)

Надійшла 05.06.2024
Остаточний варіант 15.07.2024

ЦИФРОВА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ З САМОЗБУДЖЕННЯМ

В.Я. Гуцалюк*, канд. техн. наук, **І.С. Зубков****, докт. філософії
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: alfa@ied.org.ua

В схемах керування транзисторними резонансними інверторами напруги установок індукційного нагріву широко використовуються системи фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ). Одним з недоліків систем ФАПЧ є низька швидкодія, що викликана наявністю фільтра нижніх частот. Цей недолік відсутній в системах з самозбудженням, коли момент перемикання транзисторів визначається на кожному напівперіоді. При цьому можлива несиметрія півперіодів, що є суттєвим недоліком за наявності трансформатора на виході інвертора. Розроблено цифрову систему керування резонансним інвертором напруги з самозбудженням та однаковими тривалостями півперіодів вихідної напруги інвертора. Вона може працювати з різними способами регулювання вихідного струму та дає змогу забезпечити режими комутації транзисторів з мінімальними втратами потужності. Бібл.7, рис. 5.

Ключові слова: індукційний нагрів, резонансний інвертор напруги, система керування з самозбудженням.

Вступ. В транзисторних перетворювачах установок індукційного нагрівання для забезпечення режимів перемикання з мінімальними втратами потужності та забезпечення максимальної потужності в навантаженні використовуються системи автопідстроювання частоти. В першу чергу це системи фазового підстроювання частоти (ФАПЧ). Вони бувають різного типу та достатньо широко представлені в публікаціях. Системи ФАПЧ мають в своїй структурі фільтр низької частоти, що обмежує їх швидкодію. Застосування перетворювачів з самозбудженням, коли момент перемикання транзисторів визначається на кожному півперіоді, дає можливість забезпечити високу швидкодію, яка важлива в перехідних режимах вмикання перетворювача, зміні параметрів навантаження, у разі міжвиткових замиканнях індуктора або вилученні деталей під час процесу роботи установки [1, 2]. Одним з прикладів доцільності застосування швидкодіючих систем керування, як стверджується в публікаціях, є перетворювачі, які живляться від однофазної мережі живлення та не використовують на вході інвертора як фільтра електролітичні конденсатори великої ємності чи схеми з активним коректором коефіцієнта потужності. [1, 3] Така структура побудови забезпечує вхідний коефіцієнт потужності близький до одиниці, зменшує собівартість та забезпечує більшу надійність перетворювача.

Однак для забезпечення режимів перемикання транзисторів інвертора з самозбудженням і мінімальними втратами потужності необхідно застосовувати різні схемотехнічні рішення [1–5]. Оскільки момент перемикання транзисторів інвертора з самозбудженням визначається в кожному півперіоді, то можлива несиметрія півперіодів вихідної напруги, яка обумовлена неточністю роботи вузлів системи керування. Зменшення несиметрії важливо для перетворювачів, які мають погоджувальний трансформатор на виході інвертора, який також забезпечує гальванічну розв'язку навантаження від мережі живлення. Розглянемо можливості вирішення цієї задачі за допомогою цифрових систем керування, які характеризуються точністю та широко застосовуються в системах ФАПЧ [6].

Мета роботи. Розробка швидкодіючих систем керування резонансними інверторами напруги з самозбудженням для установок індукційного нагрівання, дослідження та вдосконалення відомих варіантів схем за допомогою використання можливостей цифрових систем керування.

На рис. 1 показано схему силової частини транзисторного резонансного інвертора напруги установки індукційного нагрівання з послідовним контуром на виході, еквівалентна схема заміщення якого представлена як L, C, R . Напруга з виходу інвертора через трансформатор дає струм TV_i та

© Гуцалюк В.Я., Зубков І.С., 2024

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-2496-1338>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9705-7278>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

конденсатор розв'язки C_p поступає на погоджувальний трансформатор TV . Паралельно транзисторам інвертора $VT1-VT4$ приєднані снаберні конденсатори C_s .

Система керування резонансним інвертором напруги з самозбудженням повинна забезпечити перемикання транзисторів за деякий час T_d до моменту перетину струму через нуль. Цього часу повинно бути достатньо для вимикання одних транзисторів інвертора та вмикання інших, що забезпечить режими перемикання з мінімальними втратами потужності [7]. Для цього може використовуватися схема, представлена в [1–3] та наведена на рис 2, а. Тут також наведені ідеалізовані діаграми, які пояснюють її роботу. Схема побудована на основі компаратора, який порівнює сигнал u_1 з датча струму TV_i та R_i і зсунутий по фазі за допомогою RC кіл сигнал u_2 . На виході схеми з'являються імпульси u_i , які випереджають по фазі струм i на час T_d .

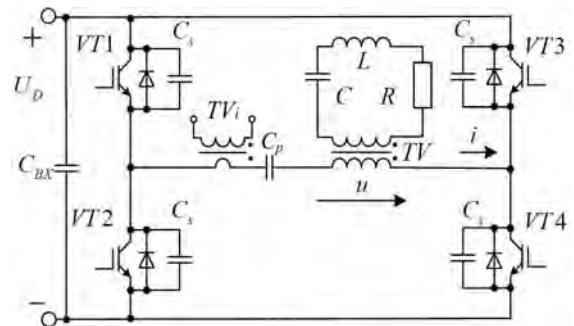


Рис. 1

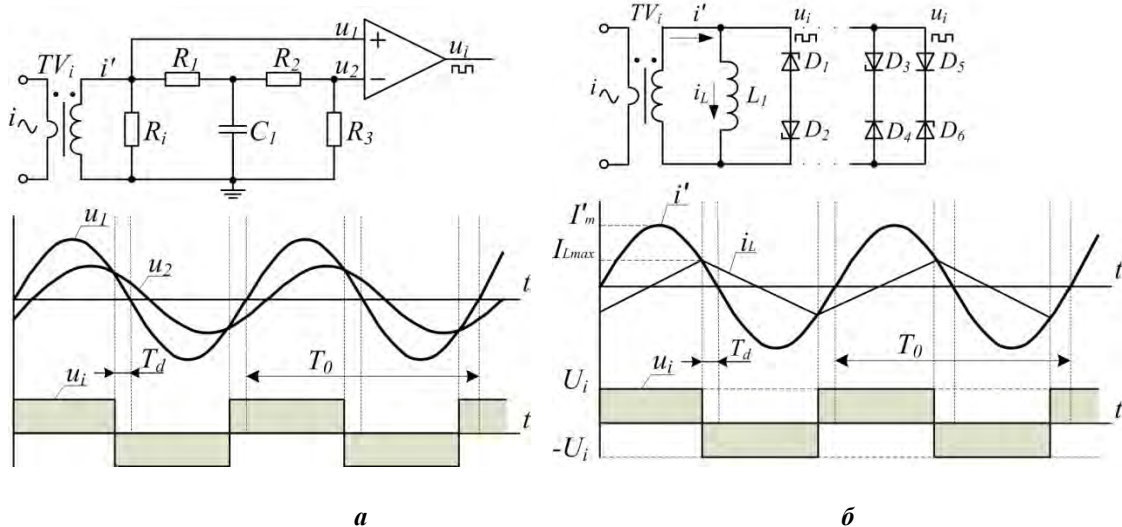


Рис. 2

Сигнал u_1 можна записати у вигляді

$$u_1 = U_{Ri} \sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

де U_{Ri} – амплітуда напруги на виході датча струму; $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0$ – кутова частота вихідного струму інвертора.

Далі цей сигнал зсувається на кут φ за допомогою R_1 та C_1 і зменшується до певного рівня завдяки резисторам R_2 та R_3 ; і його можна записати як

$$u_2 = \frac{U_{Ri} \sin(\omega_0 t - \varphi)}{A}, \quad (2)$$

де

$$A = (R_1 + R_2 + R_3) R_3^{-1} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_0 C_1 R_1 (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \right)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega_0 C_1 R_1 (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Сигнал u_2 порівнюється з сигналом u_1 за допомогою компаратора і на виході отримуємо результуючий прямокутний сигнал u_i .

Час T_d між струмом перемикання та сигналом на виході компаратора u_i можна визначити як

$$T_d = \frac{1}{\omega_0} \arctan \left(\frac{\sin(\varphi)}{A - \cos(\varphi)} \right). \quad (3)$$

Як видно з (3) час T_d не залежить від амплітуди струму однак залежить від частоти, що наведено на діаграмах рис. 3 для наступних значень елементів схеми рис. 2, а: $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 1$ кОм, $R_3 = 5.1$ кОм, $C_1 = 1$ нФ, $U_{Ri} = 3.8$ В. Як видно з діаграми зі зменшенням частоти збільшується T_d , так у разі зміни частоти в 2 рази T_d збільшується приблизно на 20%. Це позитивна властивість з точки зору

забезпечення режимів перемикання з мінімальними втратами потужності, однак цього недостатньо для забезпечення оптимальних режимів перемикання [7]. Якщо порівняти її з системою ФАПЧ, то остання в класичному виконанні забезпечує заданий постійний час зсуву у разі зміни амплітуди

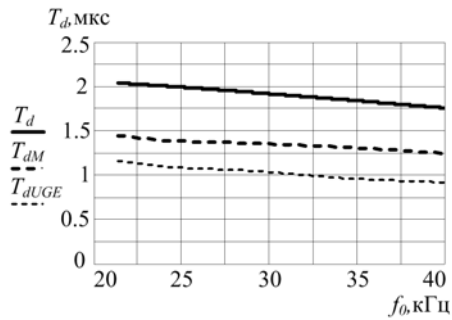


Рис. 3

компаратора та можливість виникнення несиметрії півперіодів напруги u_3 , яка може спостерігатися через неідеальність компаратора та виникати в динамічних режимах.

Схема на рис. 2, б використовує інший принцип роботи та побудована на основі дроселя та стабілітронів, які приєднані до трансформатора струму [4]. В ідеалізованому вигляді принцип роботи схеми можна описати наступним чином. При протіканні струму стабілітрони забезпечують на виході двополярну напругу типу меандр u_i , відповідно в дроселі з'являється лінійно зростаючий та падаючий струм. Коли цей струм зрівнюється зі струмом трансформатора струму, напруга на виході змінює знак. Суттєвим недоліком зазначеної схеми є наявність паразитної ємності стабілітронів, що впливає на роботу схеми на підвищених частотах. Була запропонована схема, яка наведена праворуч на рис. 2, б. Принцип її дії подібний, але наявність швидкодіючих діодів послідовно зі стабілітронами суттєво зменшує вплив ємності стабілітронів.

Максимальне значення струму дроселя I_{Lmax} для цієї схеми можна записати як

$$I_{Lmax} = \frac{\pi U_i}{2\omega_0 L_1}, \quad (4)$$

де U_i – пікове значення напруги u_i .

Струм i' , отриманий з давача струму, в точці перетину з максимальним значенням струму I_L можна записати як

$$i' \left(\frac{T_0}{2} - T_d \right) = i'(T_d) = I'_m \sin(T_d \omega_0). \quad (5)$$

Прирівнюючи (4) та (5), можна отримати значення часу фазового зсуву T_d між струмом перемикання та сигналом напруги на виході цієї схеми u_i

$$T_d = \frac{1}{\omega_0} \arcsin \left(\frac{\pi U_d}{2I'_m \omega_0 L_1} \right). \quad (6)$$

Таким чином T_d в даному випадку залежить від амплітуди струму та від частоти. T_d збільшується у разі зменшення частоти та зменшення амплітуди струму. Суттєвим недоліком схеми є те що вона некоректно працює на малих струмах. Перевагою схеми є простота, і вона може використовуватись за обмеженого діапазону зміни параметрів навантаження.

Недоліки обох схем полягають в тому, що вони не забезпечують рівність півперіодів вихідної напруги інвертора, що за наявності погоджувального трансформатора потребує використання розділового конденсатора C_p . Тому була запропонована цифрова система керування, яка вимірює тривалість одного півперіоду, а наступний півперіод робить такої самої тривалості. Таким чином забезпечуються режими роботи погоджувального трансформатора без намагнічування.

На рис. 4 наведено структурну схему та діаграми, які пояснюють роботу запропонованої системи на прикладі частотного регулювання. Система підстроювання частоти з самозбудженням побудована із застосуванням програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС), яка використовує імпульси u_i , що поступають зі схеми рис. 2, а наприкінці одного з півперіодів вихідного струму. Напруга U_I з давача середнього за модулем струму порівнюється з напругою завдання струму U_s , та сигнал похибки поступає на ПІ регулятор. Підсилений сигнал за допомогою АЦП перетворюється в цифровий сигнал та поступає на ПЛІС.

Генератор імпульсів реалізований на основі лічильника. На рис 4, б наведені діаграми, які показують принцип роботи системи та реалізовані в ПЛІС. Поки відсутній сигнал струму система АПЧ формує імпульси u_c мінімальної частоти з періодом T_{max} та рівними півперіодами, що показано на діаграмах 1 рис. 4. Імпульси u_c поступають в блок логіки, на виході якого формуються імпульси керування транзисторами інвертора з необхідним зсувом на час «dead time».

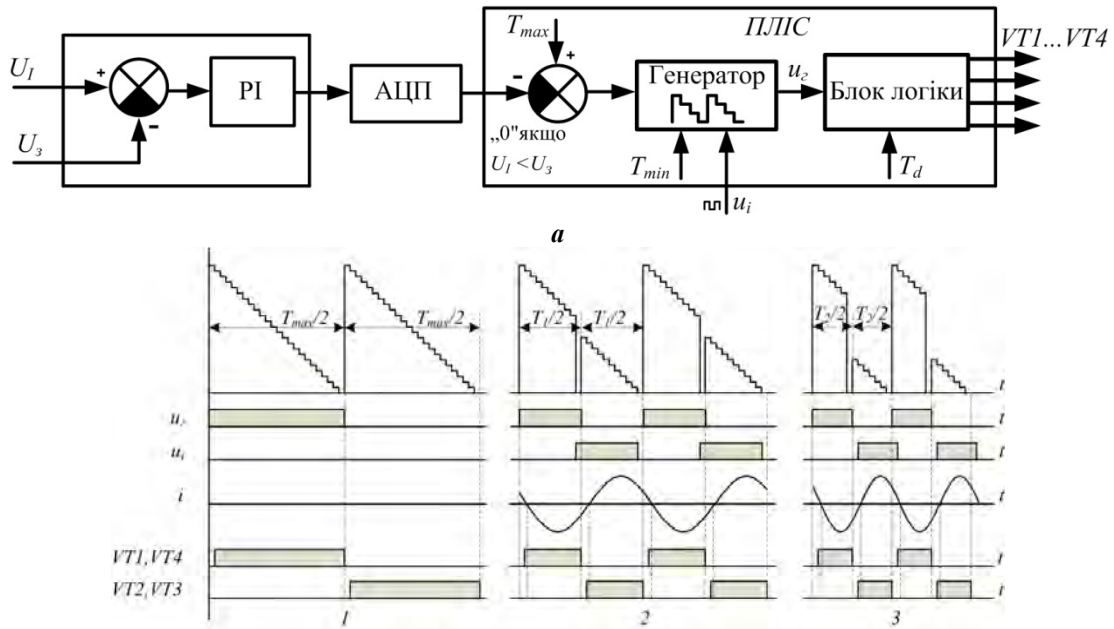


Рис. 4

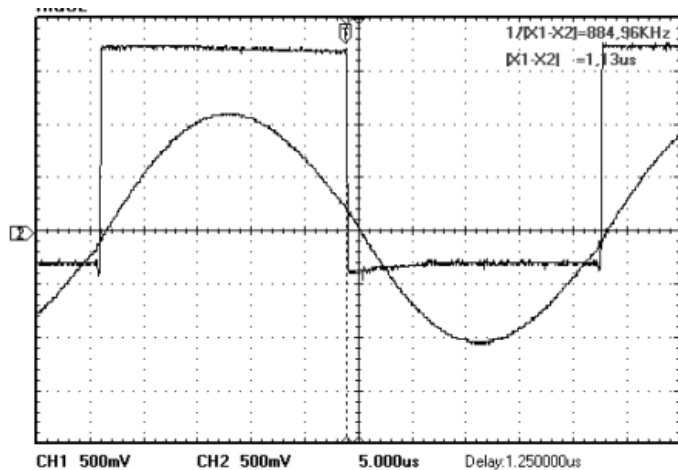
Генератор імпульсів реалізований на основі лічильника. На рис 4, б наведені діаграми, які показують принцип роботи системи та реалізовані в ПЛІС. Поки відсутній сигнал струму система АПЧ формує імпульси u_c мінімальної частоти з періодом T_{max} та рівними півперіодами, що показано на діаграмах 1 рис. 4. Імпульси u_c поступають в блок логіки, на виході якого формуються імпульси керування транзисторами інвертора з необхідним зсувом на час «dead time».

Коли з'являється струм, імпульси u_i по задньому фронту обнуляють лічильник, що задає тривалість півперіоду. Генератор побудований таким чином, що наступний півперіод дорівнює попередньому, а частота близька до резонансної. Таким чином працює система АПЧ, що показано на діаграмах 2 рис. 4. При цьому також обмежується максимальна частота генератора з періодом T_{min} . Коли струм досягає рівня, який завдається U_3 , з'являється сигнал похибки та відповідно збільшується частота генератора, що показано на діаграмах 3 рис. 4. Запропонована швидкодіюча система автоматичного підстроювання частоти може бути застосована разом з різними способами регулювання вихідного струму резонансного інвертора, такими як частотно імпульсна модуляція, фазо імпульсна модуляція, модуляція щільності імпульсів та іншими, при цьому алгоритм роботи ПЛІС буде змінено.

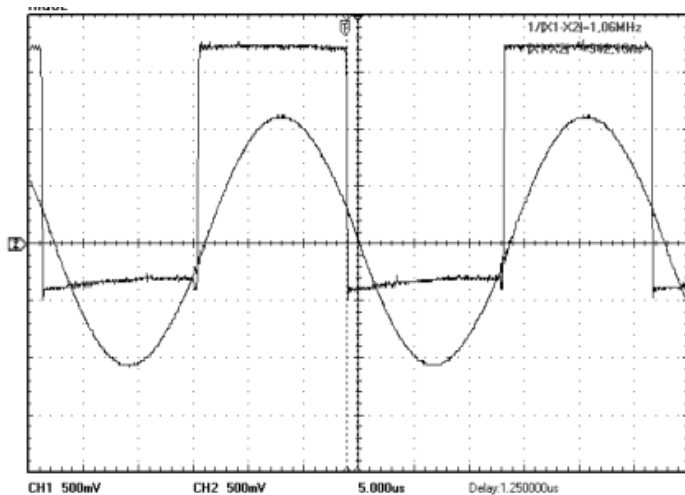
Проведено експериментальні дослідження запропонованої системи керування на макетному зразку перетворювача, побудованого на транзисторах IRG4PC40UD та ПЛІС MAX II EPM240T100C5N (ALTERA). На рис 5, а, б наведено діаграми струму та напруги керування одним з транзисторів u_{GE} для частоти роботи 22 кГц та 35 кГц за однакового струму навантаження. Частота задавалася за допомогою зміни ємності конденсатора коливального контуру C . На рис 5, в наведені діаграми для частоти роботи 22 кГц за R навантаження приблизно в 2 рази більшому, ніж у випадку рис. 5, а.

Діаграми показують, що T_{dUGe} не залежить від амплітуди струму та збільшується з 0,94 мкс до 1,13 мкс за зменшення частоти з 35 кГц до 22 кГц. Експериментальні дослідження показали працездатність системи керування в різних режимах роботи за частотного регулювання. Використання ПЛІС, крім забезпечення необхідних алгоритмів керування інвертором з самозбудженням, може виконувати функції захисту, комутації, індикації та інше.

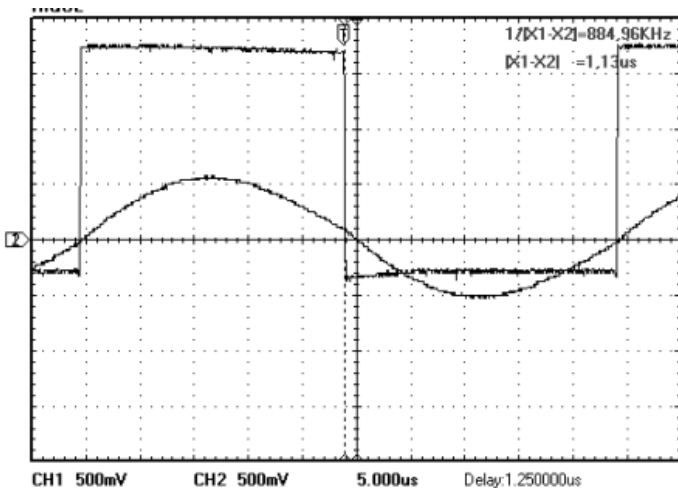
Висновки. Розроблено цифрову систему керування резонансного інвертора напруги для установок індукційного нагрівання, яка забезпечує швидке підстроювання частоти на основі



a



б



в

Рис. 5

самозбудження та однаково тривалість півперіодів вихідної напруги інвертора, що усуває можливість намагнічування погоджувального трансформатора інвертора. Вона може працювати з різними способами регулювання вихідного струму та дає змогу забезпечити оптимальні режими комутації транзисторів інвертора в динамічних режимах зміни параметрів живлячої мережі та навантаження таких як перепади напруги або аварійні режими роботи мережі, міжвиткові замикання індуктора або вилучення деталі під час роботи установки.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання» (шифр «Частота-3»), державний реєстраційний номер 0120U002003 (КПКВК 6541030).

1. Calleja H., Ordonez R. Improved induction-heating inverter with power factor correction. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.1999.785654>.
2. Calleja H. Fast-response control circuit for resonant inverters. *International Journal of Electronics*. 2002. Vol 89. No 3. Pp. 233-244. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207210210122550>.
3. Calleja H., Ordonez R. Control Circuit for an Induction Heating Inverter with Active PFC. *Proceedings of the Power Electronics Specialist Conference*. Fukuoka, Japan, 22-22 May 1998. Pp. 485-490. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.1998.701942>.
4. Bal G., Oncu S., Ozbas E. Self-Oscillated Induction Heater for Absorption Cooler. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2013. Vol. 19. No 10. Pp. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.19.10.5894>.
5. Mohammad Hameed Khazaal, Isam Mahmood Abdulbaqi, Rabee' Hashim Thejel. Design, Simulation and Implementation of a Self-Oscillating Control Circuit to Drive Series Resonant Inverter Feeding a Brazing Induction Furnace. *Al-Sadeq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA)*, Baghdad, Iraq, 09-10 May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIC-MITCSA.2016.7759932>.
6. Зубков І.С., Гуцалюк В.Я., Юрченко О.М. Система цифрового фазового автоматичного підстроювання частоти резонансного інвертора

напруги. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.027>.

7. Гуцалюк В.Я., Юрченко О.М., Зубков І.С. Система автоматичного підстроювання частоти резонансних інверторів установок індукційного нагрівання з модуляцією щільності імпульсів. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.035>.

SELF-OSCILLATING DIGITAL CONTROL SYSTEM OF RESONANCE VOLTAGE INVERTER

V.Ya. Hutsaliuk, I.S. Zubkov

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: alfa@ied.org.ua.

Phase-locked loop systems (PLL) are widely used in control circuits of transistor resonant voltage inverters of induction heating installations. One of disadvantages of PLL systems is low speed, which is caused by the presence of a low-pass filter. This disadvantage is absent in self-oscillating systems, when the switching moment of the transistors is determined on each of half periods. At the same time, an asymmetry of half periods is possible, which is a significant disadvantage if there is a transformer at the output of the inverter. A self-oscillating digital control system for a resonant voltage inverter and equal half periods durations of the inverter output voltage has been developed. It can work with different methods of regulating the output current and allows to provide switching modes of transistors with minimal power losses. References 7, figures 5.

Key words: induction heating, resonant voltage inverter, self-oscillating control systems.

1. Calleja H., Ordonez R. Improved induction-heating inverter with power factor correction. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.1999.785654>.
2. Calleja H. Fast-response control circuit for resonant inverters. *International Journal of Electronics*. 2002. Vol 89. No 3. Pp. 233-244. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207210210122550>.
3. Calleja H., Ordonez R. Control Circuit for an Induction Heating Inverter with Active PFC. *Proceedings of the Power Electronics Specialist Conference*. Fukuoka, Japan, 22-22 May 1998. Pp. 485-490. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESC.1998.701942>.
4. Bal G., Oncu S., Ozbas E. Self-Oscillated Induction Heater for Absorption Cooler. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2013. Vol. 19. No 10. Pp. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.eee.19.10.5894>.
5. Mohammad Hameed Khazaal, Isam Mahmood Abdulbaqi, Rabee' Hashim Thejel. Design, Simulation and Implementation of a Self-Oscillating Control Circuit to Drive Series Resonant Inverter Feeding a Brazing Induction Furnace. *Al-Sadeq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA)*, Baghdad, Iraq, 09-10 May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIC-MITCSA.2016.7759932>.
6. Zubkov I.S., Hutsaliuk V.Ya., Yurchenko O.M. Digital phase-locked loop system of resonance voltage inverter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.027>. (Ukr)
7. Hutsaliuk V.Ya., Yurchenko O.M., Zubkov I.S. Phase-locked loop system of resonance inverters for induction heating instalation with pulse density modulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.035>. (Ukr)

Надійшла 06.05.2024

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ У СТАЛІ СТАТОРА

О.М. Попович*, докт. техн. наук, І.В. Головань**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: popovich1955@ukr.net; golovan_77@ukr.net.

Виконано порівняльне дослідження способів врахування впливу процесів втрат у сталі статора асинхронної машини з короткозамкненим ротором на величину параметрів робочого режиму. Здійснено порівняння з довідниковими даними результатів розрахунку параметрів номінального режиму асинхронного двигуна без урахування втрат у сталі та з їх урахуванням за допомогою еквівалентних опорів, підключених паралельно до двигуна, а також еквівалентних контурів втрат у сталі. Досліджено вплив співвідношення активної та індуктивної складових навантаження еквівалентних контурів втрат у сталі на результати математичного моделювання. Дослідження виконано на базі універсальної математичної моделі асинхронного двигуна електромеханотронних систем з довільною схемою обмотки статора. Розроблено алгоритм визначення і коригування величини параметрів контурів втрат у сталі під час розрахунку перехідних процесів асинхронної машини до усталеного режиму роботи, за величинами втрат у сталі (у залежності від величин індукції і частоти) і діючого значення струму еквівалентного контуру. Задля забезпечення стійкості розв'язку обґрунтовано застосування ітераційного коефіцієнту і дискретності коригування величини опору. Обґрунтовано застосування контурів втрат у сталі статора у математичній моделі асинхронної машини у режимі генератора, коли використання паралельно підключених еквівалентних опорів вступає у протиріччя з енергетичною діаграмою машини. Бібл. 10, табл.1, рис. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, робочий режим, втрати у сталі статора, еквівалентні контури.

Асинхронні машини (АМ) є найбільш поширеним типом електромеханічних перетворювачів завдяки сукупності показників енергетичної та ресурсної ефективності. Максимізація показників ефективності АМ, частіше двигунів, які виготовляються крупними серіями, досягається за їх оптимального проектування. Оптимальне проектування серійних асинхронних двигунів (АД) у переважній більшості випадків здійснюється для номінальних режимів роботи. Головним чином це стосується нерегульованого електроприводу. Підвищення ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії пов'язано із застосуванням регульованого електроприводу, роботою АМ як елемента комплексу електротехнічного обладнання. Це принципово збільшує розмаїття експлуатаційних режимів АМ і обґрунтовує розвиток підходів до їхнього оптимального проектування. Ефективний проектний синтез АМ як елемента електромеханічної системи (ЕМС) досягається за комплексного проектування [1], коли визначення оптимальної величини конструктивних і режимних параметрів АМ здійснюється у процесі оптимізаційного дослідження комплексної математичної моделі всієї системи із використанням комплексних критеріїв її ефективності. Такі моделі забезпечують дослідження дійсних експлуатаційних режимів, враховують взаємний вплив складових системи і забезпечують кількісну оцінку комплексного критерію ефективності як відношення величини корисної дії системи за кінцевим результатом до обсягу спожитих ресурсів.

Якість проектування залежить від достовірності результатів математичного моделювання, яке у випадку АМ пов'язано із точністю врахування втрат у ній і, зокрема, втрат у сталі. Величина втрат у сталі АМ залежить від властивостей магнітопроводу, рівня його насичення, частотного режиму [2, 3]. За поширеними методиками проектування АД визначена величина втрат у сталі враховується підключенням на напругу мережі паралельно до входу АД [4] еквівалентних опорів втрат у сталі,

© Попович О.М., Головань І.В., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-9238-5782>; ** <https://orcid.org/0000-0002-5250-6981>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

розрахунком їхніх струмів, корегуванням параметрів робочих режимів [5]. За комплексного проектування АМ як елемента ЕМС можливі режими двох напрямків енергообміну: у режимах двигуна і генератора [6]. Живлення опорів втрат у сталі, які підключено паралельно до клем АМ, здійснюється від джерела електричної енергії. У режимі двигуна це відповідає енергетичній діаграмі, у режимі генератора – ні. Крім того, можливими є складні структури схем з'єднання віток обмотки статора між собою і з зовнішньою мережею, наприклад, [7]. У вказаних випадках врахування втрат у сталі, паралельними до двигуна опорами, може не відповідати дійсним напрямкам енергоперетоків, порушувати коректність врахування взаємного впливу АМ із іншими елементами системи та може призводити до помилок. У даних режимах доцільно розглянути інший спосіб врахування втрат у сталі, наприклад, за допомогою еквівалентних контурів [8]. Це пов'язано із потребою розробки відповідної математичної моделі АМ і побудовою алгоритмів визначення параметрів даних контурів.

Задля дослідження АМ з короткозамкненим ротором і обмоткою статора із довільною схемою з'єднання її віток призначено математичну модель АД електромеханотронних систем (ЕМТС) [9]. Вона враховує спектр просторових гармонік МРС, несиметрію та нелінійність електромагнітних параметрів, довільність схеми з'єднання віток обмотки статора за допомогою матриць включення за першим і другим законами Кірхгофа. Модель АД ЕМТС є моделлю динамічних режимів, вона реалізована у програмному середовищі MATLAB, представлена у комплексній моделі імітаційного моделювання електротехнічної системи вхідними і вихідними клемми віток обмотки статора [9]. Властивості моделі АД ЕМТС щодо врахування процесів у складних структурах обмоток статора доцільно використати задля отримання із мінімальними переробками моделі АМ з еквівалентними контурами втрат у сталі.

Метою даної роботи є розробка математичних і програмних засобів адаптації імітаційної моделі АД ЕМТС до умов врахування втрат у сталі за використання їхніх еквівалентних контурів та дослідження впливу величини параметрів даних еквівалентних контурів на адекватність математичної моделі.

Розробку математичної моделі АМ з еквівалентними контурами втрат у сталі виконано на основі моделі АД ЕМТС за врахування основної просторової гармоніки МРС, використання параметрів фазних обмоток статора задля створення трьох додаткових короткозамкнених еквівалентних контурів із властивостями взаємної індуктивності лише за основним магнітним полем.

Початковою інформацією для формування матриць параметрів контурів АД ЕМТС є обмоткові дані [10], електромагнітні характеристики електротехнічних матеріалів, особливості схеми обмотки статора щодо взаємної індуктивності її віток за шляхами потоків розсіювання, залежності електромагнітних параметрів. Нелінійність даних залежностей впливає з врахування або за заздалегідь розрахованої залежності зміни коефіцієнту насичення магнітного поля у функції величини сумарної МРС машини, або із використанням залежностей електромагнітних параметрів за результатами польового аналізу. Електромагнітний момент визначається за величинами електромагнітних параметрів і струмів контурів статора і ротора. Механічні та додаткові втрати враховано відповідними гальмівними моментами.

Сформуємо математичну модель АД ЕМТС з еквівалентними контурами втрат в сталі із з'єднанням фазних обмоток за схемою «зірка». З метою отримання такої моделі сформуємо матрицю параметрів обмотки для рівнянь електричної рівноваги відносно струмів віток трьох фаз. Початкова інформація для формування даних матриць (визначена за результатами обробки обмоткових даних) представлена у вигляді матриць: просторових комплексів одиничних МРС віток $[\bar{F}_v]$; статорних активних опорів і індуктивностей за шляхами потоків розсіювання $[r_s]$ і $[m_{ss}]$ [6]

$$[\bar{F}_v] = [f_A e^{j\alpha_A}, f_B e^{j\alpha_B}, f_C e^{j\alpha_C}]; \quad [r_s] = \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix}; \quad [m_{ss}] = \begin{bmatrix} m_{AA} & m_{AB} & m_{AC} \\ m_{BA} & m_{BB} & m_{BC} \\ m_{CA} & m_{CB} & m_{CC} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де f_i , α_i – модуль та аргумент просторового комплексу одиничної МРС вітки (фази) $i=A, B, C$.

Наведені матриці відповідають системі рівнянь з трьома незалежним фазними струмами. Але для схеми «зірка» струм фази C залежить від незалежних струмів фаз A і B за першим законом Кірхгофа. Розв'язок системи рівнянь електричної рівноваги АД потребує наявності двох рівнянь електричної рівноваги відносно незалежних струмів статора. Задля їхнього отримання використо-

вуються матриця перетворення незалежних струмів в струми віток $[k_{inv}]$ і матриця визначення відомих лінійних напруг мережі через фазні напруги віток за другим законом Кірхгофа $[k_u]$ [9]

$$[k_{inv}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix}^{-1}; \quad [k_u] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}^{-1}.$$

Трансформуємо наведені матриці на випадок врахування трьох додаткових контурів втрат у сталі статора. Оскільки ці контури короткозамкнені, їхні струми є незалежними. Трансформована для додаткового урахування цих струмів контурів сталі i_{kA}, i_{kB}, i_{kC} система рівнянь електричної рівноваги АД повинна бути розширеною і сформованою відносно матриці п'яти незалежних струмів статора $[i_{kA}, i_{kB}, i_{kC}, i_A, i_B]$ для матриці п'яти відомих напруг $[0, 0, 0, u_{AB}, u_{BC}]$. У даному випадку матриці включення наступні:

$$[k_{inv}]_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad [k_u]_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

У такому випадку початкова інформація (1) повинна бути трансформована. Розмірність матриць повинна відповідати кількості контурів і дорівнювати шести. Для формування матриць параметрів обмотки статора і контурів сталі статора замість матриць (1) отримуються матриці у наступному вигляді:

$$[\bar{F}_v]_k = \llbracket \bar{F}_v \rrbracket [\bar{F}_v]; \quad [r_s]_k = [diag\{r_k, r_k, r_k\}, [r_s]]; \quad [m_{ss}]_k = [diag\{l_k, l_k, l_k\}, [m_{ss}]],$$

де r_k, l_k – активний опір і індуктивність навантаження для еквівалентних контурів втрат сталі.

Таким чином, отримано математичну модель АД ЕМТС з додатковими еквівалентними контурами втрат у сталі, яку можна інтегрувати до системи імітаційного моделювання. Параметри r_k, l_k визначаються і змінюються в процесі розрахунку з урахуванням поточного значення величини втрат у сталі P_{st} (визначено за поточними величинами індукції і частоти) і діючого значення струму контуру сталі I_{st} .

Складність визначення параметрів еквівалентних контурів сталі АД впливає з наявної нелінійності електромагнітних параметрів матеріалу, які змінюються в залежності від зміни режиму роботи машини. Задля дослідження квазіусталеного режиму роботи АД за математичною моделлю з еквівалентними контурами втрат сталі необхідно формалізувати зв'язок параметрів еквівалентних контурів втрат в сталі з параметрами режиму роботи машини. Формалізація такого зв'язку загально відомими методами (аналітичним, графічним і т.п.) потребуватиме об'ємних досліджень з врахуванням багатьох змінних.

В даній роботі пропонується отримання відповідного зв'язку тільки на поточному етапі розв'язку системи рівнянь електричної та механічної рівноваги АД. Важливою вимогою до даного підходу з визначення параметрів контурів сталі є забезпечення стійкості розв'язку. Для цього корегування величини параметрів здійснюється за поточними значеннями параметрів робочих режимів з певним кроком у часі. Часова затримка наступного корегування параметрів забезпечує згасання перехідного процесу зміни струмів внаслідок зміни параметру. На початку розрахунку задається величина опору r_{k0} , яка у подальшому корегується змінним коефіцієнтом k_{st}

$$r_k = r_{k0} k_{st}.$$

Зміна цього коефіцієнту повинна забезпечити плавне і швидке наближення значення r_k до величини P_{st} / I_{st}^2 . Для цього враховується значення на попередньому кроці зміни опору $r_{k-} = r_{k0} k_{st-}$. Розбіжність $\Delta = r_{k-} - P_{st} / I_{st}^2$ використовується для знаходження нової величини k_{st}

$$k_{st} = \frac{r_{k-} - \delta \Delta}{r_{k0}} = (1 + \delta) k_{st-} - \frac{\delta}{r_{k0}} \frac{P_{st}}{I_{st}^2},$$

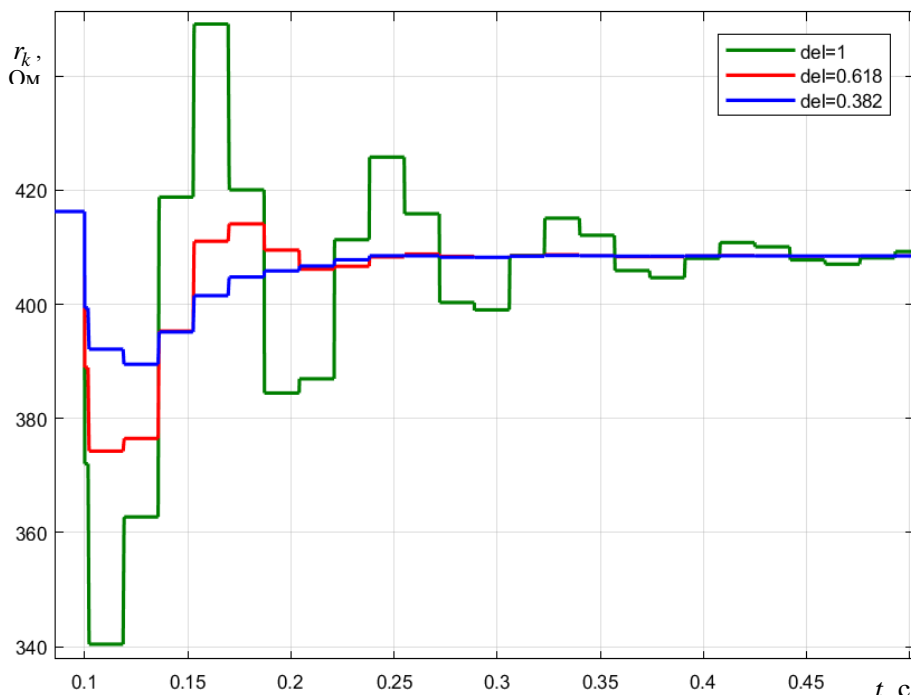
де δ – ітераційний коефіцієнт, $0 < \delta < 1$. Під час розрахунків було прийнято $\delta = 0,382$.

Індуктивність навантаження контуру сталі визначається за заданою величиною $\text{tg}\phi$ контуру

$$l_k = r_k \text{tg}\phi / (2\pi f),$$

де f – частота перемагнічування магнітопроводу.

Чисельний експеримент виконано для порівняння результатів розрахунку параметрів режиму роботи АД 4А160S6У3 із моментом навантаження, який дорівнює номінальному моменту АД під час розрахунків перехідних процесів асинхронної машини до усталеного режиму роботи із живленням від промислової мережі. Порівнюються результати розрахунку без урахування втрат у сталі з розрахунками із урахуванням цих втрат у паралельних до АД опорах та в еквівалентних контурах із зміною $\text{tg}\phi$ їхнього навантаження. Величину електромагнітних параметрів АД визначено



відповідно до даних довідника за відомими методиками із урахуванням нелінійності коефіцієнту насичення магнітного поля. Характер впливу величини δ на динаміку зміни опору r_k у процесі визначення параметрів усталеного режиму можна оцінити за порівнянням залежностей на рисунку для трьох значень: $\delta = 1$; $\delta = 0,618$; $\delta = 0,382$. Початкова величина $r_{k0} = 416$ Ом починає коригуватися з модельного часу $t = 0,1$ с.

Результати розрахунків зведено до таблиці, де наведено: параметри контурів сталі, робочого режиму АД

(струм фаз, ККД, $\cos\phi$, кутова швидкість), потужність втрат у сталі статора за інформацією про індукцію і частоту. У першому рядку наведено довідникову інформацію про параметри номінального режиму АД для оцінки достовірності результатів математичного моделювання. Третій рядок відповідає розрахунку за моделлю з трифазними опорами втрат сталі, підключеними на лінійну напругу у паралель до АД, які забезпечують потрібну величину втрат (наведено величину опорів і струми до і після підключення цих опорів).

Порівняльний аналіз довідникових даних і результатів розрахунків з еквівалентними контурами втрат у сталі дає змогу зробити висновки щодо потрібного співвідношення активної і індуктивної складових навантаження еквівалентних контурів. Видно, що найкращий збіг із даними довідника забезпечує мінімальний індуктивний опір. Збільшення частки індуктивного опору дещо збільшує розмагнічування магнітного кола струмами втрат у сталі, про що свідчить тенденція зниження втрат у сталі.

Джерело інформації	$tg\varphi_{st}$	$r_k, \text{ Ом}$	$l_k, \text{ Гн}$	$I_s, \text{ А}$	η	$\cos\varphi$	$\omega_r, \text{ с}^{-1}$	$P_{st}, \text{ Вт}$	
Довідник	-	-	-	22,535	0,86	0,86	101,89	-	
розрахунок	Без опорів втрат сталі	-	-	22,1	0,8659	0,871	101,9	283,7	
	паралельні опори	-	1535	$\frac{22,11}{22,48}$	0,8636	0,8588	101,9	283,7	
	з еквівалентними контурами	0,005	408,6	0,0065	22,56	0,863	0,856	101,89	282,7
		0,01	408,5	0,013	22,56	0,863	0,856	101,89	282,7
		0,05	405,5	0,065	22,58	0,863	0,8554	101,89	282,6
		0,1	396,4	0,126	22,6	0,8628	0,855	101,89	282,5
		0,15	382,2	0,183	22,62	0,8627	0,8542	101,89	282,4
		0,25	342,9	0,273	22,66	0,8624	0,8527	101,89	282,1
		0,35	297	0,331	22,71	0,8621	0,8513	101,89	281,9
		0,45	252,1	0,361	22,76	0,8618	0,8498	101,88	281,6
0,75		149,9	0,358	22,89	0,861	0,8456	101,87	280,9	
1,05	93,26	0,312	23,03	0,8601	0,8413	101,87	280,2		
1,65	43,7	0,23	23,31	0,8583	0,8328	101,85	278,7		

Результати розрахунку режиму двигуна з урахуванням втрат у сталі еквівалентними контурами (за мінімальної індуктивної складової їхнього навантаження) і паралельними опорами практично збігаються, що свідчить про однакову адекватність цих моделей у даних умовах. Але у генераторному режимі слід застосовувати модель з еквівалентними контурами (з мінімальною часткою індуктивності), оскільки для втрат у паралельних опорах енергія буде споживатися не з валу генератора, а з електричного виходу генератора, що не відповідає фізиці процесів, яка відображається енергетичною діаграмою генератора. Крім того, модель з еквівалентними контурами є більш фізичною в умовах складних схем обмотки статора з кількома електричними з'єднаннями із зовнішньою мережею.

Висновки і рекомендації. Математичну модель АМ з еквівалентними контурами втрат сталі статора можна отримати на основі моделі АД ЕМТС з мінімальною трансформацією матриць параметрів і включення. Розроблений алгоритм ітераційного визначення параметрів еквівалентних контурів втрат у сталі у процесі розрахунку режиму роботи забезпечує високу точність і стійкість аналізу, про що свідчить практичний збіг результатів з даними довідника і стандартними методами проектування АД. Найбільшу точність розрахунків забезпечують еквівалентні контури втрат у сталі із мінімальною часткою їхнього індуктивного навантаження.

У режимі двигуна за схем обмотки статора з одним входом моделі врахування втрат у сталі за допомогою еквівалентних контурів і паралельних до двигуна опорів забезпечують однакову точність і можуть використовуватися на паритетній основі. За складних схем обмотки статора і у режимі генератора модель з еквівалентними контурами має переваги завдяки більш адекватному відображенню процесів перетворення енергії у АМ.

Практична цінність отриманих результатів полягає у підвищенні точності та ефективності комплексного моделювання АМ у складі ЕМС і, відповідно, проектного синтезу. Зокрема, модель використовується для дослідження систем відновлюваної енергетики, наприклад, [6].

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.

2. Diaz G., Gonzalez-Moran C., Arbolea P. and Gomez-Aleixandre J. Analytical Interpretation and Quantification of Rotational Losses in Stator Cores of Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43. No 10. Pp. 3861-3867. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903382>.

3. Ionel D. M., Popescu M., Dellinger S.J., Miller T.J.E., Heideman R.J., McGilp M.I. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006. Vol. 42. No 3. Pp. 658-667. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.872941>.

4. Bermúdez A., Gómez D., Salgado P. Eddy-Current Losses in Laminated Cores and the Computation of an Equivalent Conductivity. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 12. Pp. 4730-4738. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2005118>.

5. Радин В.И., Лондин Й., Розенкоп В.Д. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

6. Popovych O., Golovan I., Shevchuk S. and Listovshchik L. Means of Complex Design of the Electromechanical System of the Gravity Energy Storage of the WindPower Plant. *IEEE 8th International Conference*

on *Energy Smart Systems* (ESS), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 149-152. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969243>.

7. Мішин В.І., Каплун В.В., Чуєнко Р.М. Компенсовані асинхронні машини. К.: КНУТД, 2012. 221 с.

8. Вейц В.Л., Вербовой П.Ф., Кочура Б.Н. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронными двигателями. К.: Наук. думка, 1988. 272 с.

9. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання. *Техн. електродинаміка*. 2010. № 4. С. 25-32.

10. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

MODELING OF INDUCTION MOTORS IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS CONSIDERING STATOR IRON LOSSES

O.M. Popovych, I.V. Golovan

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: popovych1955@ukr.net; golovan_77@ukr.net.

A comparative study has been conducted on methods for accounting for the influence of losses in the stator iron of squirrel-cage induction motors on the operating parameters. A comparison was made between reference data and calculation results of the nominal mode parameters of an asynchronous motor without considering losses in the stator iron and with their consideration using equivalent resistances connected in parallel to the motor, as well as equivalent circuits of losses in the stator. The effect of the ratio of active and inductive components of the load of equivalent stator loss circuits on the results of mathematical modeling has been investigated. The study was carried out based on a universal mathematical model of an asynchronous motor of electromechanical systems with an arbitrary stator winding scheme. An algorithm for determining and adjusting the parameters of the stator loss circuits during the integration of the differential equations of electrical and mechanical balance of the asynchronous motor to a steady-state value has been developed, based on the values of losses in the stator iron (depending on the induction and frequency) and the effective value of the current of the equivalent circuit. To ensure solution stability, the use of an iteration coefficient and discretization of resistance adjustment has been justified. The application of stator iron loss circuits in the mathematical model of an asynchronous machine in generator mode has been justified, when the use of parallel connected equivalent resistances contradicts the machine's energy diagram. References 10, figure 1, table 1.

Key words: induction motor, operating mode, losses in stator iron, equivalent circuits.

1. Popovych O.M., Golovan I.V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>.

2. Diaz G., Gonzalez-Moran C., Arbolea P. and Gomez-Alexandre J. Analytical Interpretation and Quantification of Rotational Losses in Stator Cores of Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43. No 10. Pp. 3861-3867. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903382>.

3. Ionel D. M., Popescu M., Dellinger S.J., Miller T.J.E., Heideman R.J., McGilp M.I. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2006. Vol. 42. No 3. Pp. 658-667. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.872941>.

4. Bermúdez A., Gómez D., Salgado P. Eddy-Current Losses in Laminated Cores and the Computation of an Equivalent Conductivity. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 12. Pp. 4730-4738. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2005118>.

5. Radin V.I., Londin Y., Rozenknop V.D. Unified series of induction motors InterElectro. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 416 p. (Rus)

6. Popovych O., Golovan I., Shevchuk S. and Listovshchik L. Means of Complex Design of the Electromechanical System of the Gravity Energy Storage of the WindPower Plant. IEEE 8th International Conference on *Energy Smart Systems* (ESS), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 149-152. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969243>.

7. Mishyn V.I., Kaplun V.V., Chuyenko R.M. Compensated asynchronous machines. Kyiv: Kyivskiy Natsionalnyi universytet tekhnologii ta dyzainu, 2012. 221 p. (Ukr)

8. Veits V.L., Verbovoy P.F., Kochura B.N. Dynamics of controlled electromechanical drive with asynchronous motors. Kyiv: Naukova Dumka, 1988. 272 p. (Rus)

9. Popovych O.M. Mathematical model of an asynchronous machine of an electromechanical system for simulation and structural modeling. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No. 4. Pp. 25-32. (Ukr)

10. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Induction motors of the 4A series. Moskva: Energoizdat, 1982. 504 p. (Rus)

Надійшла 25.04.2024

ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗНИХ СТРУМОВИХ КОНТУРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГАРМОНІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

Р.С. Крищук*

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: dygogive@gmail.com.

Досліджується модель електромагнітного поля магнітоелектричного генератора з гладким циліндричним ротором та накладними постійними магнітами. Постійні магніти інтерпретуються комплексними амплітудами системи струмових контурів з гармонійним струмом. Метою роботи є розробка математичної моделі для розрахунку гармонійного магнітного поля магнітоелектричного генератора з постійними магнітами за допомогою заміни постійних магнітів фазними струмовими контурами з комплексними амплітудами струмів та дослідження її адекватності. Використано 3 варіанти модельного представлення постійних магнітів, що розміщені на поверхні магнітопроводу. Залежно від модельного представлення постійних магнітів розроблено дві динамічні моделі генератора і дві гармонійні моделі. Для кожної моделі записано рівняння електромагнітного поля. Показано приклад трифазної схеми струмових контурів ротора для моделювання електромагнітного поля магнітоелектричного генератора з комплексними амплітудами струмів. Виконано порівняння індукції магнітного поля, струму, напруги та електромагнітного моменту з трьома варіантами ширини магнітів відносно полюсної відстані. Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: математична модель, синхронний генератор, постійні магніти, електромагнітне поле.

Вступ. Магнітоелектричні генератори є важливим елементом сучасних електроенергетичних систем і широко використовуються для виробництва електроенергії, зокрема з використанням джерел відновлюваної енергії [1]. У роботі досліджуються моделі магнітоелектричного генератора радіального магнітного потоку з магнітопроводом з гладкою поверхнею, на якій розміщені постійні магніти. Струми в обмотці статора наводяться внаслідок наявності обертового змінного магнітного поля в проміжку між ротором та статором, що генерується змінним магнітним полем постійних магнітів ротора, що обертаються. Постійний магніт під час моделювання можна представити у вигляді еквівалентного соленоїда, струмові контури з постійним струмом якого розміщуються на місцях бокових граней постійних магнітів [1, 2].

Задля моделювання змінного в часі електромагнітного поля магнітоелектричного генератора використовуються динамічні моделі, у яких параметри залежать від змінної часу t [1, 3, 4]. Якщо електромагнітне поле має періодичний характер, то є доцільність моделювання електромагнітного поля з комплексними амплітудами гармонійних струмів [5]. Використання динамічної моделі вимагає завдання зміни кута повороту ротора в залежності від часу t . Розрахунок виконується багато разів для певного проміжку часу, що дає високу точність розрахунку, але при цьому вимагає більше обчислювальних ресурсів порівняно з розрахунком рівняння гармонійного електромагнітного поля з комплексними амплітудами величин, що характеризують електромагнітне поле. Для розв'язання рівняння магнітного поля можуть використовуватися різні методи: метод скінченних елементів [3], інтегральних перетворень [6, 5], вторинних джерел [7, 4] та інші.

Щоб виконати модельне представлення умовно нерухомого ротора з постійними магнітами і одержати змінне обертове магнітне поле постійних магнітів пропонується замінити рухомі постійні магніти нерухомими багатофазними струмовими контурами з комплексними амплітудами струмів.

Метою роботи є розробка математичної моделі для розрахунку гармонійного магнітного поля магнітоелектричного генератора з постійними магнітами за допомогою заміни постійних магнітів фазними струмовими контурами з комплексними амплітудами струмів та дослідження її адекватності.

© Крищук Р.С., 2024

* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Задля моделювання електромагнітного поля магнітоелектричного генератора використовується система рівнянь Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \mathbf{j}_s, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

а також матеріальні рівняння

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu \mathbf{H}_c, \quad \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2)$$

Тут матриці-вектори: \mathbf{H} – напруженість магнітного поля; \mathbf{j} – густина індукованого струму в електропровідних частинах; \mathbf{j}_s – стороння густина струму [8], яка протікає в обмотці статора і через зовнішнє електричне коло; \mathbf{E} – напруженість електричного поля; \mathbf{B} – індукція магнітного поля; \mathbf{H}_c – коерцитивна сила постійних магнітів; \mathbf{v} – швидкість. Також в (1) і (2) є параметри: t – час, μ – магнітна проникність, σ – електрична провідність.

Задля моделювання розподілу електромагнітного поля у двовимірній площині використовується векторний магнітний \mathbf{A} та електричний ϕ потенціали [9]

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } \phi. \quad (3)$$

Динамічна модель з постійними магнітами ротора. На рис. 1, а представлено двовимірний ескіз симетричної частини генератора в межах одного полюсу з постійним магнітом. Модель складається з площин: 1 – магнітопровід ротора, 2 – магнітопровід статора, 3 – постійний магніт, 4 – площини перерізів котушок обмотки статора. На границях з сусідніми полюсами застосовуються граничні умови симетричності $B_{in} = -B_{out}$. На основі рівнянь (1)–(3) складається рівняння електромагнітного поля відносно складової векторного магнітного потенціалу A_z [8]

$$\text{rot}_z \frac{\text{rot } A_z}{\mu} = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \sigma \text{grad}_z \phi + \sigma(\mathbf{v}_\varphi \times \text{rot}_z A_z) + \text{rot}_z H_c. \quad (4)$$

Тут A_z – векторний магнітний потенціал, H_c – коерцитивна сила постійного магніту, \mathbf{v}_φ – швидкість. В правій частині рівняння (4) присутні такі складові рівняння: $\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t}$ – індукована густина струму в електропровідних частинах; $\sigma \text{grad}_z \phi$ – стороння густина струму \mathbf{j}_s в електропровідних частинах, тобто густина струму, що протікає у зовнішньому електричному колі; $\sigma(\mathbf{v}_\varphi \times \text{rot}_z A_z)$ – індукована густина струму в електропровідних частинах, які мають швидкість \mathbf{v}_φ ; $\text{rot}_z H_c$ – магнітне поле постійних магнітів.

У моделі на рис. 1, а є електропровідною лише багатовиткова обмотка, де враховується лише стороння густина струму. Також в моделі генератора відсутні електропровідні частини зі швидкістю \mathbf{v}_φ . Отже, для моделі на рис. 1, а рівняння (4) запишеться таким чином:

$$\text{rot}_z \frac{\text{rot } A_z}{\mu} = -\mathbf{j}_s + \text{rot}_z H_c. \quad (5)$$

Обертове магнітне поле в повітряному проміжку створюється внаслідок багаторазового розрахунку рівняння (5) з

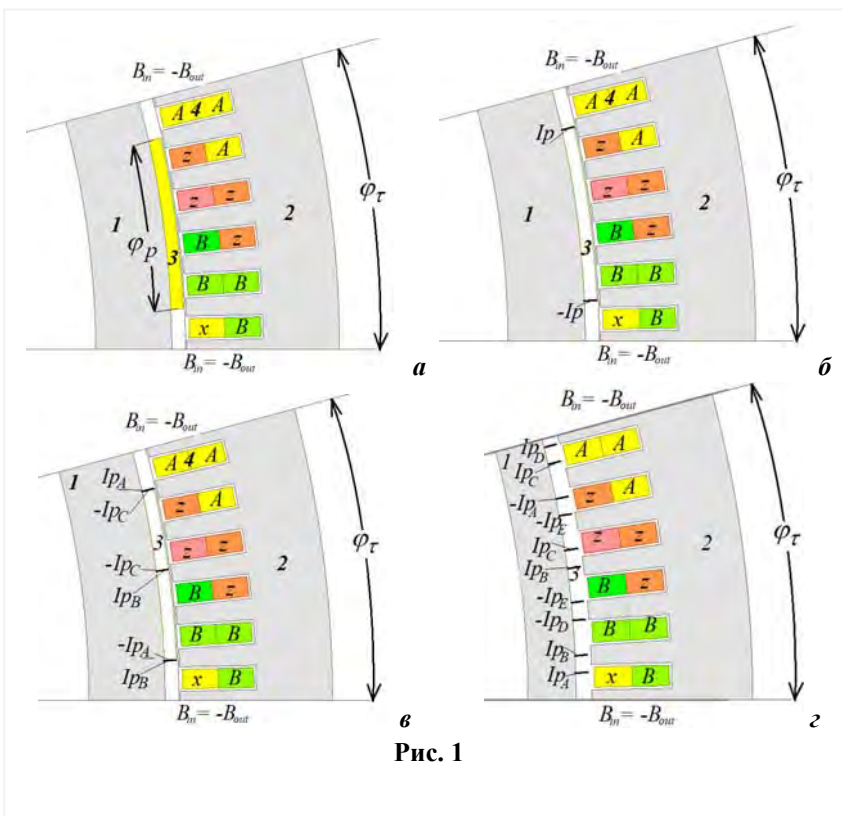


Рис. 1

поступовою зміною кута повороту ротора φ_r відносно статора по координаті φ для дискретного проміжку часу t [1]

$$\varphi_r [t] = \int_t \frac{2\pi n_1 [t]}{60} dt, \text{ рад} \quad (6)$$

де n_1 (об/хв) – частота обертання ротора, яка в загальному випадку може залежати від часу t .

В [1] використовується динамічна модель, у якій постійний магніт представлено двома струмовими контурами з постійним струмом (рис. 1, б). В такому випадку рівняння (5) для моделі на рис. 1, б запишеться наступним чином:

$$\text{rot}_z \frac{\text{rot } A_z}{\mu} = -j_s + I_p, \quad (7)$$

де I_p – струм у струмових контурах, що розрахований як добуток намагніченості або коерцитивної сили магніту H_c , та радіальної товщини h_p [1]

$$I_p = H_c h_p. \quad (8)$$

Модель з комплексними амплітудами струмових контурів ротора. Для гармонійного аналізу енергетичних показників у рівнянні магнітного поля (7) векторні величини замінюються комплексними амплітудами [8, 10]. Тоді рівняння (7) записується у вигляді

$$\text{rot}_z \frac{\text{rot } \hat{A}_z}{\mu} = -\hat{j}_s + \hat{I}_p, \quad (9)$$

де \hat{A}_z , \hat{j}_s , \hat{I}_p – відповідно комплексні амплітуди векторного магнітного потенціалу, густини струму в обмотці статора та струмових контурів ротора. Струмові контури \hat{I}_p є багатофазними для створення обертового магнітного поля в повітряному проміжку, оскільки ротор є нерухомий. Тобто, замість одного магніту використовуються m пар струмових контурів, які зміщені на величину $1/m$ полюсного кута φ_τ , а струми в цих контурах зміщені на $2\pi/m$ електричних градусів і записуються наступним чином:

$$\hat{I}_{pA} = 2/m \cdot h_p H_c e^{i\varphi_A}, \quad \hat{I}_{pB} = 2/m \cdot h_p H_c e^{i\varphi_B}, \quad \hat{I}_{pC} = 2/m \cdot h_p H_c e^{i\varphi_C}. \quad (10)$$

Електричні кути фаз еквівалентних струмових контурів:

$$\varphi_A = 0, \quad \varphi_B = \varphi_A + 2\pi/m, \quad \varphi_C = \varphi_A + 4\pi/m. \quad (11)$$

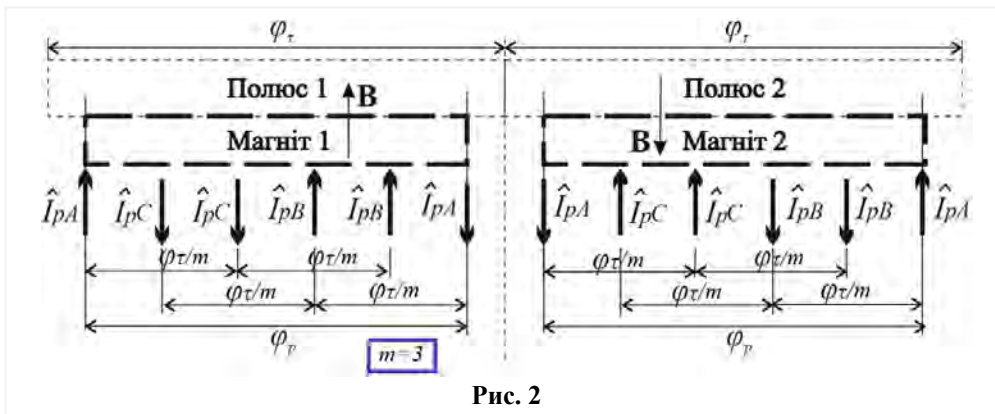


Рис. 2

На рис. 2 по азимутальній координаті показано розміщення постійних магнітів у межах однієї пари полюсів, а під ними показано відповідну схему розміщення трифазних ($m = 3$) струмових контурів \hat{I}_p (9), якими замінюються ці постійні магніти в гармонійній моделі. Струми \hat{I}_p ма-

ють позитивну (стрілка вгору) та негативну (стрілка вниз) полярність. Відповідно до схеми на рис. 2, можна записати фазні кути зміщення струмових контурів \hat{I}_p з позитивною та негативною полярністю. Кути струмів \hat{I}_p з позитивною полярністю для 3-х фаз

$$\varphi_{A+} = 0, \quad \varphi_{B+} = \varphi_{A+} + 2\varphi_\tau/m, \quad \varphi_{C+} = \varphi_{A+} + 4\varphi_\tau/m. \quad (13)$$

Кути з негативною полярністю для 3-х фаз

$$\varphi_{A-} = \varphi_{A+} + \varphi_p, \quad \varphi_{B-} = \varphi_{A-} + 2\varphi_\tau/m, \quad \varphi_{C-} = \varphi_{A-} + 4\varphi_\tau/m. \quad (14)$$

Залежно від відношення φ_p/φ_τ , деякі контури струмів можуть співпадати у просторі (рис. 1, в). На рис. 1, з показано 5-фазні струмові контури для порівняння з 3-фазними на рис. 1, в.

Отже, є чотири моделі генератора на рис. 1 і відповідні рівняння електромагнітного поля (5), (7) та рівняння (9) для рис. 1, в, з. Для порівняння енергетичних показників моделей задано такі параметри генератора, як в [1]: $p = 12$ пар полюсів, $q = 2$ пазів на полюс-фазу, обмотка статора двохшарова з вкороченим кроком $y = 5/6$, кількість витків в одному шарі обмотки $w = 25$, радіус магнітопроводу ротора $r_1 = 314,31$ мм, аксіальна довжина ротора та статора $l = 1$ м, товщина постійних магнітів $h_p = 4$ мм, проміжок між постійним магнітом та статором $\delta = 1$ мм, розміри пазів 25×8 мм, розміри поперечних перерізів котушок обмотки $11,7 \times 6,4$ мм, коерцитивна сила постійних магнітів $H_c = 890000$ А/м, частота обертання ротора $n_1 = 12$ об/хв (генератор перетворювача енергії морських хвиль). На кожній фазі трифазної обмотки статора задано активне навантаження $r_s = 80$ Ом, що включає опір провідників обмотки генератора та опір споживача потужності від генератора.

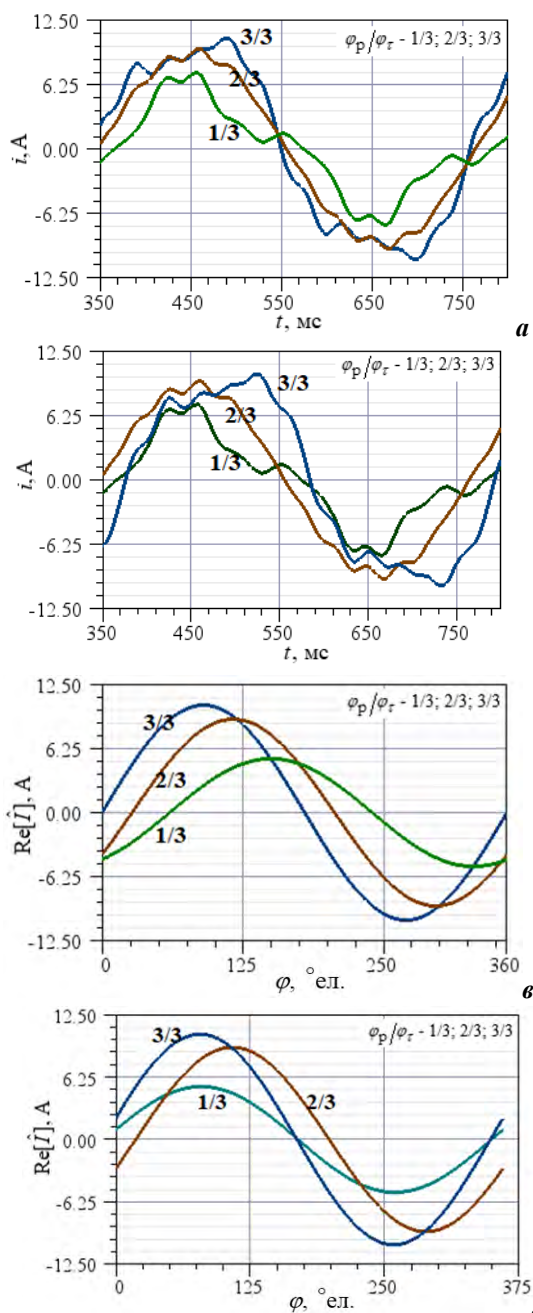


Рис. 3

Результати порівняння. На рис. 3 показано струми однієї з трьох фаз статора відповідних моделей, що представлені на рис. 1, розраховані методом скінченних елементів [3].

На розподіл індукції магнітного поля в повітряному проміжку впливають як зубці статора, так і відношення φ_p/φ_τ . Тому криві струму на рис. 3, а, б мають вигляд викривленої синусоїди або гармонічно спотвореної синусоїди. Струми в гармонійних моделях на рис. 3, в, з є комплексними амплітудами, мають вигляд чистої синусоїди в залежності від кута фази.

Для порівняння струмів гармонійних моделей на рис. 3, в, з та динамічних на рис. 3, а, б використовуються діючі і амплітудні значення струму (I_{dc} та I_m), напруги (U_{dc} та U_m), момент на валу ротора M_e , які занесено в таблицю. Криві струмів у динамічних моделях на рис. 3, а і 3, б майже однакові, струм і напруга мають відхилення від 0 до 5%, залежно від відношення φ_p/φ_τ . Момент – від 0 до 7%.

У разі використання гармонійних моделей (рис. 1, в, з), у яких відповідно 3 і 5 фаз струмових контурів, відхилення по електромагнітному моменту є більшим – до 9% (таблиця) від моделі на рис. 1, а. Порівнюючи діючі значення струму й напруги, відхилення становить до 8%, якщо ширина магніту більше половини ширини полюсної відстані (2/3 та 1/1). Якщо ширина магніту 1/3 від полюсної відстані, відхилення діючих значень струму й напруги становить 12% і 13% від моделі на рис. 1, а.

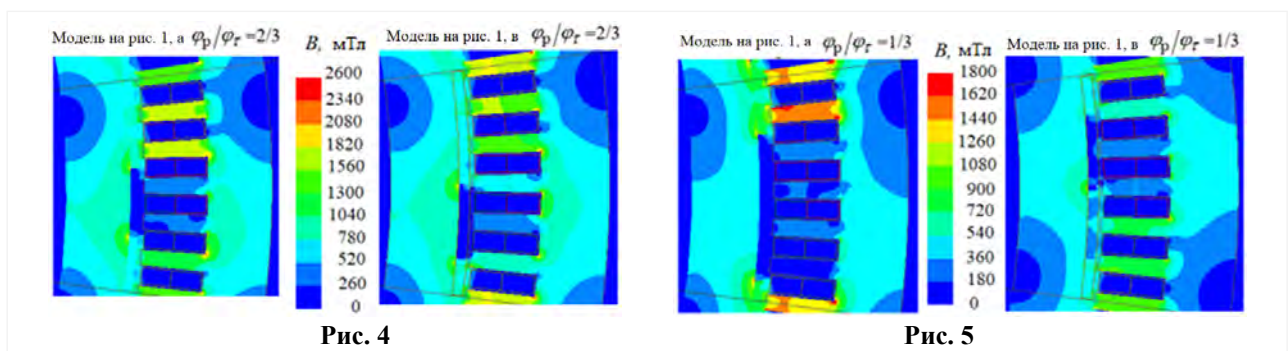
Якщо виконати порівняння гармонійних моделей на рис. 1, в і з, у яких струмові контури мають 3 і 5 фаз відповідно, то різниця спостерігається до 3% лише по електромагнітному моменту з шириною магнітів 1/3 (таблиця). Тому у разі використання гармонійної моделі достатньо використовувати 3-фазні струмові контури (рис. 1, в, рис. 2).

На рис. 4 показано розподіл індукції магнітного поля в динамічній моделі з магнітом (рис. 1, а) та в гармонійній моделі з трифазними струмовими контурами (рис. 1, в) за $\varphi_p/\varphi_\tau = 2/3$. Рисунок розподілу

індукції майже однаковий у динамічній та гармонійній моделях.

	Моделі магнітоелектричного генератора											
	Модель на рис. 1(а)			Модель на рис. 1(б)			Модель на рис. 1(в)			Модель на рис. 1(г)		
φ_p/φ_τ	1/1	2/3	1/3	1/1	2/3	1/3	1/1	2/3	1/3	1/1	2/3	1/3
M_e , кН·м	11.1	8.2	3.1	10.3	8.2	3.2	12.1	8.8	3.0	12.1	8.8	3.1
	100%	100%	100%	93%	100%	103%	109%	107%	97%	109%	107%	100%
I_{dc} , А	7.2	5.9	3.3	6.9	5.9	3.3	7.4	6.4	3.7	7.4	6.4	3.7
	100%	100%	100%	96%	100%	100%	103%	108%	112%	103%	108%	112%
U_{dc} , В	575	475	262	551	469	262	591	512	296	591	512	296
	100%	100%	100%	96%	99%	100%	103%	108%	113%	103%	108%	113%
I_m , А	10.7	9.6	7.3	10.2	9.6	7.3	10.4	9.1	5.2	10.4	9.1	5.3
	100%	100%	100%	95%	100%	100%	97%	95%	71%	97%	95%	73%
U_m , В	858	775	587	820	772	589	836	725	418	836	725	419
	100%	100%	100%	96%	100%	100%	97%	94%	71%	97%	94%	71%

На рис. 5 показано розподіл індукції магнітного поля аналогічно, але за $\varphi_p/\varphi_\tau = 1/3$. Навпроти



магніту, який займає 1/3 ширини полюсу, індукція магнітного поля сягає 1,6 Тл у двох зубцях статора (рис. 1, а). А в гармонійній моделі (рис. 1, в) максимальна індукція в зубцях статора до 1,0 Тл досягається у чотирьох зубцях. Тобто, в гармонійній моделі індукція магнітного поля хоч і менша, але це компенсується кількістю зубців з високим значенням індукції. Проте ширина магніту відносно полюсу 1/3 в цій роботі вибрана лише для перевірки адекватності моделі, а в реальних електричних машинах ширина магнітів більша 1/2 ширини полюсної відстані.

Висновок. Порівнюючи динамічну модель (рис. 1, а) з гармонійною (рис. 1, в, г), відхилення електромагнітного моменту становить 9%, 7%, 3%, а діючі значення струмів в обмотці статора відрізняються відповідно на 3%, 8%, 13% для відносної ширини магнітів відповідно 1/1, 2/3 та 1/3. Під час використання гармонійної моделі достатньо використовувати 3-фазні струмові контури, оскільки 3-фазна та 5-фазна гармонійні моделі показують однакові результати (таблиця). Якщо магніт займає 2/3 частину полюса (рис. 4) і більше, то розподіл індукції майже однаковий у динамічній та гармонійній моделях.

Роботу виконано по темі "Розвиток удосконалених електромеханічних та електромагнітних систем електростанцій та методів їх діагностики" ("Агрегат-3", державний реєстраційний номер 0122U000840).

1. Кондратенко І.П., Кришук Р.С. Математична модель магнітоелектричної машини. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 2. С. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.052>.
2. Rasmussen K.F., Davies J.H., Miller T.J.E., McGelp M.I., Oлару M. Analytical and numerical computation of air-gap magnetic fields in brushless motors with surface permanent magnets. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000. Vol. 36. No 6. Pp. 1547-1554. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.887205>.
3. COMSOL Multiphysics. Theory for the AC/DC Module. URL: https://doc.comsol.com/6.1/docserver/#!/com.comsol.help.acdc/acdc Ug_theory.05.01.html (дата доступу 27.05.2024).
4. Zhylytsov A.V., Lyktei V.V. Magnetic field calculation of brushless direct current motor with smooth stator by secondary sources method. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 7-10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.007>.
5. Кондратенко І.П., Кришук Р.С., Ращепкін А.П. Електромагнітні процеси в торцевій дугостаторній асинхронній машині з двошаровою обмоткою. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 34-40.

6. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 41-46.
7. Zhiltsov A., Sorokin D. The calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets. 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 02-05 September, 2015. Pp. 252-254. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333390>.
8. Вольдек А.И. Индукционные магнитогаидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
9. Карпов Ю.О., Ведмицький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 407 с.
10. Соколов С.В., Писаренко Л.Д., Журба В.О. Теорія електромагнітного поля та основи техніки НВЧ. Суми: СумДУ, 2011. 394 с.

APPLICATION OF PHASE CURRENT LOOPS FOR MODELING THE HARMONIC MAGNETIC FIELD OF A MAGNETOELECTRIC GENERATOR

R.S. Kryshchuk

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: dygogive@gmail.com.

The model of electromagnetic field of a magnetoelectric generator with a smooth cylindrical rotor and surface-mounted permanent magnets is investigated. Permanent magnets are interpreted using complex amplitudes of a system of current loops with harmonic currents. The aim of the study is to develop a mathematical model for calculating the harmonic magnetic field of a magnetoelectric generator with permanent magnets by replacing the permanent magnets with phase current loops with complex current amplitudes and to investigate its adequacy. Three variations of model representation of permanent magnets placed on the surface of the magnetic core are utilized. Depending on the model representation of permanent magnets, two dynamic generator models and two harmonic models have been developed. For each model, equations of the electromagnetic field are written. An example of a three-phase scheme of current loops of the rotor for modeling the electromagnetic field of the magnetoelectric generator with complex amplitudes of currents is presented. Comparison of the magnetic field induction, current, voltage, and electromagnetic torque is performed with three variations of magnet width relative to the pole pitch. References 14, figures 5, table 1.

Keywords: mathematical model, synchronous generator, permanent magnets, electromagnetic field.

1. Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S. Mathematical model of a magnetoelectric machine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 52-61 URL: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.052> (Ukr)
2. Rasmussen K.F., Davies J.H., Miller T.J.E., McGelp M.I., Olaru M. Analytical and numerical computation of air-gap magnetic fields in brushless motors with surface permanent magnets. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2000. Vol. 36. No 6. Pp. 1547-1554. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.887205>.
3. COMSOL Multiphysics. Theory for the AC/DC Module. URL: <https://doc.comsol.com/6.1/docserver/#!/com.comsol.help.acdc/acdc Ug theory.05.01.html> (available at 27.05.2024).
4. Zhyltsov A.V., Lyktei V.V. Magnetic field calculation of brushless direct current motor with smooth stator by secondary sources method. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 7-10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.007>.
5. Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S., Raschepkin A.P. Electromagnetic processes in the axial arc-stator induction machines with double layer winding. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 6. Pp. 34-40. (Ukr)
6. Vyshtak T.V., Karlov O.N., Kondratenko I.P., Raschepkin A.P. Magnetic field of winding stator currents of a synchronous motor with hollow rotor. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 5. Pp. 41-46. (Rus)
7. Zhiltsov A., Sorokin D. The calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets. 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 02-05 September, 2015. Pp. 252-254. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333390>.
8. Voldyck A.I. Induction magnetohydrodynamic machines with liquid-metal working fluid. Leningrad: Energiya, 1970. 272p. (Rus)
9. Karpov Yu.O., Vedmitsky Yu.G., Kukharchuk V.V. Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field. Vinnytsia: UNIVERUM-Vinnytsia, 2008. 407 p. (Ukr)
10. Sokolov S.V., Pysarenko L.D., Zhurba V.O. Theory of Electromagnetic Fields and Fundamentals of Microwave Engineering. Sumy: Sumy State University, 2011. 394 p. (Ukr)

Надійшла 18.03.2024

Остаточний варіант 25.06.2024

ОБЕРТАЛЬНИЙ МОМЕНТ БЕЗПАЗОВОГО МОМЕНТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА МАСИВНИМ МАГНІТОПРОВОДОМ СТАТОРА

Є.В. Ісаєв, І.С. Петухов*, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: igor_petu@ukr.net.

Розглянуто властивості масивного магнітопроводу статора безпазового моментного двигуна з постійними магнітами. Зазначено, що масивний магнітопровід за умов низької швидкості обертання має деякі переваги перед традиційним шихтованим магнітопроводом. Ці переваги полягають у здешевленні конструкції, її компактності та швидкості підготовки виробництва. Сформульовано припущення математичної моделі та обмеження вхідних даних. Обрано модель статичного магнітного поля з рухомих електропровідних середовищем. Двовимірну модель реалізовано в інтерфейсі «Magnetic fields» комплексу «COMSOL Multiphysics». Отримано максимальні значення обертального моменту та винайдено оптимальну кількість пар полюсів. Використано метод розрахунку обертального моменту за втратами на вихрові струми у магнітопроводі. Розраховано спадання обертального моменту зі збільшенням швидкості обертання ротора. Для уточнення результатів двовимірного моделювання за допомогою тривимірної моделі отримано коефіцієнти корекції максимального моменту. Бібл. 5, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: моментний двигун, постійні магніти, масивний магнітопровід, вихрові струми, електричні втрати.

Вступ. Моментний двигун (МД) – це електрична машина, режим роботи якої характеризується низькою частотою обертання, а також, можливо, в деякі проміжки часу зупинкою зі збереженням на валу номінального значення обертального моменту. Якщо зниження швидкості обертання може бути досягнуто застосуванням редуктора, то забезпечення статичного режиму із створенням номінального моменту на валу протягом завданого терміну потребує проектування електричної машини на саме такий режим незалежно від наявності чи відсутності редуктора.

З появою постійних магнітів на основі самарію та, особливо, неодиму зріс інтерес до використання невеликих безпазових електроприводів безпосередньої дії. Безпазова конструкція, хоча і має дещо нижчі масогабаритні показники у порівнянні з традиційною пазовою конструкцією, простіша технологічно та має меншу пульсацію обертального моменту. Тому електроприводи на базі безпазових машин використовуються у системах спостереження, стеження та супроводження [1]. Для безпазових електричних машин не треба дотримуватися відношення полюс/паз, що є обов'язковим для машин з пазами в шихтованому магнітопроводі статора [2]. В багатьох випадках вимоги до простоти конструкції та її дешевизни є вирішальними факторами. Це стосується випуску великої партії пристроїв за умови невеликих виробничих витрат або створення невеликої партії пристроїв в умовах швидкої підготовки виробництва. Невелика частота обертання і, відповідно, невелика частота магнітного поля в магнітопроводі обумовлюють помірні втрати в сталі від вихрових струмів. Урахування цього факту дає змогу виготовити магнітопровід статора (фактично ярмо, оскільки розглядається безпазова конструкція) масивним без використання традиційної для промислової частоти шихтованої конструкції [3]. Виконання ярма статора масивним викликає необхідність аналізувати вплив вихрових струмів на обертальний момент двигуна, який неминуче зменшується зі зростанням швидкості обертання. Додатковим фактором, що зменшує виробничі витрати, є застосування винятково магнітів стандартної прямокутної форми.

Тому **метою даної роботи** обрано дослідження впливу масивного ярма статора на характеристики безпазового моментного двигуна циліндричного типу з постійними магнітами прямокутної форми за умов швидкості обертання до 60 об./хв.

© Ісаєв Є.В., Петухов І.С., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-1416-1174>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Структура машини та математична модель. Як об'єкт дослідження розглянемо двигун циліндричного типу з радіально намагніченими магнітами, що розташовані на поверхні внутрішнього ротора. Зважаючи на низьку частоту обертання ротора, таке розташування магнітів технологічно обумовлене. Для дослідження зробимо такі припущення, що не впливають на результати розрахунку обертового моменту:

- струм живлення вважається синусоїдальним;
- явище гістерезису в магнітопроводі статора нехтується;
- оскільки частота обертання і, зрештою, частота зміни магнітного поля невелика, а також великий повітряний проміжок (пази та зубці відсутні), втратами в магнітах системи збудження і масивному магнітопроводі ротора нехтується;
- провід обмотки вважається досить тонким і втратами від вихрових струмів в ньому теж нехтується;
- вважається, що двигун живиться від системи керування, яка забезпечує зсув 90 електричних градусів між кутовим напрямком результуючої МРС статора та напрямком поля ротора.

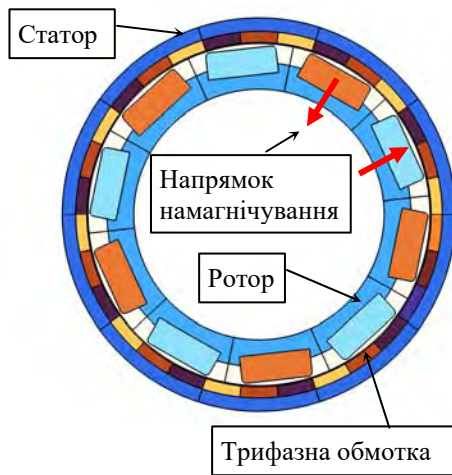


Рис. 1. Поперечний переріз активної зони

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр, D_a	88 мм
Осьова довжина, L_a	45 мм
Висота ярма статора, h_{ys}	3,0 мм
Висота шару обмотки, h_{ws}	2,5 мм
Технологічний повітряний проміжок, δ	0,5 мм
Висота магніту, h_{mag}	5,0 мм
Висота ярма ротора, h_{yr}	6,0 мм
Кутовий розмір магніту, α_m (електричні градуси)	140
Матеріал магніту	BMN-42EH/ST
Щільність струму обмоток	5 А/мм ²
Коефіцієнт заповнення міддю	0,5

терфейс «Magnetic fields» програмного комплексу "COMSOL Multiphysics", що враховує рух електропровідного середовища [4]. Задля розрахункового дослідження обмежимося моделюванням двовимірного поля у поперечному перерізі. Двовимірне моделювання не враховує послаблення магнітного поля в торцевих областях ротора, так званий, кінцевий ефект. Таким чином отримуємо значення мо-

Поперечний переріз активної зони машини, що розробляється в Інституті електродинаміки, наведено на рис. 1. Магніти обрано прямокутного перерізу з радіальним намагнічуванням. Хоча виконання магнітів з круглою поверхнею, що обернена до повітряного проміжку, дає змогу отримати дещо більшу магнітну індукцію, така конфігурація магнітів суттєво збільшує вартість конструкції [1]. Геометричні розміри активної зони та інші дані двигуна наведено в таблиці. Слід відзначити, що в безпазових електричних машинах повітряним проміжком є сума технологічного проміжку та шару обмотки, що в сумі складає 3 мм. Зважаючи на вказані розміри, висоту магніту 5 мм було обрано такою, щоб в ідеальному випадку (нескінченні радіус машини та активна довжина) забезпечити максимальну індукцію 0,7... ,8 Тл.

Основним параметром, що підлягає дослідженню у відповідності до мети, є паразитний момент від дії вихрових струмів в статорі та його вплив на основний момент двигуна. Окрім цього важливим параметром є число пар полюсів. Від числа пар полюсів за заданої частоти обертання ротора залежить частота живлення обмотки, а також, внаслідок використання прямокутних магнітів, повітряний проміжок вздовж осі намагнічування магніту (рис. 2), який суттєво збільшується за меншої кількості полюсів.

Максимальний момент, що може створити двигун за умов заданої густини струму, можна визначити в статичному режимі. Оскільки вихрові струми в елементах магнітопроводу ротора нехтуються, магнітне поле в області ротора та обмотки статора є магнітостатичним. Задля моделювання вихрових струмів статора доцільно розраховувати поле в рухомій системі координат ротора. В цьому випадку можна вважати середовище циліндричної області магнітопроводу статора таким, що обертається відносно осі машини, і застосувати для моделювання поля в цій області ін-

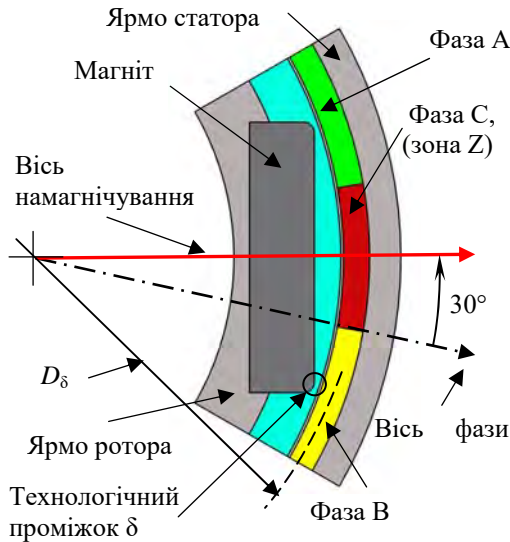


Рис. 2 Поперечний переріз полюсного поділу ($p=3$, вісь фази А відстає від осі намагнічування на 30 електричних градусів)

товій системі координат (x, y) будуть мати вигляд

$$\begin{cases} v_x = -\omega_R y \\ v_y = \omega_R x \end{cases} \quad (4)$$

Поперечний переріз полюсного поділу шестиполюсного двигуна наведено на рис. 2. За зовнішніми поверхнями ротора та статора було розташовано області з повітряним середовищем відповідних розмірів (за статором було розташовано також шар з нескінчених елементів [4]), які на рисунку не показано. Задля визначення максимального моменту будемо вважати ротор зупиненим. Трифазна система струмів, що формується системою керування і живить обмотку статора, має в складі початкові фази ψ_I, ψ_{I0}

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin(p\omega_R t + \psi_{I0} + \psi_I) \\ i_B &= I_m \sin(p\omega_R t + \psi_{I0} + \psi_I - 2/3\pi), \\ i_C &= I_m \sin(p\omega_R t + \psi_{I0} + \psi_I - 4/3\pi) \end{aligned} \quad (5)$$

де p – число пар полюсів. У прикладі розташування фаз обмотки, зображеного на рис. 1, початкова фаза ψ_{I0} повинна складати -30 електричних градусів задля забезпечення випередження вектором МРС вектору намагнічування ротора на 90 електричних градусів.

Обчислення втрат в масивному електропровідному середовищі неможливо без врахування нелінійності його характеристики намагнічування. Для апроксимації цієї характеристики використовувався монотонна аналітична дробово-раціональна функція, що апроксимує відповідну залежність відносної магнітної проникності μ від магнітної індукції, а саме

$$\mu = 1 + \frac{\mu_{\max}}{1 + (\|\mathbf{B}\| / B_s)^m}, \quad (6)$$

де μ_{\max} – магнітна проникність ненасиченого середовища; B_s – значення індукції, близьке до точки перегинання характеристики намагнічування; m – коефіцієнт. Для конструкційної сталі значення μ_{\max} , B_s та m становлять відповідно 1000; 1,44 та 6,6 і забезпечують похибку апроксимації не більше 3% в діапазоні 1,0 ... 1,8 Тл, де вплив насичення на розподіл магнітного поля та вихрових струмів найбільш значний.

Результати обчислень. Момент для статичного положення ротора обчислювався за тензором поверхневого натягу Максвелла за алгоритмом, що входить до інтерфейсу «*Magnetic fields*» [comsol]. За пробну поверхню обиралися частини поверхонь магніту та магнітопроводу ротора, що є прилеглими до повітряного проміжку. Слід зазначити, що обчислення моменту можна виконувати і за пове-

менту більше, ніж реальне. Але скоригувати отримані результати можна згодом, змодельовавши окремо тривимірне поле у спрощеній постановці задачі.

В комплексі «*COMSOL Multiphysics*» магнітне поле розраховується відносно незалежної змінної – векторного магнітного потенціалу, що в двовимірній постановці має одну компоненту $\mathbf{A} = (0, 0, A_z)$. Система рівнянь стаціонарного магнітного поля з урахуванням руху середовища має вигляд

$$\nabla \times \mathbf{H} = J_z + \sigma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = f(\|\mathbf{H}\|) \frac{\mathbf{H}}{\|\mathbf{H}\|}, \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (3)$$

де ∇ – оператор Гамільтона; \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; J_z – щільність струму обмотки; σ – електропровідність сталі статора; \mathbf{v} – вектор швидкості середовища; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції; $f(\|\mathbf{H}\|)$ – функція, що відображає криву намагнічування сталі $B=f(H)$. Якщо позначити кутову швидкість ротора ω_R , складові вектору швидкості \mathbf{v} у рівнянні (1) у декар-

рхнею елементів статора, які прилегли до повітряного проміжку. Залежність моменту від фази ψ_l наведено на рис. 3. З графіків видно, що оптимальною кількістю пар полюсів є 6. Числам пар полюсів 5 та 7 відповідають однакові значення максимального моменту, а з чисел 4 та 8 кращим є останнє. Ця тенденція пояснюється зростанням середнього повітряного проміжку зі зменшенням числа пар полюсів, що можна простежити на рис. 2 для випадку $p = 3$. До того ж, зі зростанням кількості полюсів зростає відношення активної довжини машини до полюсного поділу, що зменшує вплив кінцевого ефекту [1, 5].

Обертальний момент в режимі руху обчислювався за активними втратами в сталі статора. Для цього питомі втрати від вихрових струмів p_{Loss} інтегрувалися по перерізу ярма статора Ω_s за умов фіксованої частоти обертання. Тоді обертальний момент визначиться шляхом ділення втрат на кутову частоту обертання ротора

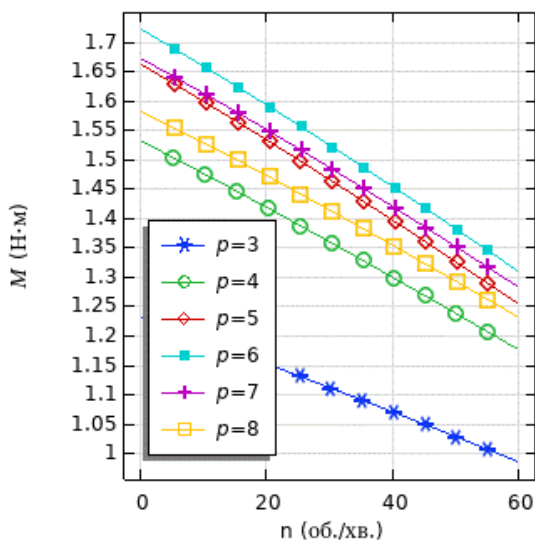


Рис. 4. Обертальний момент в залежності від швидкості обертання

було виконано розрахунок максимального статичного моменту з урахуванням впливу скінченої довжини ротора. Моделювання виконувалося для області, що відображає два полюсних поділи половини в осьовому напрямку активної зони машини з обмоткою однієї фази статора (рис. 5). При цьому струм в обмотці підвищувався у 1,5 рази, що моделювало максимальне значення МРС трифазної обмотки і відповідне насичення магнітопроводу. Обмотку було розташовано таким чином, щоб її поле було ортогонально полю магнітів (було спрямовано по лінії симетрії між магнітами, рис. 5), що забезпечувало отримання максимального моменту.

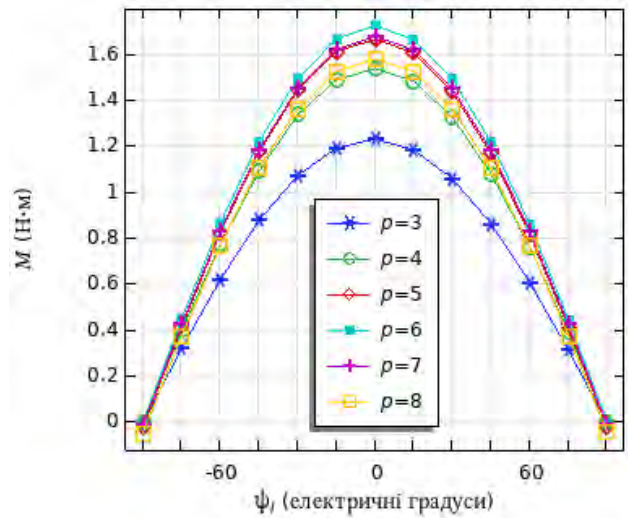


Рис. 3. Обертальний момент в залежності від фази струму живлення

$$M_{Loss} = \frac{1}{\omega_R} \int_{\Omega_s} p_{Loss} d\Omega. \quad (6)$$

Результуючий обертальний момент в рухомому режимі обчислювався як різниця між максимальним моментом та моментом від втрат на вихрові струми (6). Графіки залежності результуючого моменту від швидкості обертання n наведено на рис. 4. Лінійний характер графіків моменту відображає той факт, що втрати на вихрові струми квадратично залежать від частоти зміни поля. З вигляду графіків витікає висновок, що оптимальність полюсності машини, визначена за статичним моментом (рис. 3), зберігається і в режимі руху. Також існує незначна тенденція більш повільної втрати обертального моменту зі зростанням швидкості у багатополюсних ($p = 7, p = 8$) виконаннях машини. Таким чином, відносне зменшення обертального моменту двигуна за рахунок втрат в масивному ярмі статора для полюсності машини $p = 5 - 8$ та частоти обертання 60 об./хв. складає приблизно $1,25/1,65 \approx 0,75$.

Задля оцінки похибки двовимірного моделювання

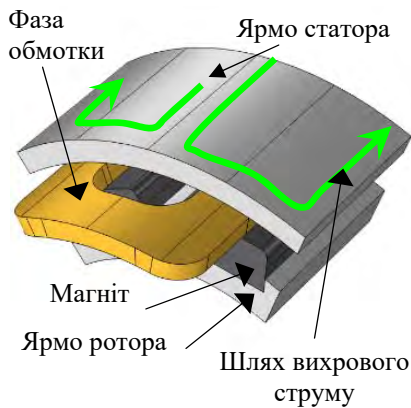


Рис. 5. До моделювання впливу скінченної довжини

Оскільки насичення враховано підвищеною МРС, а середовища в інших підобластях розрахункової моделі є лінійними, можна стверджувати, що моменти від сумісної дії трьох фаз будуть адекватними дії однієї фази з підвищеним струмом. Вищезазначене відноситься до статичного режиму. В динамічному режимі у порівнянні з двовимірним моделюванням з'являється похибка, викликана впливом вихрових струмів в статорі. Тривимірне змінне магнітне поле не моделювалося. Але можна довести, що використовуючи розв'язок двовимірного моделювання ми отримаємо верхню оцінку похибки. Шлях вихрових струмів в ярмі статора схематично показано на рис. 5. Зауважимо, що магнітне поле неодимових магнітів набагато – у 20 і більше разів – перевищує поле від обмотки, і вихровими струмами від поля обмотки можна нехтувати. Коефіцієнт збільшення опору на шляху вихрових струмів можна оцінити приблизно як $(1 + \tau/L_a)$, де τ – полюсний поділ. Збільшення опору тягне за собою зменшення втрат від вихрових струмів та, як наслідок, зменшення паразитного обертового моменту.

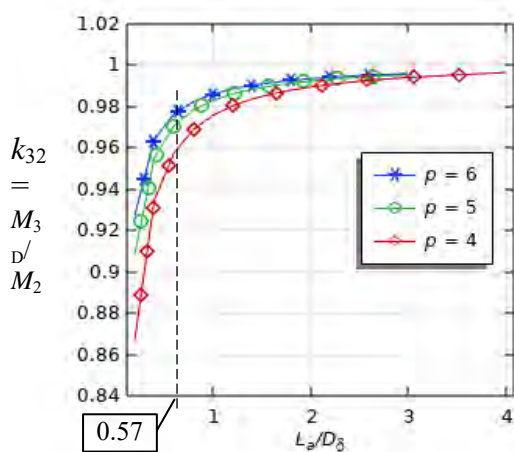


Рис. 6. Вплив скінченної довжини магнітопроводу

Результати розрахунку поправочного коефіцієнту зменшення максимального моменту $k_{32} = M_{3D}/M_{2D}$, визначеного за двовимірним розв'язком в залежності від відносної довжини машини L_a/D_δ , наведено на рис. 6. Значимо, що діаметр D_δ є середнім діаметром по повітряному проміжку, який включає технологічний проміжок, що відділяє ротор від статора, та шар обмотки (рис. 2). Графічні матеріали дають змогу чисельно оцінити похибку визначення моменту обертання безпазового двигуна з масивним ярмом статора заданої геометрії. Так, відносна довжина машини з геометричними даними (див. таблицю) складає $L_a/D_\delta = 45/79 \approx 0,57$, що дає змогу оцінити похибки двовимірного моделювання (рис. 6). Звідки можна зробити висновок, що для дванадцятиполюсної машини коефіцієнт зниження моменту k_{32} за рахунок скінченної довжини у порівнянні з результатами двовимірного моделювання складає не менше 0,98, що цілком припустимо для практики.

Висновки. В конструкціях безпазових трифазних моментних мікродвигунах за умов низької частоти обертання можливе застосування масивного сталевго ярма статора. Таким чином можна зменшити витрати на виробництво і прискорити його підготовку.

З використанням програмного пакету "COMSOL Multiphysics" розроблено нову математичну модель визначення електромагнітного моменту за результатами розрахунку втрат в масивному ярмі на основі розв'язання польової задачі.

Максимальний статичний момент для моментного двигуна циліндричного типу з відношенням активної довжини до середнього діаметра сумарного повітряного проміжку не менше 0,6 досягається за умов 5...7 пар полюсів. До швидкості обертання 60 обертів на хвилину обертовий момент спадає лінійно від свого максимального значення і для вказаної швидкості обертання за умов оптимальної кількості пар полюсів (5...7) становить близько 75% від свого максимального значення.

Для двигунів циліндричного виконання з оптимальною кількістю пар полюсів зі значенням відношення активної довжини до середнього діаметра повітряного проміжку не менше 0,6 оцінки моменту, зроблені на основі двовимірного польового аналізу, мають похибку, що не перевищує 2%.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробити наукові основи та принципи побудови магнітоелектричних мехатронних модулів для спеціалізованих систем автоматичного керування» («Мехатрон»), КПКВК 6541030.

1. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetoelectric torque motors. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 63. Pp. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>.
2. Jia S., Qu R., Li J., Fan X., Zhang M. Study of Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Generators With Solid Rotor Back Iron and Different Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. No 2. Pp. 1369–1379. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2490618>.
3. Paulides J.J.H., Meessen K.J., Lomonova E.A. Eddy-Current Losses in Laminated and Solid Steel Stator Back Iron in a Small Rotary Brushless Permanent-Magnet Actuator. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. No 11. Pp. 4373–4376. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001996>.
4. COMSOL multiphysics modeling and simulation software. URL: <https://www.comsol.ru/documentation> (accessed at 15.04.2024).
5. Sahdev S.K. *Electrical Machines*. Cambridge University Press, 2017. 980 p.

TORQUE OF A PERMANENT MAGNET SLOTLESS TORQUE MOTOR WITH SOLID STATOR BACK IRON

Ye.V. Isayev, I.S. Petukhov

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: igor_petu@ukr.net.

The properties of the solid magnetic core of the stator of a slotless torque motor with permanent magnets are considered. It is noted that the solid stator under the conditions of low rotation speed has some advantages over the traditional laminated magnetic circuit. These advantages consist in the cost reduction of the design, its compactness and the low time of production preparation. The mathematical model's assumptions and the input data's limitations are formulated. A model of a static magnetic field with a moving electrically conductive medium is chosen. The two-dimensional model is implemented in the "Magnetic fields" interface of the "COMSOL Multiphysics" software. The maximum torque values were obtained and the optimal number of pole pairs was found. The method of calculating the torque based on eddy current losses in the magnetic medium is used. The decrease in torque with increasing rotor speed is calculated. The correction coefficients of the maximum moment were obtained to correct the results of two-dimensional modelling using a three-dimensional model. References 5, figures 6, tables 1.

Keywords: torque motor, permanent magnets, solid magnetic core, eddy currents, electrical losses.

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 20.05.2024

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

В.В. Гребеніков^{1*}, докт. тех. наук, **В.Б. Павлов^{1**}**, докт. тех. наук,
Р.В. Гамалія^{1*}**, канд. ф-мат. наук, **В.С. Попков²**, **С.Г. Бондаренко³**

¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: elm1153@gmail.com.

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Академіка Кржижановського, 3, Київ, 03142, Україна.

³ТОВ «Водород ТМ»,

пр. Берестейський, 52/2, Київ, 03057, Україна.

Наведено результати чисельного дослідження електричних двигунів з постійними магнітами циліндричного типу. Показано, що заміна в стандартному асинхронному двигуні короткозамкненого ротора на ротор з постійними магнітами дає можливість отримати істотне збільшення питомої потужності електричної машини. Проведено чисельні дослідження та аналіз характеристик електродвигуна з тангенціально намагніченими неодимовими магнітами для п'яти конфігурацій магнітної системи ротора. Показано, що задля забезпечення максимальних питомих характеристик в електродвигунах для електромобілів необхідно враховувати їздовий цикл та здійснювати рідинне охолодження електродвигуна. Також виконано теплові розрахунки з урахуванням їздового циклу NEDC і встановлено, що застосування рідинного охолодження дає змогу забезпечити охолодження неодимових магнітів і обмоток до температури нижче критичної у разі підвищеного струму в обмотках. Характеристики досліджуваних електродвигунів розраховано в пакетах програм Simcenter MagNet і Simcenter MotorSolve. Бібл. 4, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: чисельне моделювання, електродвигун для електромобіля, постійні магніти, їздовий цикл, робочі характеристики, тепловий розрахунок.

Вступ. Сьогоднішній рівень розвитку технологій дає змогу створювати та серійно виробляти практично повний спектр електромобілів, що охоплює всі сторони авторинку, зокрема: персональні засоби пересування; легкові електромобілі та позашляховики; мікроавтобуси; автобуси; вантажні автомобілі; спецтехніка.

Найважливішим агрегатом електромобіля є електродвигун і системи його живлення та управління. Електродвигуни електромобілів постійно вдосконалюються з погляду споживання електроенергії, надійності, зниження витрат на експлуатацію. Отже, поряд з розробкою нових джерел первинної енергії – акумуляторних батарей, суперконденсаторів і електрохімічних генераторів – світові виробники значну увагу приділяють підвищенню ефективності електродвигунів.

Відзначимо також, що великий різновид електротранспортних засобів накладає специфічні умови на електрообладнання, яке застосовується для їхнього створення. Зокрема, для застосування в транспортних засобах подвійного призначення (цивільного та військового) потрібні високопродуктивні електродвигуни з високим питомим крутним моментом, високою ефективністю в широкому діапазоні робочих швидкостей [1–4], а також високоефективні силові транзисторні перетворювачі та комп'ютерні системи управління. Для управління електродвигуном розроблено інвертор на основі трифазного транзисторного модуля фірми *Infineon* зі стрічковими охолоджувачами структурами. Перемикання транзисторів інвертора здійснюється за сигналами датчика положення ротора, несуча частота – 10кГц.

Жорсткі експлуатаційні та технічні вимоги, що пред'являються для тягових електродвигунів як легкових, так і великовантажних електромобілів, викликають необхідність ретельного вивчення поведінки електродвигуна протягом усього їздового циклу. Зокрема, основна проблема в процесі проектування тягового двигуна електромобіля полягає в тому, що максимальний крутний момент

© Гребеніков В.В., Павлов В.Б., Гамалія Р.В., Попков В.С., Бондаренко С.Г., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>; ** <https://orcid.org/0000-0003-0565-265X>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-5729-7891>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

потрібен під час розгону з низькою швидкістю обертання, в той час як двигун працює в звичайному режимі за більш низьких значеннях крутного моменту та більш високій швидкості обертання. Крім того, під час типового їздового циклу у процесі руху під ухилом вгору суттєво зростає момент на валу електродвигуна. Щоб забезпечити цей підвищений момент, необхідно збільшувати струм в обмотках електродвигуна, а отже необхідно виконувати тепловий розрахунок електродвигуна з урахуванням повітряної або рідинної системи охолодження та підвищеної щільності струму в обмотках. При цьому система охолодження має бути спроектована так, щоб забезпечувати ефективне охолодження активних елементів конструкції електродвигунів, забезпечуючи їхній нагрів не вище за допустиме. Особливо це важливо для постійних магнітів, нагрівання яких вище за допустиму температуру призводить до їхнього розмагнічування. Наприклад, магніти марки N40 втрачають свої властивості у разі нагрівання понад 80°C, магніти марки N40SH мають температурну стабільність до 150°C. У результаті потрібен ретельний розрахунок електродвигуна, включаючи умови руху згідно з заданим їздовим циклом та з урахуванням нагріву елементів конструкції двигуна.

За об'єкт дослідження обрано електродвигун з постійними магнітами для невеликого транспортного засобу (електромобіля), який може експлуатуватися в міських та замських умовах. У трансмісії використовується один електродвигун, з'єднаний із передніми або задніми колесами через диференціал. Диференціальне передатне відношення досить високе, щоб збільшити необхідний момент електродвигуна, що приводить до зменшення його розмірів та маси. Однак такий вибір диференціального передавального числа збільшує потребу в широкому діапазоні робочих швидкостей двигуна задля досягнення максимальної швидкості транспортного засобу. Необхідний крутний момент двигуна та робоча швидкість розраховуються за допомогою фундаментальних аналітичних рівнянь навантаження транспортного засобу [5].

Метою роботи є аналіз характеристик електричної машини в режимі двигуна з найпоширенішою конфігурацією магнітної системи ротора, а саме з постійними магнітами тангенціальної намагніченості; визначення основних параметрів електродвигуна з постійними магнітами (розміри магнітної системи статора та ротора, число витків обмоток статора, напруга живлення, електромагнітний момент), що забезпечують рух електромобіля із заданими габаритними розмірами та масою з урахуванням їздового циклу; розрахунок температури нагріву елементів електродвигуна з урахуванням системи охолодження для оптимального варіанта конструкції. Конфігурація магнітної системи виконана на базі статора стандартного асинхронного двигуна AIP132MB8 з висотою осі обертання 132 мм та кількістю пар полюсів $p = 4$.

Розрахунок параметрів електродвигуна з урахуванням їздового циклу. Їздовий цикл, який описує рух транспортного засобу в місті та за містом – робота двигуна в режимі мінімальної частоти обертання, рушання з місця та розгін до певної швидкості, гальмування двигуном з однієї швидкості до іншої. Європейський їздовий цикл NEDC (*New European Driving Cycle*) складається із двох частин. Перша частина циклу – міський їздовий цикл UDC (*Urban Driving Cycle*) складається з чотирьох однакових блоків кожен тривалістю 195 с. Відповідно до цього циклу транспортний засіб на певних ділянках розганяється до швидкості 18-32-50 км/год. Замський рух описується окремим блоком EUDC (*ExtraUrban Driving Cycle*) тривалістю 400 с із чергуванням швидкості руху 70-50-100-120 км/год [5].

Як вхідні дані для розрахунку електродвигуна прийнято параметри автомобіля середнього класу. Розрахунок обертаючого моменту на валу електродвигуна та частота обертання ротора мають визначатися для двох значень маси електромобіля: $m = 1800$ кг, $m = 2000$ кг і двох значень передаточного відношення редуктора: $G_r = 5.33$ та $G_r = 7.33$. Для коефіцієнта редукції $G_r = 5.33$ прийнято значення діаметра колеса $D_v = 700$ мм, що відповідає маркуванню шин 215/65R16. Для коефіцієнта редукції $G_r = 7.33$ застосовується шини 225/75R16 з діаметром колеса $D_v = 755$ мм. З урахуванням наведених параметрів та сил, що діють на електромобіль під час руху, було визначено максимальну частоту обертання ротора та максимальний момент на валу ротора електродвигуна для кутів нахилу дороги $\alpha = 0$ та $\alpha = 12\%$. У всіх розрахунках коефіцієнт аеродинамічного опору прийнятий рівним 0.33, ефективна площа поперечного перерізу електромобіля – 1.9 м², коефіцієнт опору коченню – 0,018.

На рис. 1 наведено залежності моменту від частоти обертання валу електродвигуна під час руху електромобіля згідно з їздовим циклом (NEDC), які розраховано під час руху автомобіля в гору з кутом нахилу дороги $\alpha = 12\%$ та на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$). Згідно з нормативними документами максимальний кут нахилу дороги не повинен перевищувати 12%. На рис. 1 наведено

графіки для варіантів (а), (б), (в) і (г). Аналізуючи дані графіків на рис. 1, слід зазначити, що максимальне значення моменту, що дорівнює $M_{\max} = 281.3$ Нм, спостерігається для варіанта (а), а

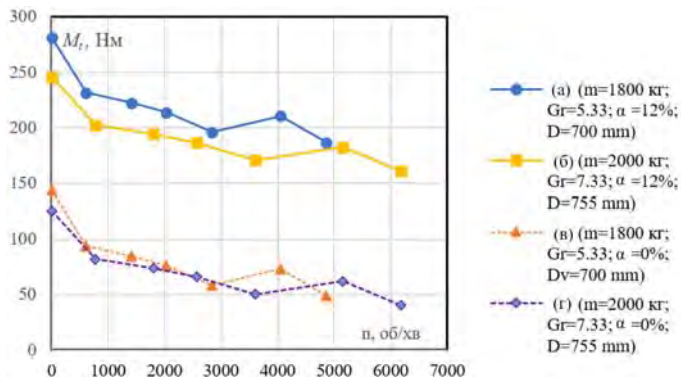


Рис. 1

використано статор стандартного асинхронного двигуна АР132МВ8, основні технічні характеристики якого такі: номінальна напруга під час з'єднання обмоток статора в «зірка/трикутник» $U_n = 380/220$ В, номінальний струм $I_n = 8/14$ А, номінальна потужність $P_n = 5.5$ кВт, номінальна частота обертання $n = 710$ об/хв, ККД = 78.5%, $\cos \varphi = 0,77$. Статор має такі розміри: зовнішній діаметр $D_a = 225$ мм,

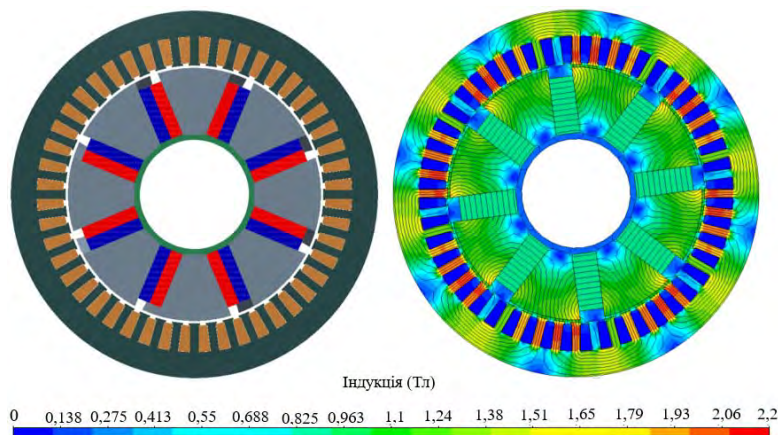


Рис. 2

розрахунку робочих характеристик електродвигуна: напруга живлення $U_n = 400$ В постійного струму (аккумуляторна батарея); форма струму живлення – синусоїдальна, з'єднання обмоток – «трикутник». На рис. 3 показано робочі характеристики електродвигуна з розмірами магнітів (160×35×10 мм). На цьому рисунку також зображено графіки пікових моментів для їздового циклу NEDC. Щоб отримати значення електромагнітного моменту, що перевищує на 10% найбільше пікові значення моменту, яке для варіанта (в) за кута ухилу $\alpha = 0\%$ дорівнює $M = 143.6$ Нм, струм має дорівнювати $I_n = 190$ А. Щільність струму при цьому струмі дорівнює $J = 13$ А/мм².

Максимальне пікове значення електромагнітного моменту за кута нахилу дороги $\alpha = 12\%$ дорівнює $M = 281.3$ Нм для варіанту (а). Щоб отримати значення електромагнітного моменту, який дещо перевищує це значення, лінійний струм має дорівнювати $I_n = 350$ А, що відповідає щільності струму $J = 19$ А/мм². Результати розрахунку показують, що робочі характеристики електродвигуна забезпечують рух електромобіля відповідно до заданого їздового циклу як під час руху на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$), так і під час руху з максимальним ухилом ($\alpha = 12\%$). Щоб отримати значення електромагнітного моменту, яке перевищує значення моменту навантаження для всього їздового циклу, необхідно, щоб число витків в пазу кожної обмотки було рівним $W = 3$ за з'єднання обмоток у "трикутник". Однак при цьому числі витків проти-ЕРС порівнюється з напругою живлення, що дорівнює $U_n = 400$ В за частоти обертання $n = 5000$ об/хв.

максимальне значення частоти обертання, що дорівнює $n = 6180.7$ об/хв, – для варіантів (б) і (г). Під час проєктування електродвигуна для електромобіля ці значення параметрів приймають за базові, тобто електродвигун має забезпечувати момент не нижче $M_{\max} = 290$ Нм, а кількість витків обмоток статора має бути підібрана так, щоб зниження потужності й моменту було після частоти обертання ротора $n = 6200$ об/хв.

Чисельні дослідження електродвигуна із постійними магнітами на базі статора асинхронного двигуна. Під час проєктування було використано статор стандартного асинхронного двигуна АР132МВ8, основні технічні характеристики якого такі: номінальна напруга під час з'єднання обмоток статора в «зірка/трикутник» $U_n = 380/220$ В, номінальний струм $I_n = 8/14$ А, номінальна потужність $P_n = 5.5$ кВт, номінальна частота обертання $n = 710$ об/хв, ККД = 78.5%, $\cos \varphi = 0,77$. Статор має такі розміри: зовнішній діаметр $D_a = 225$ мм, внутрішній діаметр статора $D_i = 158$ мм, число пазів $Z_p = 48$, висота пазів $h_s = 17.6$ мм, довжина активної частини осердя $l_{Fe} = 160$ мм. Величина повітряного проміжку між статором і ротором дорівнює $\delta = 1.5$ мм. Конфігурацію магнітної системи однієї із досліджуваних моделей (розміри магнітів $D \times B \times Ш$ (160×35×15 мм) та картина магнітного поля за щільності струму $J = 10$ А/мм² показано на рис. 2. Для зменшення зубцевого моменту на роторі виконується скіс полюсів на одну зубцеву поділку [6].

Початкові дані для

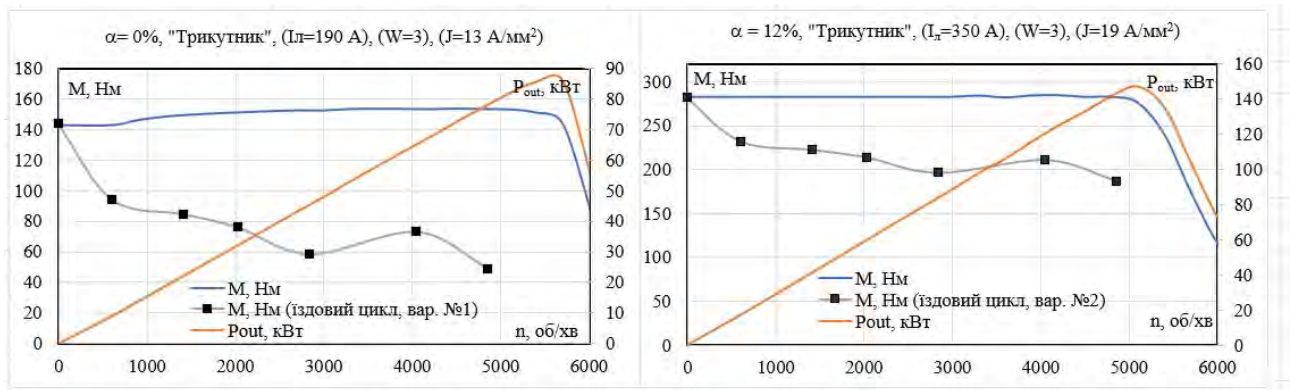


Рис. 3

Для з'єднання в «трикутник» було розраховано робочі характеристики електродвигунів ще для трьох значень розмірів постійних магнітів, а також для магнітів марки N38. Магніти цієї марки істотно дешевші, ніж магніти N40SH, проте верхня межа по температурі у цих магнітів становить 80°C , що недостатньо для двигуна, пікова потужність якого більша за 140 кВт. Тому не можна рекомендувати магніти цієї марки для значної пікової потужності. У таблиці наведено порівняльні характеристики електродвигунів на основі статора AP132MB8 для трьох типорозмірів постійних магнітів. Для всіх варіантів число витків в пазу дорівнює $W = 3$. Кожен виток складається з декількох паралельних елементарних провідників.

Параметр	№1	№2 (оптим.)	№3	№4	№5
Тип магнітів	N40SH	N40SH	N38	N40SH	N40SH
Маса магнітів, кг	5.04	3.36	3.84	1.92	3.84
Розміри магнітів (Д×В×Т), мм	(160×35×15)	(160×35×10)	(160×40×10)	(160×40×5)	(160×40×10)
Максимальний момент, Нм	306	292	300	289	303
Потужність, кВт за $n = 3000$ об/хв	96.2	91.4	93.8	90.7	94.6
Потужність, кВт за $n = 4860$ об/хв	153	146	149	140	149
КПД, % за $n = 3000$ об/хв	96.1	96.3	96.1	95.6	96
Питома потужність (P_{out}/m_{pm}), кВт/кг за $n = 4860$ об/хв	30,3	43,5	38,8	72,9	38,8

Аналізуючи дані, наведені в таблиці і на рис. 3, слід зазначити, що всі варіанти забезпечують електромагнітний момент, що перевищує момент їздового циклу. Найбільша питома потужність (відношення потужності до маси магнітів) для варіанта № 4, однак за товщини магнітів $h_{pm} = 5$ мм важко забезпечити їхню міцність, тобто під час обертання ротора велика ймовірність руйнування магнітів (поява тріщини). Тому як рекомендований пропонується варіант № 2 з розмірами магнітів (160×35×10) мм. Слід зазначити, що варіант № 3 також забезпечує необхідний електромагнітний момент, проте магніти цієї марки втрачають свої властивості за температури 80°C , що не прийнятно для електричної машини, пікова потужність якої більше 140 кВт. Для оптимального варіанта № 2 за кута нахилу дороги $\alpha = 12\%$ і частоти обертання ротора $n = 4860$ об/хв необхідно забезпечити момент не менше $M = 285$ Нм. У цьому випадку лінійний струм має дорівнювати $I_n = 350$ А та щільність струму – $J = 19$ А/мм².

Чисельні дослідження температури нагріву електродвигуна. Розрахунок температури елементів конструкції електродвигуна здійснювався з урахуванням системи охолодження для оптимального варіанта № 2 з розмірами магнітів (160×35×10) мм. Тепловий розрахунок виконувався для їздового циклу NEDC для двох систем охолодження – повітряної та рідинної. У повітряній системі охолодження повітря за допомогою вентилятора направляється вздовж зовнішнього корпусу електричної машини. Вихідні дані для повітряного охолодження: орієнтація машини – горизонтальна; напрям примусової конвекції – аксіальний; швидкість охолоджувального потоку – $V_{flow} = 5$ м/с; початкова температура – $T = 20^{\circ}\text{C}$.

Рідинна система охолодження складається з каналів, розташованих рівномірно всередині зовнішнього корпусу електричної машини та зорієнтованих уздовж осі обертання ротора. Вихідні дані для теплового розрахунку такі: тип каналів, вбудованих в корпус – аксіальні; кількість каналів охолодження – $n_k = 36$; форма каналів – кругла; діаметр каналів – 3 мм; продуктивність циркуляційного насоса – $Q = 2$ л/хв; початкова температура на вході до каналів охолодження – 20 °С. На рис. 4 показано графіки нагріву обмоток і магнітів для повітряного охолодження за значеннях лінійних струмів $I_{л} = 190$ А для їздового циклу NEDC і руху на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$). Із цих графіків випливає, що усталена температура обмоток $T_{обм} = 48^\circ\text{C}$, магнітів – $T_{ПМ} = 47^\circ\text{C}$,

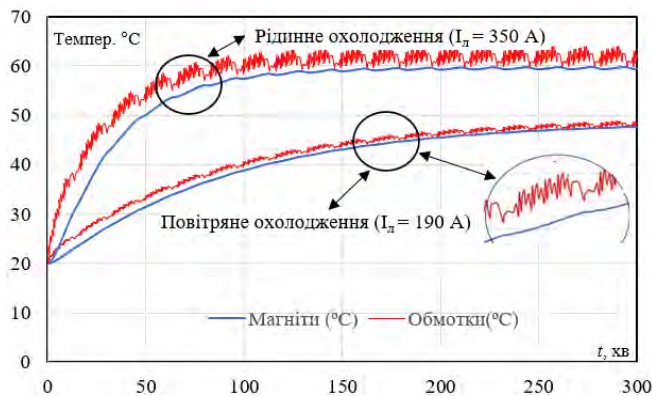


Рис. 4

тобто для цього режиму руху повітряне охолодження забезпечує нагрівання обмоток і магнітів не вище допустимого.

На рис. 4 також наведено графіки нагріву обмоток і магнітів для рідинного охолодження при значенні лінійних струмів $I_{л} = 350$ А, що відповідає щільності струму $J = 19$ А/мм² та їздовому циклу NEDC за кута нахилу дороги ($\alpha = 12\%$). Слід зазначити, що за рідинного охолодження ні обмотки, ні магніти не нагріваються понад допустиму температуру ($T_{обм} = 62^\circ\text{C}$, $T_{ПМ} = 59^\circ\text{C}$), хоча нагрів розраховано для випадку, коли електромобіль переміщується в гору з нахилом ($\alpha = 12\%$) протягом 120 хв.

На рис. 5 показано картину теплового поля для повітряного (рис. 5, а) та рідинного (рис. 5, б) охолодження електродвигуна, з якої випливає, що за значень лінійних струмів $I_{л} = 350$ А найбільш нагрітими елементами є обмотки та їхні лобові частини й постійні магніти. Таким чином, результати розрахунку показують, що за збільшеній щільності струму в обмотках можна реалізувати задане значення електромагнітного моменту, що забезпечує рух електромобіля відповідно до заданого їздового циклу та максимального кута нахилу дороги.

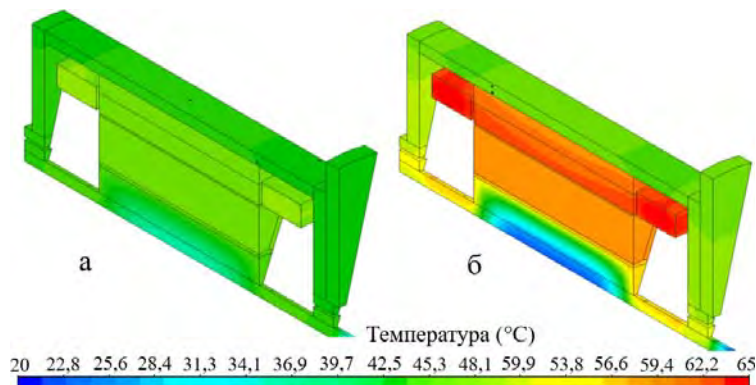


Рис. 5

Висновки. У результаті чисельних досліджень встановлено, що заміна короткозамкнутого ротора на ротор з постійними магнітами дає змогу отримати суттєве збільшення питомої потужності порівняно зі стандартним асинхронним двигуном AIP132MB8 та застосувати

модернізований електродвигун як привод електромобіля середнього класу.

У результаті теплових розрахунків з урахуванням їздового циклу NEDC встановлено, що застосування рідинного охолодження дає змогу забезпечити охолодження неодимових магнітів і обмоток до температури нижче критичної за підвищеного струму в обмотках.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток наукових основ і розробка принципів побудови електромеханічних перетворювачів енергії з постійними магнітами та магнітними редукторами», (шифр МАГРЕД), державний реєстраційний номер 0120U002006, КПКВ 6541050.

- Günther S., Ulbrich S., Hofmann W. Driving cycle-based design optimization of interior permanent magnet synchronous motor drives for electric vehicle application. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia, Italy, 18-20 June 2014. Pp. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2014.6872108>.

2. Gobbi M., Sattar A., Palazzetti R., Mastinu G. Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review. *Applied Energy*. 2024. Vol. 357. Art no 122496. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>.
3. Sarigiannidis A.G., Beniakar M.E., Kladas A.G. Fast Adaptive Evolutionary PM Traction Motor Optimization Based on Electric Vehicle Drive Cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014. Vol. 66. No 7. Pp. 5762-5774. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2631161>.
4. Ramesh P., Lenin N.C. High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles — Comprehensive Review Based on Material Technology. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55. No 11. Art no 0900121. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2929145>.
5. Martynushev N.V., Malozyomov B.V., Sorokova S.N., Efremenkova E.A., Qi M. Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle Considering Various Driving Cycles. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Art no 2586. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11112586>.
6. Grebenikov V.V., Priymak M.V. Design of the electric motor with permanent magnets for electric vehicle according the driving cycle. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.05.065>.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF PERMANENT MAGNET MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLES

V.V. Grebenikov¹, V.B. Pavlov¹, R.V. Gamalia¹, V.S. Popkov², S.G. Bondarenko³

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: elm1153@gmail.com.

²Institute of Materials Science Problems named after I.M. Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine,

3, Akademika Krzhizhanovskoho Str., Kyiv, 03142, Ukraine.

³LLC "Vodorod TM",

52/2, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

The results of numerical investigation of electric motors with permanent magnets of cylindrical type are presented. It is shown that replacement of a squirrel-cage rotor in a standard induction motor by a rotor with permanent magnets allows to obtain a significant increase in the specific power of the electric machine. Numerical investigations and analysis of characteristics of the electric motor with tangentially magnetized neodymium magnets for five configurations of the rotor magnetic system are carried out. It is shown that to ensure maximum specific characteristics in electric motors for electric vehicles it is necessary to take into account the driving cycle and to carry out liquid cooling of the electric motor. Thermal calculations taking into account the driving cycle of NEDC are also performed and it is established that the use of liquid cooling allows to provide cooling of neodymium magnets and windings to a temperature lower than critical at increased current in the windings. Characteristics of the investigated electric motors are calculated in Simcenter MagNet and Simcenter MotorSolve software packages. References 4, figures 5, tables 1.

Keywords: numerical modeling, electric motor for electric car, permanent magnets, driving cycle, performance characteristics, thermal calculation.

Надійшла 25.04.2024
Остаточний варіант 06.06.2024

SMART-МОНІТОРИНГ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

О.В. Кириленко^{1*}, академік НАН України, Б.С. Стогній^{1**}, академік НАН України,
С.П. Денисюк^{2***}, докт. техн. наук, М.Ф. Сопель^{1****}, докт. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

² НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: spdens@ukr.net

Показано, що трансформація енергетичного сектора на основі побудови нових архітектур енергетичних систем потребує сумісного розгляду трьох шарів двостороннього енергоінформаційного обміну: економічного, інформаційно-керуючого та фізичного (енергетичного), а функціонування сучасних електроенергетичних систем зумовлює застосування моніторингу процесів з розширеними функціональними можливостями. Для такого інтелектуального моніторингу, визначеного як Smart-моніторинг, охарактеризовано процедури моніторингу першого та другого рівня, зокрема з врахуванням вимірювання із зміною роду сигналу, оперування з інформацією з синтаксичною, семантичною та прагматичною адекватністю, здійснення діагностування з ідентифікацією та прогнозуванням. Показано, що Smart-моніторинг в електроенергетиці на рівні середніх та низьких напруг (систем розподілу та споживання) має формуватися як технологічна платформа діагностування, аудиту, керування, диспетчерування, енергоменеджменту електроенергетичних систем, формування сучасних енергетичних ринків. Бібл. 32, рис. 2.

Ключові слова: електроенергетична система, інтелектуальний моніторинг, енергоінформаційний обмін, процедури моніторингу, технічні та економічні показники.

Вступ. Глобальний перехід від енергетичних систем на основі викопного палива до низьковуглецевих і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), проголошений як енергетичний перехід, визначається трьома складовими, так званими 3D: декарбонізацією (переходом до вуглецево-нейтральної енергетики); децентралізацією (переходом до розподіленої енергетики); диджиталізацією/цифровізацією (переходом до цифрових технологій в енергетиці) [1]. Науково-інноваційною базою такого переходу на початку ХХ ст. стала концепція Smart Grid [2, 3] та розроблена в Національному інституті стандартів і технології США (NIST) Архітектурна Модель Smart Grid (Smart Grid Architecture Model, SGAM) з виділенням функціональних зон, доменів та шарів взаємодії [4].

На сьогодні інтеграція диспетчеризованих та недиспетчеризованих ВДЕ в енергосистему, широке застосування накопичувачів електроенергії, електромобілів та механізмів керування попитом на електроенергію у споживача, який вже став активним, зумовлює поєднання на системному рівні трансформації способів виробництва, розподілу та споживання енергії з цифровою трансформацією [5, 6]. Поєднання технологій Інтернету речей (IoT) з розподіленими енергетичними системами дозволило сформувати концепцію Інтернет енергії (IoE), що є значною еволюцією в керуванні генерацією, розподілом та споживанням енергії, їх балансування за рахунок створення оцифрованої та динамічної гнучкої енергетичної системи [7, 8, 9]. Фактично IoE є системою систем (System of Systems, SoS), архітектура якої будується на особливому об'єднанні трьох систем: системи формування, контролю виконання та оплати

© Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-3610-7670> , ** <https://orcid.org/0000-0001-9651-4177> ,

*** <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680> , **** <https://orcid.org/0000-0002-3438-5848>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

смарт-контрактів Transactive energy (TE); системи міжмашинної взаємодії та обміну керуючими впливами між енергетичними комірками та енергетичним обладнанням Internet of Things (IoT); системи режимного керування, підтримання балансу потужності та забезпечення статичної і динамічної стійкості енергосистеми Neural Grid (NG) [8].

Реалізація інтелектуального керування двосторонніми потоками електроенергії в IoE має здійснюватися за рахунок однорангових енергетичних транзакцій між її користувачами, де енергетична транзакція – акт взаємодії двох і більше суб'єктів мікроенергосистеми – Microgrid (наприклад, енергетичних комірок) [7, 8]. Така взаємодія складається з трьох шарів енергоінформаційного обміну: економічного (фінансово-договірного), інформаційно-керуючого та фізичного (електричного) [7, 8]. Перспективною архітектурою реалізації IoE є створення нових цифрових енергетичних хмарних платформ, коли задачі системної оптимізації енергетичних процесів та інформаційної взаємодії переносяться у хмарне середовище з використання паралельних обчислень та штучного інтелекту [7].

Як інноваційне рішення формування нової архітектури енергетичних систем запропоновано концепцію Energy Cloud – отримання цінності для бізнесу за допомогою революційних енергетичних платформ [11]. Комбінація фізичного обладнання та активів, програмного забезпечення, продуктів та послуг, а також мережевих акторів визначили наступні складові платформи Energy Cloud: Integrated DER, Building2Grid, Transportation2Grid, Internet of Energy, Transactive Energy, Neural Grid та Smart Cities. Ці складові формуються на злитті сучасних проривних технологій та створюють нові бізнес-моделі, які підтримують багатосторонній обмін цінностями. Щоб успішно керувати потужністю розподільної мережі та оптимізувати використання існуючої мережевої інфраструктури, запропоновано створити платформу «оркестрування» електромережі (Grid Orchestration), що означає активну диспетчеризацію місцевих ресурсів, від зарядних пристроїв для електромобілів і інтелектуальних термостатів до акумуляторів на підстанціях і промислових навантажень [12, 13]. Платформа «оркестрування мережі» поєднує чотири ключові можливості в одному інтерфейсі: поінформованість про електромережу, прогнозування, керування розподіленими енергетичними ресурсами (PER), аналіз планування [12–14].

Звичайно, що застосування широкого спектру технологій IoT, а також їхній розвиток під час оцінки двонаправлених потоків енергоінформаційної взаємодії IoE в новій архітектурі енергетичних систем зумовлює необхідність розвитку теорії моніторингу в енергетиці, зокрема, формування моніторингових процедур з розширеними функціональними можливостями [7, 8, 11, 13, 15, 16].

Такий моніторинг має стосуватися як технологічних процесів, так і бізнес-процесів, враховувати властивості емерджентності систем (неможливості зведення властивостей системи до суми властивостей її компонентів). Особливо він є актуальним під час реалізації задач енергетичної трансформації згідно сучасних концепцій Smart Grid, IoE та Energy Cloud на регіональному (децентралізованому) рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення, що працюють на середній та низькій напрузі, де задачі моніторингу та керування мають найбільш повно відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування таких систем [7, 9–11, 17].

Метою статті є розвиток теорії моніторингу сучасних інтелектуальних електроенергетичних систем із врахуванням особливостей їх нових гнучких архітектур та принципів інформаційної взаємодії, що поєднують як технологічні, так і бізнес-процеси.

1. Загальна характеристика процесу моніторингу

Ще у 1972 р. Теодор Джордж Параскевакос під час роботи з Boeing у Хантсвілі, (Алабама, США) розробив систему датчиків моніторингу, яка використовувала цифровий зв'язок [18, 19]. Власне поняття «моніторингу» в його прикладному розумінні увійшло в наукову літературу в 70-х роках ХХ століття. У 1972 р. в Стокгольмі пройшла конференція з охорони навколишнього середовища під егідою ООН, де вперше виникла необхідність домовитися щодо визначення поняття «моніторинг» [20].

Здійснювати моніторинг (*monitor*) – багатозначне поняття, яке спочатку означало наставляти, радити, застерігати, умовляти. Поняття «*monitor*» (від лат. нагадує, наглядає) має вже найближче до сучасного розуміння – стеження за якимись об'єктами або явищами. Стало загальноновизнаним, що моніторинг визначається як постійне спостереження за будь-яким об'єктом (процесом) з метою виявлення в ньому кількісних та якісних змін [21, 22].

Головна мета моніторингу – «знімати показники» стану об'єкта спостереження і виявляти розбіжності з плановими (або виявляти тенденції розвитку й передбачати майбутні стани) [21–23]. У найбільш узагальненому вигляді моніторинг і оцінку стану визначають як зворотний зв'язок, що дає

зможу з'ясувати: чи відповідає плану фактична «траєкторія» руху до мети; чи досягнуті бажані проміжні й кінцеві результати.

Основа моніторингу – це інформаційні процедури, за допомогою яких отримується кількісна або якісна, у тому числі лексографічна, інформація про властивості об'єкта моніторингу та його стан. При цьому обробка інформації включає операції збирання, введення, записування, перетворення, зчитування, зберігання, реєстрація та потребує свого розвитку з урахуванням таких категорій як кількість та якість, їх взаємоперетворення [23]. Основними задачами традиційного моніторингу є: спостереження за станом об'єкта, оцінка і прогноз його стану, визначення ступеня впливу на функціонування об'єкта, виявлення факторів і джерел впливу [23]. Тут єдність, взаємозв'язок і взаємозалежність якості та кількості виражаються в понятті міра.

В залежності від потреб і мети споживача одержуваної моніторингової інформації можливі чотири випадки реалізації базових процедур моніторингу і сформованих ними рішень [5, 21–23]. **Перший** випадок – моніторингова інформація повинна бути надана немоніторинговим інформаційним системам негайно і на місці її одержання, тобто на об'єкті моніторингу, для швидкого виконання певних дій на цьому об'єкті. У **другому** випадку моніторингова інформація може бути необхідною також для її використання людиною (оператором, диспетчером, черговим, керівником та ін.). **Третій** випадок, коли є затребуваним відкладене в часі використання інформації або на місці одержання, або іншому місці. **Четвертий** випадок передбачає, що моніторингова інформація необхідна не в місці одержання, а в іншому, віддаленому місці для негайного або відкладеного використання.

Відмінності моніторингу в електроенергетиці, у порівнянні з іншими сферами застосування визначаються своєрідністю і різноманітністю фізичних явищ в електроенергетиці, безперервністю основного технологічного процесу та балансом між генеруванням і споживанням електричної енергії тощо [23, 24]. Основні завдання традиційного моніторингу в електроенергетиці можна визначити наступним чином:

- негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією в необхідному, інколи досить малому реальному часі автоматичного керування (автоматичного регулювання, автоматики, релейного захисту, стеження та ін.);
- негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією автоматизованого та ручного оперативного-диспетчерського керування;
- накопичення даних, створення баз даних, баз знань, архівів;
- проведення ретроспективного (тенденції, напрями, оцінки розвитку) та поточного (спостереження, контроль, діагностика, розпізнавання образів) аналізу ситуацій з оцінкою стану об'єктів моніторингу;
- організація передачі, обміну моніторинговою інформацією між об'єктами та суб'єктами ієрархічної структури, що мають відношення до технологічних процесів в електроенергетиці.

Як приклад моніторингу в енергетиці можемо визначити моніторинг споживання енергетичних ресурсів (енергомоніторинг) – комплекс заходів, спрямований на отримання, створення бази даних щодо енергоспоживання об'єктів та їх обробку, для виявлення випадків відхилення споживання [24]. При цьому основними перевагами енергомоніторингу є: автоматичне сповіщення та раннє сповіщення про будь-яку нестандартну поведінку (можна сповістити менеджера через SMS, пошту тощо); автоматичне визначення потенціалу економії споживання завдяки автоматизованому механізму аналізатора піків споживання електроенергії; динамічна оцінка ефективності експлуатації будівлі (усього комплексу будівель разом з окремими будівлями, секторами/зонами тощо); встановлення та регулярний моніторинг ключових показників ефективності/цілей у сфері сталого розвитку та енергоефективності. Згідно стандарту ISO 50001 енергетичний моніторинг є одним із основних інструментів енергоменеджменту і призначений для контролю за споживанням енергетичних ресурсів.

2. Моніторинг централізованих енергосистем. Втілення принципу інтегральної організації моніторингу в традиційній (централізованій) електроенергетиці означає створення єдиного інформаційного поля на окремих електроенергетичних об'єктах моніторингу та єдиного інформаційного простору в об'єднаних чи єдиних енергосистемах країни чи декількох країн (глобальний моніторинг) [23, 25]. При цьому інформація розглядається як оброблені, організовані та пов'язані дані, що породжують зміст (значення) (згідно стандарту ISO 5127:2017). Ефективність використання інформації визначаються показниками її якості, зокрема:

- *точністю*, обумовлена ступенем її близькості до реального стану об'єкта, процесу, явища тощо;
- *актуальністю*, визначається ступенем збереження цінності інформації в момент її використання; цей показник стосується інформації, яка змінюється в часі;
- *достовірністю*, яка визначається її здатністю відображати існуючі об'єкти з необхідною точністю; одиницею вимірювання достовірності може служити довірна ймовірність необхідної точності;
- *доступністю* для сприйняття користувачем, що забезпечується виконанням відповідних процедур її отримання.

Наведемо характеристики процедур добре відомого моніторингу в електроенергетиці [23, 25, 26].

Моніторинг зі спостереженням стану. Базові процедури моніторингу.

- **Підрахунок.** Здійснюється операція лічби первинної інформації про технологічні процеси в електроенергетиці.

- **Вимірювання.** Одержується кількісна первинна інформація про технологічні процеси в електроенергетиці за рахунок прямого вимірювання (вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду).

Моніторинг із спостереженням та оцінюванням стану. Цей тип моніторингу включає три базові процедури: *контроль, діагностування та розпізнавання образів*. На відміну від процедур першого типу, вони дають не кількісну, а якісну інформацію.

Базові процедури моніторингу.

- **Контроль.** В основу процедури контролю покладено елементарне вимірювання (поділ шкали вимірювання на два значення), одержується тільки якісна інформація (елементарне вимірювання з простою двозначною шкалою, отримання одного біту інформації). Перевіряється, чи значення величин (параметрів), що підлягають контролю, знаходяться в межах заданих норм, чи поза ними.

- **Діагностування.** Отримання і оцінка діагностичної інформації, застосування діагностичних моделей і алгоритмів прийняття рішень з підвищення надійності та ресурсу електроенергетичних систем; визначення значень параметрів системи, що характеризують її стан.

- **Розпізнавання образів.** Здійснюється класифікація об'єктів з кластерним аналізом. Не включає комерційний облік енергії, оскільки він визначається економічним, а не технологічним призначенням.

Системні процедури моніторингу.

- **Індикація.** Відображення визначеної інформації на фізичному пристрої відображення. Передбачає спостереження, фіксацію, контроль, характеристики та оцінку стану і стадій розвитку різних процесів, об'єктів для встановлення та контролю залежностей від зміни умов у часі.

- **Реєстрація.** Запис, фіксація фактів або явищ з метою їх обліку та надання їм офіційного статусу.

- **Передача інформації.** Здійснюється переміщення заданої кількості бітів інформації (відомостей, здатних надавати інформацію) у просторі чи здійснюється фізичний доступ суб'єктів до цієї інформації.

Важливою проблемою запропонованого моніторингу в електроенергетиці є технічна реалізація, зокрема, функція негайного і на місці надання інформації немоніторинговим системам, а кінцевою метою розширеного моніторингу завжди є оцінка стану об'єкта. Фактично визначено, що моніторинг, як з точки зору мети, так і з точки зору технічного виконання, доцільно розглядати **як одночасне спостереження і оцінку стану об'єкта** моніторингу одночасно.

На сьогодні система глобального моніторингу (Wide-area monitoring/measurement system, WAMS) є комплексом систем, який відстежує стан централізованої енергосистеми та здатний реалізувати програми моніторингу та оцінки на основі приладу синхронізованих векторних вимірювань (Phasor Measurement Unit, PMU). WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в цілому [25]. Переваги WAMS для централізованих енергосистем:

- моніторинг та контроль електромережі в режимі реального часу;
- дані синхронізуються та архівуються (якщо електроенергетична система розділена на декілька регіонів, різні регіони електроенергетичної системи можуть обмінюватися даними між собою завдяки використанню PMU);
- у доступі є вся інформація про параметри режиму (значення струмів, напруги, фазових кутів, активної та реактивної потужності) та мережі (потужність навантаження);

- відстеження динаміки всієї системи та запобігання небажаним порушенням у системі;
- окремі підстанції можуть використовувати розрахунок рівнів пульсацій високої напруги.

Сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі за рахунок використання GPS трекерів, оскільки вона здатна робити майбутні прогнози поведінки енергетичних систем шляхом аналізу даних (значень частот, напруги, струмів), підвищення надійності та стабільності [27].

Зростаюча проблема перевантаження електромережі та глобальне збільшення кількості збоїв зумовила необхідність удосконалення електричних мереж за допомогою використання концепції глобального моніторингу, захисту та контролю (Wide Area Monitoring Protection and Control, WAMPAC) [28]. WAMPAC – це концепція, яка передбачає використання загальносистемної інформації та передачу відібраної локальної інформації у віддалену точку для протидії поширенню суттєвих збавд (загальносистемних збурень). WAMS у майбутньому зменшать кількість катастрофічних відключень електроенергії та загалом підвищать надійність і безпеку виробництва, передачі та розподілу енергії, особливо в енергетичних мережах з високим рівнем експлуатаційної невизначеності. Технологія синхронізованих вимірювань (Synchronized Measurement Technology, SMT) є важливим елементом і чинником WAMPAC.

Інтегрована система WAMPAC реального часу складається з чотирьох рівнів [28].

Рівень 1: локальний моніторинг, захист та контроль (автоматизація підстанцій локального керування генерацією).

Рівень 2: регіональний моніторинг та контроль (локальний баланс навантаження, локальна комутація мереж; застосування SCADA).

Рівень 3: менеджмент енергетичної системи, зонний контроль (оцінка стану, оцінка безпеки в електромережі, регулювання, обмежене безпекою).

Рівень 4: глобальний моніторинг, захист та контроль – синхронізовані векторні вимірювання (широкомасштабні баланс генерації, адекватність напруги, корегуючі дії, аварійне відключення частоти, затухання коливань, зкоординований адаптивний захист; динамічне налаштування локального захисту та використання синхронізованих векторних вимірювань).

Сучасний підхід до моніторингу електроенергетичних систем базується на взаємодії між силовою частиною системи та платформою моніторингу за допомогою хмарних технологій [29]. Згідно з визначенням NIST, хмарні обчислення (від англ. Cloud Computing) – це модель забезпечення повсюдного та зручного доступу на вимогу через мережу до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що підлягають налаштуванню (наприклад, до комунікаційних мереж, серверів, засобів збереження даних, прикладних програм та сервісів) та які можуть бути оперативно надані і вивільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера. Виміряні дані надсилаються безпосередньо в хмару. Хмара, зокрема, може забезпечити ефективний і практичний варіант для адміністрування послуг IoT та пропонувати деякі програми для допомоги в аналізі даних.

Як приклад успішної розробки WAMS в Україні можемо відзначити системи моніторингу перехідних режимів WAMS «Регіна-Ч» [30], яка призначена для: реєстрації миттєвих значень струмів і напруги перехідних процесів; вимірювання сили, напруги, потужності, фази і частоти змінного струму; зберігання в пам'яті результатів вимірювань; програмної обробки вимірювальної інформації, виведення її у вигляді цифрових масивів і текстових повідомлень, а також передачі її на будь-які рівні з прив'язкою до сигналів точного часу, отриманих від GPS приймача.

Переваги інтелектуальної електромережі за допомогою моніторингу спостереження та оцінювання стану можна підсумувати таким чином [30, 31]:

- посилення центральної ролі диспетчерського контролю та збору даних у роботі електромережі;
- оперативне технічне обслуговування лише за необхідності та вчасно (що передбачає зниження витрат на технічне обслуговування та збереження високої надійності системи);
- подовження терміну служби електротехнічного обладнання (покращення повернення інвестицій, ROI);
- розробка інноваційних концепцій формування профілів навантаження;
- онлайн-діагностичні вимірювання властивостей, пов'язаних із найшвидшими механізмами відмови обладнання;
- оцінка індексу стану («здоров'я») та залишкового терміну служби обладнання.

При цьому забезпечується вирішення наступних задач:

- одержання достовірної поточної інформації та її систематизація;
- розпізнавання образів різної фізичної природи: електрофізичних процесів (сонячні панелі СЕС), механічних характеристик (ВЕС), температурні показники накопичувачів енергії (висуваються різні вимоги);
- аналіз ретроспективних та поточних даних, формування прогнозних сценаріїв;
- підвищення керованості технологічними процесами та бізнес-процесами;
- моніторинг і діагностика стану обладнання в нормальних та аварійних режимах, попередження розвитку аварій;
- моніторинг в системах енергоменеджменту.

У сучасних електроенергетичних системах розподілена система керування (енергетичними ресурсами (Distributed Energy Resource Management System, DERMS)) відповідає за взаємодію з «великою» енергосистемою та взаємодіє з системою керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS) чи з вдосконаленою системою керування розподілом електроенергії (ADMS) енергетичної компанії, чи системою керування попитом (Demand Response Management Systems, DRMS) споживачів [31, 32]. Власне DRMS, DMS, ADMS та DRMS є розвитком відповідних систем енергетичного менеджменту (Energy Resource Management System, EMS). Функціонування DRMS, DMS, ADMS та DRMS є неможливим без розширених функціональних можливостей моніторингу, особливо з поширеним застосуванням розподілених енергетичних ресурсів (Distributed Energy Resource, DER). Так, вдосконалена система DERMS має виконувати наступні функції: моніторинг стану та роботи генераторів, ліній електропередачі, накопичувачів електроенергії та навантажень (Energy Smart Monitor); розрахунок витрат первинного палива та вартості отриманої/відпущеної електроенергії. На рівні роботи EMS, DMS, DEMS, ADMS та DERMS виникає потреба вдосконалення WAMS з розширенням її функцій, які відображатимуть різномунітність систем та сфер їхнього застосування.

Нова якість та цінність моніторингу – це необхідність використання кількісної та якісної інформації, її систематизація. Важливими постають нова «інтерпретація» процедури контролю як етапу процесу керування; зміна метрики по окремих параметрах (характеристиках) процесів, її адаптація та коригування, а також розширення та деталізація процедури розпізнавання образу з оцінкою ефективності та результативності процесів, що моніторяться. Сучасний моніторинг в електроенергетиці має стати дійсно інтелектуальним, тобто Smart-моніторингом.

3. SMART-моніторинг в електроенергетиці. Проведений аналіз показав, що розвиток поняття «моніторинг» в електроенергетиці можемо представити наступною еволюцією:

- I етап: спостереження навколишнього середовища;
- II етап: спостереження будь-якого об'єкту;
- III етап: спостереження і оцінка стану будь-якого об'єкту;
- IV етап: Smart-моніторинг.

Задля подальшого розгляду характеристик Smart-моніторингу зазначимо, що аббревіатура **S.M.A.R.T.** (від англ. *self-monitoring, analysis and reporting technology*) означає «технологія самоконтролю, аналізу та звітності». У назві Smart-моніторинг складова «**Smart**» підкреслює суттєво **розширений функціонал** запропонованих процедур моніторингу. **Smart-моніторинг** в електроенергетиці – інтелектуальний моніторинг – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами та бізнес-процесами в електроенергетиці як з аналізом поточної оцінки стану, так і ретроспективним аналізом та прогнозуванням стану.

Платформений підхід формування структури та процедур Smart-моніторингу реалізується під час формування бізнес-моделей спільної діяльності об'єктів (зокрема, енергетичних комірок) на основі цифрових технологій (узгодженість, масштабованість, відкритість), де цифрові платформи відіграють вирішальну роль у створенні нових цінностей.

Smart-моніторинг розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому, а при оцінюванні стану – виконання **ідентифікації** предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій в електроенергетичній системі відповідно до розширених вимог функціонування енергетичних ринків, у першу чергу, локальних.

При визначенні відмінних рис Smart-моніторингу важливу роль відіграє розширення поняття

«інформації». У Smart-моніторингу використання інформації визначаються додатковими показниками її якості, зокрема:

- *репрезентативністю*, що визначається правильністю та обґрунтованістю відбору істотних ознак і зв'язків відображуваного явища;
- *змістовністю*, що відображає семантичну ємність, яка дорівнює відношенню кількості семантичної інформації у повідомленні до обсягу оброблюваних даних;
- *достатністю (повнотою)*, що визначається мінімальним набором показників для прийняття правильного рішення; поняття повноти інформації пов'язано з її смисловим змістом (семантикою) і споживчими властивостями (прагматикою);
- *стійкістю*, що відображає її здатність до збереження точності у разі зміни вихідних даних.

На відміну від традиційного моніторингу (запис, порівняння, звітування) Smart-моніторинг наділено *новими функціями*: аналізування (наприклад, співвіднесення споживання енергії з вимірним відпуском обсягів генерації електроенергії); встановлення цілей (зокрема, встановлення цілей для зниження або контролю генерації та споживання енергії); контролінгу (у розумінні процесу контролінгу для інформаційних систем – цілеспрямованого підбору та обробки інформації через централізацію та координацію). Має здійснюватися ідентифікація даних за ознакою «корисності» як міри задоволення потреби системи щодо якості параметрів електроенергії та якості енергопостачання.

Smart-моніторинг розглядається як цільовий (ціленаправлений) з визначенням цілей (цілепокладання) моніторинг (**Monitoring & Target, M&T**) – в залежності від сфери застосування, зокрема, запропоновано здійснювати оцінку поточної економічної ефективності елементів системи.

Введення понять «еталонний тариф», «профілі» генерації та споживання електроенергії, як опорних характеристик роботи системи, розширює можливості адаптації моніторингу до зміни параметрів та режимів функціонування системи.

Можемо виділити три рівня здійснення Smart-моніторингу:

- *перший рівень* – це моніторинг у реальному часі параметрів електромережі – аналіз якості параметрів електричної енергії, швидке інформування щодо наявності невідповідностей у системі;
- *другий рівень* – здійснюється моніторинг якості енергопостачання, відповідність стандартам всіх параметрів електромережі, контролюється синхронізація та обмін електроенергією між елементами системи;
- *третій рівень* – на основі отриманих даних формується інформація для взаємодії об'єктів (наприклад, участі на ринках електроенергії. Тут нова «якість» інформації створює нову «кількість» інформації у взаємодії об'єктів. Виконується загальна оцінка стану та вирішуються задачі прогнозування.

Узагальнені рівні застосування Smart-моніторингу наступні.

Базовий рівень (локальна електроенергетична система (ЛЕС)): індикація; прийняття оперативних рішень; розв'язання оптимізаційних процедур.

Верхній рівень (системи передачі та розподілу електроенергії; локальний енергоринок): загальносистемні питання щодо функціонування системи вищого рівня, зокрема, систем енергетичного менеджменту (СЕМ).

Нижній рівень (підсистеми виділеної ЛЕС, навантаження, окремі генеруючі потужності): керування.

Якщо системи WAMS та WAMPAC застосовуються на рівні високої та середньої напруги (оператори передачі електроенергії – Electricity Transmission Operators (TSO)), то сфера застосування Smart-моніторингу – середні та низькі напруги (оператори розподілу електроенергії – Electricity Distribution Operators (DSO)). Постає важлива задача організації ефективної взаємодії WAMS та WAMPAC (наприклад, WAMS «РЕГІНА-Ч») з системами Smart-моніторингу на рівні середньої напруги.

На горизонтальному (базовому) рівні Smart-моніторинг взаємодіє з такими системами (або є їх елементом) як EMS, DMS, DEMS, ADMS та DERMS. Операційними складовими нижнього рівня для Smart-моніторингу є, зокрема, інтелектуальні електронні пристрої (Intelligent Electronic Devices, IED) та Smart лічильники.

У загальному випадку Smart-моніторинг вирішує завдання як аналізу (оптимізації), так синтезу (проекування, планування, керування). З точки зору «керуючих функцій» системи Smart-моніторингу мають враховувати, що сьогодні електроенергетична система є ієрархічною багаторівневою структурою, яка повинна діяти за принципом: підвищення інтелектуальності та зниження

вимог до точності з підвищенням рангу ієрархії. Здійснюється двосторонній зв'язок з об'єктами, прогнозування управлінської технічної та фінансово-економічної діяльності, інтегрована інформаційно-аналітична підтримка, ідентифікація інформації.

Smart-моніторинг з точки зору вимог функцій інтелектуальної системи (ІС, англ. Intelligent System) – це апаратно-програмна система, здатна вирішувати завдання, які традиційно вважаються творчими, що належать конкретній предметній області, знання про яку зберігаються в пам'яті такої системи; включає три основні блоки – базу знань, механізм виведення рішень та інтелектуальний інтерфейс.

Сфери застосування Smart моніторингу: оцінка стану протікання процесів та стану обладнання генераторів та навантаження; динамічне ціноутворення, тарифна політика, динамічна оцінка стану використання первинного палива та/чи поточних витрат генераторів; економічна ефективність роботи генераторів та навантажень; екологічна прийнятність, оцінка обсягів викидів CO₂; оптимальна робота системи керування; керування попиту (Demand Side Management, DSM), керування максимальним енергоспоживанням; прогноз розвитку системи; оцінка взаємоперетоків електроенергії; стійкість системи до збурень; прогноз метрологічних показників, потенційних можливостей генерування ВДЕ (ВЕС, СЕС тощо); оцінка поточних витрат; стану електромагнітної сумісності елементів системи, роботи накопичувачів електроенергії; ретроспективний аналіз даних; моніторинг стану (конфігурації) системи; робота на локальних ринках електроенергії, формування тарифної політики з врахуванням цінових імпульсів.

Базовими складовими методології Smart-моніторингу є його основні функції:

- ранжування образів;
- ранжування факторів впливу;
- оцінка дольової участі, зокрема, з використанням процедур неінтрузивного моніторингу (неінтрузивність (деагрегація) даних, відкритість);
- оптимізаційні процедури для систем генерації та споживання електроенергії;
- наявність прогностичних функцій;
- збір та оцінка техніко-економічних показників функціонування елементів системи та системи в цілому;
- стійкість до збурень різної «природи»;
- забезпечення конфіденційності даних;
- використання поняття «еталонний тариф», «еталонні» профілі генерації та споживання електроенергії;
- ієрархічність завдань.

Важливе значення надається самоналаштуванню (самонавчанню) – здатності оптимізувати власні внутрішні параметри роботи, щоб оптимізувати виконання цільової функції, як правило, це максимізація ефективності або мінімізація «помилки».

Як приклад, наведемо основні операції Smart-моніторингу для оцінки економічних та технічних показників ЛЕС.

1. Задання початкових умов (встановлення критеріїв на якість електричної енергії, завантаження графіків залежностей витрат джерел живлення які знаходяться в системі, еталонні тарифи, які використовуються, часові інтервали вимірювань).
2. Вимірювання. Давачі у вузлах ЛЕС записують показники споживання/виробництва електроенергії, інші електричні та неелектричні параметри.
3. Оцінка виробленої енергії та відповідних «пропозицій». Проводиться оцінка виробленої енергії кожного окремого джерела живлення, який входить до ЛЕС, у порівнянні з графіками залежностей витрат від генерованої потужності, з урахуванням часу доби, пори року.
4. Розрахунок сумарних витрати на генерацію електроенергії.
5. Оцінка споживання електроенергії навантаженнями.
6. Оцінка балансу потужності. Виконується порівняння генерованої потужності та потужності споживачів. У разі зростання виробництва електричної енергії, система Smart-моніторингу повинна перевірити, чи відповідають встановлені критерії якості електроенергії. В разі невідповідності стандартизованим вимогам якості електроенергії (енергопостачання) при необхідності нараховуються штрафи постачальнику. Якщо довгострокова невідповідність стандартам якості, відключення постачальника.
7. Оцінка дієвості механізмів керування попиту.
8. Оцінка відповідності всіх технічних параметрів нормам та інформування систем

керування ЛЕС, агрегаторів та постачальників.

9. Розрахунок тарифу для участі на локальних ринках.

4. Функціональна структура Smart-моніторингу показана на рис. 1.

Охарактеризуємо типові ознаки (відмінності) Smart-моніторингу (див. рис. 1) по відношенню

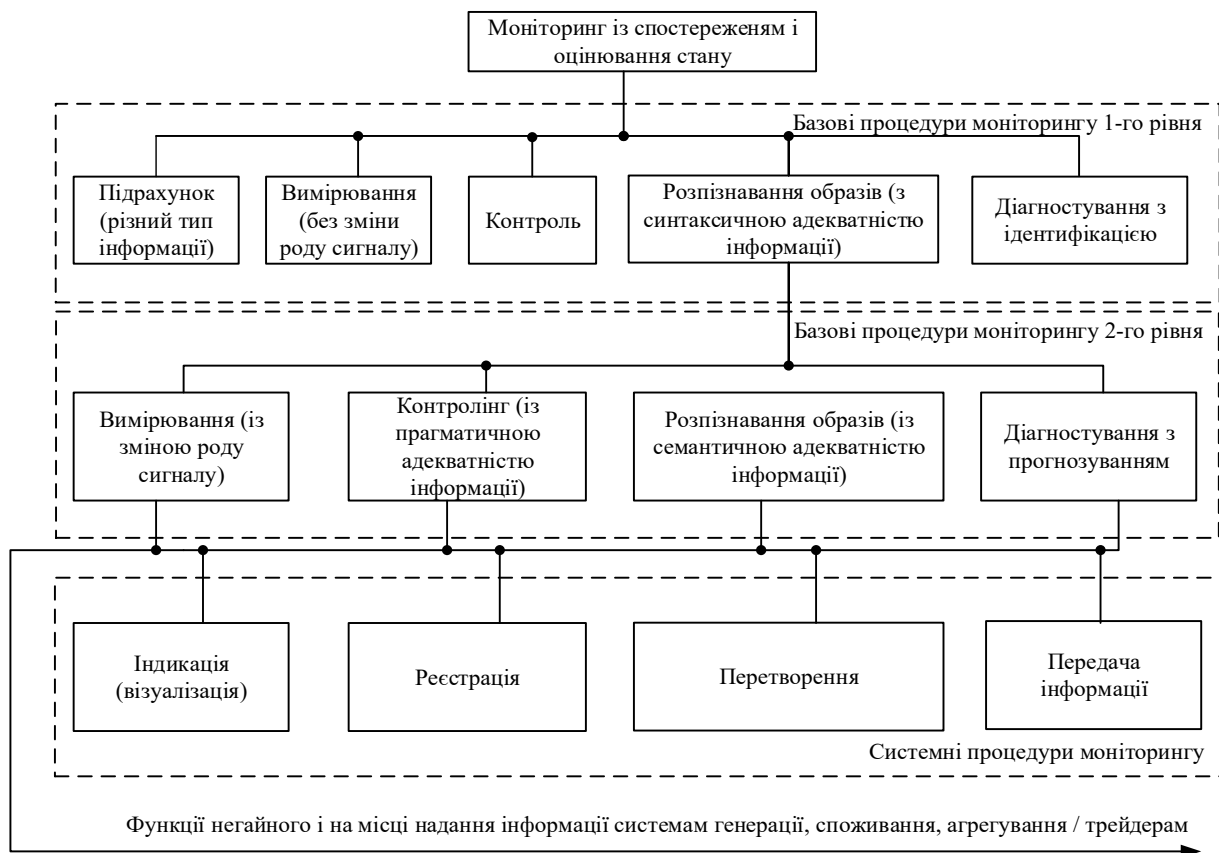


Рис. 1

до систем WAMS. Зазначимо, що принципи побудови та реалізації Smart-моніторингу з поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності. Адекватність інформації Smart-моніторингу оцінюється у трьох формах: синтаксичної, семантичної та прагматичної:

– **синтаксична** – відображає формально-структурні характеристики інформації і не зачіпає її смислового змісту;

– **семантична (смилова)** – визначає ступінь відповідності образу об'єкта і самого об'єкта, передбачає врахування змісту інформації;

– **прагматична (споживча) адекватність** відображає ставлення до інформації її споживача, відповідність інформації меті керування, яка на її основі реалізується.

Структура Smart-моніторингу як відкрита система наведена на рис. 2.

Базові процедури Smart-моніторингу 1-го рівня:

- **Лічба/підрахунок.**

Розширюються обсяги інформації. Різноманітний тип технічної та економічної інформації щодо функціонування системи. Зв'язаний термін

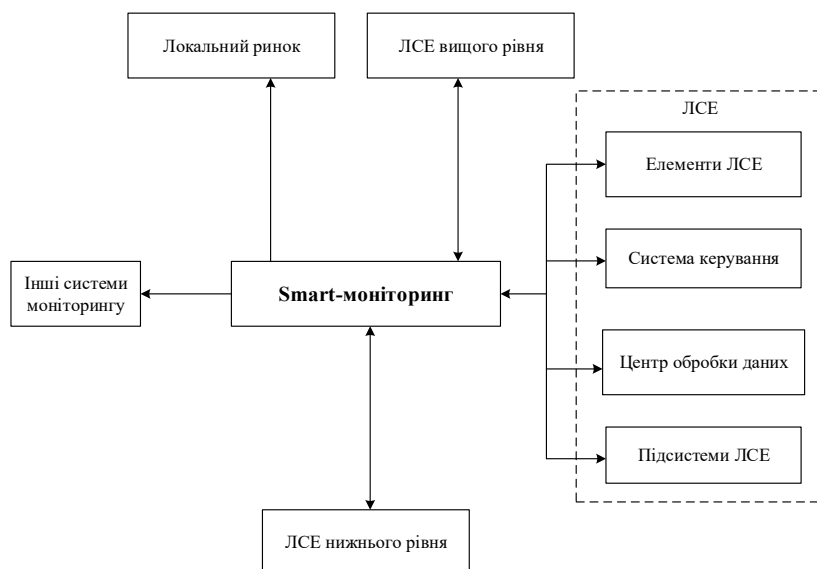


Рис. 2

перерахування визначає унікальність ідентифікації елементів скінченної (комбінаторної) множини або нескінченної множини шляхом присвоєння номера кожному елементу.

- **Вимірювання (без зміни роду сигналу).** Вимірювання розглядається як пізнавальний процес визначення числового значення вимірюваної величини, а також дія, спрямована на знаходження значення фізичної величини за рахунок: прямого вимірювання (вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо без перетворення її роду); абсолютного вимірювання (вимірювання, яке засноване на прямому вимірюванні однієї або декількох основних величин) чи відносного вимірювання (вимірювання відношення величини до іншої однорідної величини).

- **Контроль.** Контроль (фр. *contrôle* від *contrerôle* – подвійний список): перевірка, облік, спостереження за чим-небудь; заключна функція керування.

Під процесом контролю ми будемо розуміти систему спостереження і перевірки процесу функціонування та фактичного стану керованого об'єкта, що забезпечує досягнення системою поставленої мети шляхом порівняння фактичного стану системи з бажаним (як якісним, так і кількісним станом). Адекватне реагування на нову ситуацію для досягнення узгодженості й синхронізації функціонування об'єктів системи.

Важливим є переважно контроль якості електроенергії/енергопостачання). При цьому показники ефективності застосовуються як функції узагальнених характеристик елементів та системи в цілому.

- **Розпізнавання образів (з синтаксичною адекватністю інформації).** Поєднання базових процедур контролю та розпізнавання образів. Враховується своєрідність і різноманітність явищ, необхідність забезпечення безперервності процесів, двостороннього інтелектуального інтегрального взаємозв'язку з системами вищого рівня.

Задача розпізнавання зводиться до порівняння за ознаками розпізнавання певного зразкового образу з даним об'єктом і констатації, чи відноситься цей об'єкт до даного образу. Задля вирішення цього питання використовують певні технологічні та економічні критерії відповідності, які служать мірами розбіжності між розпізнаним і зразковим образами.

Розпізнавання образів – поєднання методів класифікації та ідентифікації предметів, явищ, процесів, сигналів, ситуацій і т.п. об'єктів, які характеризуються скінченим набором деяких властивостей і ознак.

Розпізнавання образів розглядається як важлива процедура при реалізації задачі аналізу. Як задача віднесення вихідних даних до певного класу за допомогою виділення (*англ. feature extraction*) істотних ознак, що характеризують ці дані, із загальної маси несуттєвих даних. Важливого значення набуває забезпечення інформативності ознак.

- **Діагностування з ідентифікацією.** Діагностика технічного та технологічного стану технічних об'єктів ґрунтується на розпізнаванні образів з використанням операцій контролю і вимірювання. Проведення обстеження об'єктів системи на предмет їх зносу, необхідності ремонту, можливості подальшої експлуатації тощо.

Базові процедури Smart-моніторингу 2-го рівня.

- **Вимірювання (із зміною роду сигналу).** У цій процедурі здійснюється вимірювальне перетворення (наприклад, за рахунок інтелектуальних датчиків): непряме вимірювання – вимірювання, в якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини; опосередковане вимірювання – непряме вимірювання однієї величини з перетворенням її роду. Застосовуються як сукупні, так і сумісні вимірювання.

Порівняння з «еталонним тарифом» при формуванні квазіоптимального тарифного плану, наприклад, за квадратичною нормою, дозволить оцінювати при Smart-моніторингу зміну тарифу не за інтервалом часу, а за поточними значеннями витрат палива і потужності генерації та споживання (зокрема, оцінки активної та реактивної потужності, врахування втрат в електричних мережах, профілів графіків навантажень); здійснювати розрахунок миттєвої вартості як інтегральної (усередненої) миттєвої характеристики вартості електроенергії на заданому «малому» інтервалі часу.

- **Контролінг (із прагматичною адекватністю інформації).** Контролінг (*англ. Controlling*) розглядається як міжфункціональний напрям формування управлінських заходів; виявлення подій, що визначають керуючі впливи; управління «прибутком» системи в широкому сенсі; аналіз і визначення причин відхилень фактичних значень показників від планових; прийняття на цій основі управлінських рішень задля мінімізації відхилень.

Концепція контролінгу націлює на формування і досягнення довготермінових цілей, з яких

впливають і формуються тактичні, які скоординовано спрямовуються на вирішення поставлених задач. Важливе значення приділяється проблемі забезпечення керованості та спостережуваності – здатності системи підлягати керуванню чи керуванні станом системи та вироблення рекомендацій (керуючих) з усунення або ослаблення можливих негативних змін.

• **Розпізнавання образів (із семантичною адекватністю інформації).** Процедура передбачає віднесення вихідних даних до певного класу за допомогою виділення істотних ознак, що характеризують ці дані. Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ або процесів) – завдання ідентифікації об'єкта з визначенням його властивостей за його ознаками із оцінкою семантичної адекватності інформації. При цьому *образ* розглядається як класифікаційне угруповання в системі класифікації, що об'єднує (виділяє) певну групу об'єктів за деякою ознакою, а *ознака* – особливість предмета або явища, яка визначає подібність свого носія до інших об'єктів пізнання або відмінність від них, властивість.

Розпізнавання образів із врахуванням змісту інформації – це не тільки кластерний аналіз (кластеризація), але й формування окремих метрик, що забезпечує визначення керуючих впливів; оцінка технічної (технологічної) ефективності, оцінка економічної ефективності; формування «оптимального» (квазіоптимального) образу.

• **Діагностування з прогнозуванням** – це діагностика з прогнозом зміни стану, виявлення можливих негативних змін при умовах прагматичної (споживчої) адекватності. Суттєва роль приділяється використанню заданого набору інтелектуальних датчиків і процесу інтелектуального аналізу даних та самонавчанню, здатності до самодіагностики.

Формуються діагностичні тести (діагностичні маркери) як сукупності контрольних перевірок, що є достатньою для визначення стану об'єкта діагностики. Підвищення ефективності діагностичних тестів досягається з урахуванням побудови системи, діагностики поточного стану та прогнозування розвитку подій. Фактично під час діагностики здійснюється інтелектуальний аналіз даних, який фокусується на моделюванні та розкритті даних, пов'язаних із вилученням знань з масивів (баз) даних, а не на їх описі.

Системні процедури моніторингу.

• **Індикація (візуалізація).** Індикація (лат. in-dico – показувати) – методи та прийоми спостереження, фіксації, контролю, характеристики та оцінки стану та стадій розвитку процесів, об'єктів та системи в цілому для встановлення та контролю залежностей від зміни умов у часі, статистики кількісного та якісного порядку, зіставлення з нормою. Індикація в Smart-моніторингу – це визначення, вимірювання, записування різних показників як об'єктів, так і системи в цілому. Візуалізація інформації розглядається як інтерактивне вивчення візуального представлення отриманих даних з метою їх пізнання.

• **Реєстрація.** Здійснюється реєстрація енергетичних, технічних та економічних (тарифів, вартості) характеристик і показників, їх облік, за необхідності врахування профілів генерації та споживання, зокрема еталонних.

• **Перетворення.** Відбувається перетворення роду сигналів, які несуть інформацію (зміна способу подання тієї самої інформації за допомогою іншого виду без змінення початкового повідомлення).

• **Передача інформації.** Здійснюється за допомогою повідомлень – послідовності сигналів в часі або просторі (часові або просторові повідомлення). Організується ієрархічне «середовище передачі» з будь-якою глибиною вкладеності. Як «носії» використовуються хвильово-польові об'єкти фізичної природи. Носіями можуть бути за певних умов і самі передані «інформаційні об'єкти» (віртуальні носії). Значна увага має приділятися кодова захищеності (інформаційній безпеці), здійсненню двостороннього обміну інформацією, забезпеченню ефективної взаємодії в єдиному ієрархічному інформаційному просторі функціонування об'єкта.

У процесі побудови інформаційної система Smart-моніторингу особливої ваги набуває функція негайного і на місці надання інформації системам генерації, споживання, агрегування з оцінкою умов та способів «подальшого» використання одержаної інформації з врахуванням мультиагентної взаємодії елементів системи.

Функціональні можливості Smart-моніторингу суттєво розширюється з використанням сучасних засобів АМІ (Advanced Metering Infrastructure), ІКТ, ІЕД, Smart лічильників, оскільки високоточні та гнучкі сенсорні системи стають критично важливими задля прискорення розгортання мікромереж і широкого проникнення ВДЕ. Нові технології Smart-моніторингу мають забезпечити

ефективну оцінку функціонування системи, створення потоків даних (із розосередженою та багаторівневою їх обробкою) в режимі реального часу, за допомогою яких можна буде відстежувати техніко-економічну ефективність функціонування, динаміку процесів в системі, використовувати оперування з великими даними (Big Data) в рамках механізму «Дані як послуга» (Data as a Service, DaaS), зокрема в рамках механізму для забезпечення гнучкості та балансування потоків енергії в системі. При цьому основними вимогами до побудови технічних і програмних засобів є: модульний принцип, відкритість архітектури, відокремленість виконання функцій контролю та керування об'єктом, виконання вимог щодо забезпечення кібербезпеки.

Висновки.

1. Розроблені теоретико-методологічні основи створення Smart-моніторингової системи як багатокомпонентного, багатовимірного, динамічного інформаційно-аналітичного комплексу, що є основою оптимізації техніко-економічних показників електроенергетичних систем середньої та низької напруги, поєднуючи окремі компоненти моніторингу в загальну методологію побудови Smart-моніторингу при оптимізації функціонування систем на локальних енергетичних ринках.

2. В рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем запропоновано нову систему принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних інтелектуальних децентралізованих електроенергетичних систем, зокрема, запропонована розширена класифікація складових Smart-моніторингу за функціональною ознакою з поділом на типи, базові і системні процедури та операції системи моніторингу з визначенням їхнього взаємозв'язку.

3. Здійснення комплексного систематичного автоматичного спостереження за технологічними процесами та бізнес-процесами в електроенергетиці, як основи побудови апаратних і програмних засобів для низки технологічних платформ (діагностування, аудиту, керування, диспетчерування, енергоменеджменту, формування енергетичних ринків майбутнього), дозволяє забезпечити сумісний моніторинг економічних та технічних (енергетичних) показників роботи системи при динамічній тарифікації генерації та споживання електроенергії.

4. Впровадження систем Smart-моніторингу сприятиме оптимізації енергетичних процесів в електроенергетичних системах, побудові децентралізованих систем енергозабезпечення, підвищенню їхньої енергоефективності, зокрема, розширенню стратегії технічного обслуговування на основі оцінки поточного стану об'єктів системи; поточному управлінню активами підприємств; розвитку активів, управлінню бізнес-процесами та формуванню комплексної геоінформаційної системи енерго-підприємств з використанням хмарних технологій; інформаційній інтеграції енергопідприємств та інтелектуальних електромереж і локальних електроенергетичних систем; керуванню мобільними активами (наприклад, системами заряджання електромобілів).

Роботу виконано в межах наукової теми «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів (Монітор-4)» (КПКВК 6541030)

1. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23.

2. US Department of Energy. Smart Grid system report, July 2009. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report%20Appendix%20A%20%26%20B.pdf> (Available at 15.05.2024)

3. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. 400 с.

4. NIST URL: https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability.final.pdf (Available at 15.05.2024)

5. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2023. № 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>

6. Yadoshchuk V. Digital Transformation in The Energy Industry: Overview and Tips. •Content Writer. Updated April 29, 2024. URL: <https://waverleysoftware.com/blog/digital-transformation-in-the-energy-industry/> (Available at 15.05.2024)

7. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018.

8. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf (Available at 15.05.2024)

9. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd

- KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Keiv, Ukraine, 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
10. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Техн.електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47–48.
 11. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018 г.
 12. Market Solutions to our Energy Needs. URL: <https://renewableplus.blogspot.com/2020/04/success-principles-for-energy-iotcloud.html> (Available at 15.05.2024)
 13. Renewable energy world. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/der/the-next-phase-of-the-energy-transformation-platform-thinking/#gref> (Available at 15.05.2024)
 14. What is Grid Orchestration and how does it differ from DERMS? URL: <https://www.camus.energy/gridorchestration> (Available at 15.05.2024)
 15. Digitalising our Energy System for Net Zero: Strategy and Action Plan 2021. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/digitalising-our-energy-system-for-net-zero-strategy-and-action-plan> (Available at 15.05.2024)
 16. Being a world-class energy services provider. URL: <https://clouglobal.com/neural-networks-for-smart-meters-and-smart-grids/> (Available at 15.05.2024)
 17. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників Microgrid на локальних ринках електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022/03/037>
 18. Paraskevagos T. Sensor Monitoring Device. US Patent 3842208A. URL: <https://patents.google.com/patent/US3842208A/en> (Available at 15.05.2024)
 19. Bushman W Thomas, Paraskevagos Theodoros G. Apparatus and Method for Remote Sensor Monitoring, Metering and Control. US Patent 4,241,237. URL: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-4241237-A> (Available at 15.05.2024)
 20. Екологічна енциклопедія. К.: ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2007. Т. 2: Є-Н. 416 с.
 21. Півняк Г.Г., Бусигін Б.С., Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Коротенко Г.М., Коротенко Л.М. Тлумачний словник з інформатики. Дніпропетровськ. 2010. 600 с.
 22. Великий тлумачний словник сучасної української мови (з дод. і допов.). К.: ВТФ Перун. 2005. 1728 с.
 23. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62–69.
 24. Smart energy monitoring together with BI. URL: <https://www2.deloitte.com/cz/en/pages/strategy-operations/articles/smart-energy-monitoring-together-with-bi.html> (Available at 15.05.2024)
 25. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901> .
 26. Blinov, I., Zaitsev, I.O., Kuchansky, V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol 298. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8
 27. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.
 28. Terzija V., Valverde G., Cai Deyu, Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok Srdjan, Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Pp. 80–93. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450> .
 29. Fang Liu, Jin Tong, Jian Mao, Robert Bohn, John Messina, Lee Badger and Dawn Leaf. NIST Cloud Computing Reference Architecture. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-292.pdf> (Available at 15.05.2024)
 30. Інформаційно-діагностичний комплекс «Регіна» URL: <https://www.regina.org.ua> (Available at 15.05.2024)
 31. Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER). EPRI 2015. URL: <https://www.epri.com/research/products/3002007067> (Available at 15.05.2024)
 32. Денисюк С.П., Стржелецьки Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 3. С. 7–22.

SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS

O. Kyrylenko¹, B. Stognii¹, S. Denysiuk², M. Sopol¹

¹ Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

² National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
37, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine,
e-mail: spdens@ukr.net

It is shown that the transformation of the energy sector based on the construction of new architectures of energy systems requires a joint consideration of three layers of two-way energy information exchange: economic, information-management, and physical (energy), and the functioning of modern electric power systems requires the application of process monitoring with enhanced functionality. For such intelligent monitoring, defined as Smart-monitoring, the first and second level monitoring procedures are characterized, in particular, taking into account measurement with a change in signal type, operation with information with syntactic, semantic and pragmatic adequacy, diagnosis with identification and forecasting. It is shown that Smart-monitoring in electric power at the level of medium and low voltages (distribution and consumption systems) should be formed as a technological platform for diagnosis, audit, control, dispatching, energy management of electric power systems, formation of modern energy markets. References 32, figures 2.

Keywords: electric power system, intelligent monitoring, energy information exchange, monitoring procedures, technical and economic indicators.

1. Kyrylenko O. Measures and Ways of Transforming Ukraine's Energy Sector into an Intelligent Environmentally Friendly System. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 3. Pp. 18-23. (Ukr)
2. US Department of Energy. Smart Grid system report, July 2009. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2009%20Smart%20Grid%20System%20Report%20Appendix%20A%20%26%20B.pdf> (Available at 15.05.2024)
3. Intelligent electrical networks: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2016. 400 p. (Ukr)
4. NIST URL: https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf (Available at 15.05.2024)
5. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. No 63. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005> (Ukr)
6. Yadoshchuk V. Digital Transformation in The Energy Industry: Overview and Tips. •Content Writer. Updated April 29, 2024. URL: (Available at 15.05.2024)
7. Navigant research «Transactive Energy Markets», Navigant, 2018.
8. GridWise Architecture Council's Transactive Energy Framework. URL: https://gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf (Available at 15.05.2024)
9. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Keiv, Ukraine, 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
10. Kyrylenko O., Blinov I., Tankevych S. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 44–54. (Ukr)
11. Navigant research «Energy Cloud 4.0: Capturing Value through Disruptive Energy Platforms», Navigant, 2018 г.
12. Market Solutions to our Energy Needs. URL: <https://renewableplus.blogspot.com/2020/04/success-principles-for-energy-iotcloud.html> (Available at 15.05.2024)
13. Renewable energy world. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/der/the-next-phase-of-the-energy-transformation-platform-thinking/#gref> (Available at 15.05.2024)
14. What is Grid Orchestration and how does it differ from DERMS? URL: <https://www.camus.energy/gridorchestration> (Available at 15.05.2024)
15. Digitalising our Energy System for Net Zero: Strategy and Action Plan 2021. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/digitalising-our-energy-system-for-net-zero-strategy-and-action-plan> (Available at 15.05.2024)
16. Being a world-class energy services provider. URL: <https://clouglobal.com/neural-networks-for-smart-meters-and-smart-grids/> (Available at 15.05.2024)
17. Kyrylenko O., Zhuikov V., Denysiuk S. Use of dynamic tarification for optimization Microgrid technical and economic indicators in local electricity markets. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No. 3, May-June. Pp. 37–48.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.037> (Ukr)

18. Paraskevagos T. Sensor Monitoring Device. US Patent 3842208A. URL: <https://patents.google.com/patent/US3842208A/en> (Available at 15.05.2024)
19. Bushman W Thomas, Paraskevagos Theodoros G. Apparatus and Method for Remote Sensor Monitoring, Metering and Control. US Patent 4,241,237. URL: <https://portal.unifiedpatents.com/patents/patent/US-4241237-A> (Available at 15.05.2024)
20. Ecological encyclopedia. Kyiv: LLC Center of Environmental Education and Information, 2007. Vol. 2: E-N. 416 p. (Ukr)
21. Pivniak G., Busygin B., Diviziniuk M., Azarenko O., Korotenko G., Korotenko L. Computer science glossary. Dnipropetrovsk, 2010. 600 p. (Ukr)
22. A large explanatory dictionary of the modern Ukrainian language (with appendices and additions) / Compiler and editor-in-chief V. T. Busel. Kyiv: VTF Perun, 2005. 1728 p. (Ukr)
23. Stognii B., Sopol M. Fundamentals of monitoring process in electroenergy. About the concept of monitoring process. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No. 1. Pp. 62–69. (Ukr)
24. Smart energy monitoring together with BI. URL: <https://www2.deloitte.com/cz/en/pages/strategy-operations/articles/smart-energy-monitoring-together-with-bi.html> (Available at 15.05.2024)
25. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901> .
26. Blinov, I., Zaitsev, I.O., Kuchansky, V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol 298. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8
27. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.
28. Terzija V., Valverde G., Cai Deyu, Regulski P., Madani V., Fitch J., Skok Srdjan, Begovic M.M., Phadke A. Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Pp. 80–93. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450> .
29. Fang Liu, Jin Tong, Jian Mao, Robert Bohn, John Messina, Lee Badger and Dawn Leaf. NIST Cloud Computing Reference Architecture. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication500-292.pdf> (Available at 15.05.2024)
30. Інформаційно-діагностичний комплекс «Регіна» URL: <https://www.regina.org.ua> (Available at 15.05.2024)
31. Grid Interactive Microgrid Controllers and the Management of Aggregated Distributed Energy Resources (DER). EPRI 2015. URL: <https://www.epri.com/research/products/3002007067> (Available at 15.05.2024)
32. Denysiuk S.P., Strzelecki R. Formation of components of smart platform for the management of power systems and networks. *Energy: economics, technologies, ecology*. 2019. No. 3. Pp. 7–22. (Ukr)

Надійшла 08.07.2024
Остаточний варіант 01.08.2024

БАГАТОРІВНЕВІ ГНУЧКІ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

А.Ф. Жаркін^{1*}, академік НАН України, **В.А. Попов**^{2**}, докт. техн. наук,
О.С. Ярмолук^{2***}, канд. техн. наук, **С.О. Палачов**^{1****}, канд. техн. наук, **В.О. Наталич**^{2*****}

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

² НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: tig@ukr.net; yarmolyuk.lena@gmail.com.

В умовах довготривалої загрози руйнування енергетичної структури розподільні мережі нашої країни потребують зміни принципів їхньої побудови. З цією метою запропоновано багаторівневу структуру побудови розподільної системи, що за рахунок використання сучасних апаратних рішень та широкого залучення локальних енергетичних ресурсів дає можливість забезпечити високий рівень їхньої гнучкості з метою підтримки живлення максимальної кількості споживачів у разі пошкоджень різної тяжкості та тривалості, які можуть виникнути у централізованій системі електропостачання, що відрізняє її від існуючих технічних рішень. Бібл. 9, рис. 2.

Ключові слова: розподільні системи, надійність електропостачання, силові перетворювачі, мікромережі.

Вступ. Безпрецедентність та складність ситуації, у якій на даний час опинилася електроенергетична галузь України, полягає у тому, що подальше відновлення та розвиток всієї інфраструктури необхідно планувати та здійснювати з урахуванням існуючих і довготривалих потенційних загроз зовнішнього втручання (включаючи фізичне) в їхню роботу. Ще жодна країна не ставила перед собою таке завдання та саме тому відсутні будь-які типові напрацювання та загальноприйняті рекомендації у цьому напрямі.

У цьому випадку мова має йти не стосовно відновлення пошкоджених елементів електроенергетичної інфраструктури у старих форматах, а відносно створення принципово нової організації електропостачання, заснованої на перевагах і можливостях, які надають сучасні та перспективні технічні засоби. Певною мірою це пов'язано з тим, що більшість діючих в країні нормативних документів, зокрема стосовно забезпечення надійності електропостачання, не передбачали можливості зовнішнього цілеспрямованого агресивного втручання як у роботу Об'єднаної енергетичної системи України, так і окремих її ланок. Відповідно, забезпечення надійності (а скоріше живучості) систем електропостачання у зазначених умовах та максимальне залучення локальних енергетичних ресурсів вимагає реалізації нетрадиційних технічних рішень.

Мета досліджень полягає у розробці концептуальних пропозицій щодо побудови гнучкої системи розподілу електричної енергії, яка б не тільки гарантувала підтримку електропостачання, принаймні, критичній групі електроприймачів у найбільш несприятливих випадках, але одночасно сприяла безконфліктній інтеграції локальних джерел енергії, що розглядається як пріоритетний напрям розвитку галузі при формуванні ефективних режимів роботи у нормальних умовах експлуатації. Важливою рисою такої системи розподілу є прагнення в залежності від важкості можливих пошкоджень в енергосистемі країни зберегти електропостачання для максимально можливої кількості споживачів.

Загальні принципи організації електропостачання. Умовно систему розподілу електричної енергії можна поділити на три складові. Перша з них являє собою безпосередньо розподільні мережі з приєднаними до них трансформаторами напругою 10/0,4 кВ, які забезпечують електричною енергією споживачів певної (достатньо великої) території. Другою складовою є мережі низької напруги, у загальному випадку з інтегрованими до них як окремими локальними джерелами енергії, так і, що вва-

© Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ярмолук О.С., Палачов С.О., Наталич В.О., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0003-3484-4597>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-8571-2573>; **** <https://orcid.org/0000-0002-4502-1724>;
***** <https://orcid.org/0000-0003-0242-626X>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

жається більш прогресивним та ефективним, їх груп у вигляді мікромереж. Міжнародні стандарти дають наступне визначення: мікромережа (*microgrid*) – це об'єднана група навантажень і розподілених енергетичних ресурсів у певних межах, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати паралельно з зовнішньою мережею розподілу, а також в ізолюваному режимі. У цьому випадку мова йде щодо забезпечення електропостачання відносно невеликої групи компактно розташованих споживачів. Третя складова – це безпосередньо внутрішні мережі окремих об'єктів електропостачання, які також у загальному випадку можуть включати певні локальні джерела енергії, склад і параметри яких значною мірою залежать від характеристик самого об'єкту.

У роботі пропонується нова структура системи розподілу електричної енергії, сутність якої полягає у забезпеченні гнучкості, узгодженості й ефективності спільного функціонування окремих її складових як у нормальних умовах експлуатації, так і підтримки гарантованого живлення певної групи електроприймачів у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних із обмеженістю або відсутністю можливості отримання електричної енергії від централізованих джерел живлення у залежності від важкості й обсягу їх пошкоджень, що відрізняє її від існуючих пропозицій комплексністю вирішення завдання високонадійного електропостачання з максимальним залученням локальних джерел енергії.

Таким чином, створювана структура системи розподілу електричної енергії повинна забезпечити повноцінне або, принаймні, часткове її функціонування у наступних умовах.

1. Нормальні умови експлуатації, коли наявні локальні джерела енергії працюють паралельно з централізованою системою електропостачання та режими їхньої роботи (участь у покритті загального навантаження) визначаються виключно економічними міркуваннями, з забезпеченням усіх технічних обмежень та вимог.

2. Умови, пов'язані з певними обмеженнями в отриманні електричної енергії з боку централізованої системи. За таких обставин режими роботи локальних джерел енергії також визначаються економічними міркуваннями, але у межах жорстких обмежень щодо можливості отримання енергії з зовнішніх мереж (наприклад, за наявності певного графіку обмежень), дотриманні низки технічних вимог і передбачаючи можливість використання потенціалу регульованого навантаження (перша черга розвантаження). Зазначена ситуація, наприклад, може скластися, коли вийшли з ладу певні джерела централізованого електропостачання, а пропускна здатність елементів мереж не дає змоги в окремих режимах перерозподілити усе навантаження між рештою підстанцій.

3. Робота в умовах запланованих відключень централізованого електропостачання (впровадження графіку відключень). У такому випадку оператор, який здійснює експлуатацію локальних енергетичних ресурсів, планує заздалегідь їхнє оптимальне використання, тобто визначає графік припустимого навантаження та здійснює його розподіл між окремими джерелами енергії з урахуванням потенціалу регульованого навантаження (друга черга розвантаження).

4. Форс-мажорна ситуація, коли зовнішнє електропостачання повністю відсутнє, а локальні джерела енергії працюють на жорстко обмежене критичне навантаження (третя черга розвантаження). При цьому передбачається, що визначене заздалегідь (індивідуально за кожним конкретним об'єктом електропостачання) навантаження є відносно стабільним, мало змінюється у часі, що дає можливість підтримувати майже постійну вихідну потужність з боку локальних джерел енергії.

Розглянемо, яким чином наведені вище вимоги стосуються кожної з зазначених вище складових систем розподілу електричної енергії.

Розподільні мережі. Традиційно електропостачання навіть найбільш важливих споживачів розподільної мережі здійснювалося за двопробеневою схемою з двотрансформаторними підстанціями. При цьому у багатьох випадках відповідні розподільні лінії приєднувалися до різних шин однієї підстанції. Це обґрунтовувалося тим, що вірогідність одночасного пошкодження двох шин або трансформаторів, або живлячих їх ліній вважалася майже нульовою. Сьогоднішні реалії роблять наведене припущення безпідставним.

Це передбачає необхідність переорієнтування на іншу схему побудови розподільних мереж. Одночасно з цим, враховуючи перспективу активного насичення даного сегменту електроенергетики локальними джерелами енергії, зазначені мережі повинні мати високий рівень автоматизації, що забезпечить їм необхідний рівень гнучкості під час керування режимами у будь-яких ситуаціях, з дотриманням у зазначених умовах високого рівня ефективності, надійності й якості електричної енергії.

Дослідження останніх років свідчать, що зазначеним вимогам у значній мірі відповідає використання технології *Soft open points (SOP)* [1–3]. Більш того, в умовах реалій нашої країни є доцільним орієнтуватися на багатотермінальні (багатопортові) *SOP* (рис. 1) [4], де кожна розподільна лінія

спирається на незалежний центр живлення. Така побудова розподільних мереж дає можливість гнучко керувати потоками потужності окремих ліній, забезпечуючи за необхідності повноцінне або, принаймні, обмежене електропостачання споживачів у разі відключення (виходу з ладу) якогось з центрів живлення та, тим самим, підвищуючи надійність електропостачання у екстремальних ситуаціях.

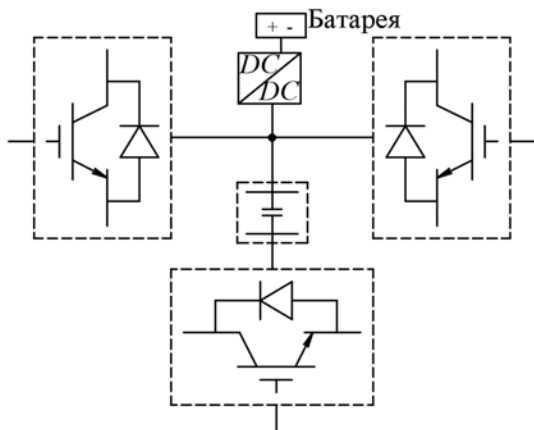


Рис. 1

Багатотермінальні *SOP* будуються з декількох груп *AC/DC* двонапрямлених *voltage source converters (VSC)* конверторів, у яких шини *DC* паралельно з'єднані між собою, а *AC* шини пов'язані з окремими розподільними лініями, що дає змогу підвищити ефективність використання обладнання та, тим самим, зменшити необхідні інвестиції [2].

Одночасно з цим у нормальних режимах незалежне керування потоками активної та реактивної потужностей дає можливість контролювати ступінь оптимальності

потокорозподілу практично у реальному часі у залежності як від поточної зміни навантаження у вузлах мережі, так і від значення вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, які знаходяться в їхній структурі. Це є одним з найважливіших факторів, який дає змогу підвищити обсяг використання локальних джерел енергії, виключивши негативний вплив на режими усієї системи розподілу електричної енергії.

Вважається, що оптимальний режим роботи розподільної мережі досягається у тому випадку, коли на її ділянках формується потокорозподіл, максимально наближений до того, який створювався би за умов роботи зазначеного контуру у замкненому режимі.

У роботі [5] було продемонстровано, що одним з можливих критеріїв у такому випадку є забезпечення на усіх ділянках мережі мінімальних відхилень потокорозподілу активної та реактивної потужностей (враховуючи можливість незалежного керування зазначених параметрів) від тих значень, які мали би місце під час роботи контуру у замкненому режимі, тобто

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (P_{ijt} - P_{ijt}^*)^2 \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (Q_{ijt} - Q_{ijt}^*)^2 \rightarrow \min, \quad t = 1, \dots, T,$$

де N – кількість розподільних ліній; K_i – кількість ділянок i -тої розподільної лінії; P_{ijt} , Q_{ijt} – потокорозподіл на j -й ділянці i -тої розподільної лінії у період часу t ; P_{ijt}^* , Q_{ijt}^* – потокорозподіл на j -й ділянці i -тої розподільної лінії у період часу t за умов її роботи у замкненому режимі.

Додатково варто врахувати, що поширення використання малих локальних однофазних джерел енергії може призвести до появи суттєвої несиметрії напруги у мережах. У таких випадках використання *SOP* може надати значний позитивний ефект як в плані зменшення втрат потужності, так і з точки зору забезпечення необхідних рівнів напруги та нормованих значень інших показників якості електроенергії [6]. Окрім цього, на відміну від стандартних рішень, запропоновані багатотермінальні *SOP* надають можливість більш ефективно вирішити задачу інтеграції установок зберігання енергії у розподільні мережі за рахунок її оптимального перерозподілу між споживачами (рис. 1).

Мережі низької напруги. На даний час використання мікромереж є достатньо поширеним явищем у світовій електроенергетиці. Створені на рівні напруги 0,38 кВ мікромережі зазвичай об'єднують декілька типів розосереджених джерел генерації енергії (здебільше відновлюваних) та установку зберігання енергії. Під час проектування мікромереж планується, що вони мають працювати як паралельно з централізованою системою електропостачання, так і автономно у разі необхідності.

З точки зору надійності електропостачання саме можливість автономної роботи мікромереж має найбільше значення. Перш за все, це стосується випадків, коли електропостачання з боку централізованих джерел стає неможливим.

Основна складність у забезпеченні роботи мікромережі в автономному режимі полягає в необхідності постійної підтримки балансу генерація–навантаження, що вимагає обов'язкової наявності в її структурі регульованих джерел генерації енергії достатньої потужності, установок зберігання енергії, регульованого навантаження. При цьому ступінь використання зазначених джерел значною

мірою залежить від того чи режим автономної роботи у певні періоди часу планується заздалегідь або виникає несподівано, наприклад, у наслідок зовнішнього втручання у роботу енергосистеми.

У зв'язку з цим розглядається один із можливих шляхів полегшення виконання умови узгодження мінливої (у загальному випадку) генерації та змінного навантаження, а, відповідно, й підтримки надійної роботи, який полягає у створенні можливості обміну електроенергією між окремими мікромережами, які розташовано у певній обмеженій зоні. У той же час, у більшості наявних досліджень передбачається використання для цієї мети безпосередньо розподільних мереж [7], що не завжди є можливим в умовах виникнення екстремальних ситуацій.

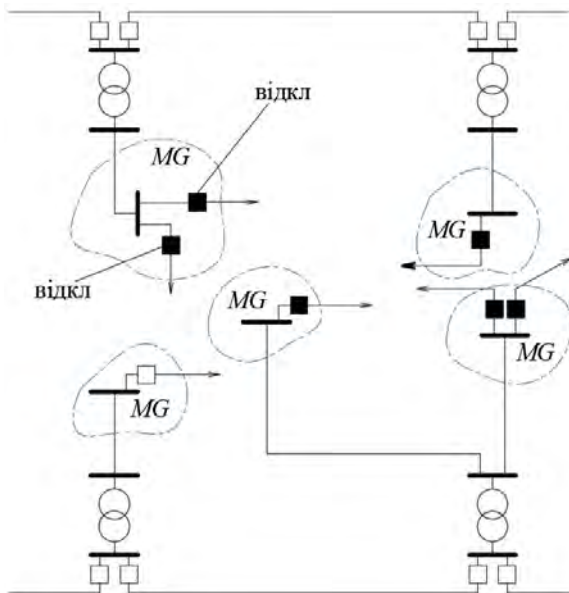


Рис. 2

Як певну альтернативу можна розглядати створення на рівні напруги 0,38 кВ зв'язків між окремими мікромережами (рис. 2) за умови, що вони знаходяться під спільним оперативним керуванням.

У нормальному режимі роботи на зазначених лініях відповідні вимикачі знаходяться у відключеному стані, тобто мережі зберігають розімкнену топологію. При цьому, з метою забезпечення більшої гнучкості та надійності роботи такої структури деякі фахівці як відповідні комутаційні апарати пропонують використовувати так звані *static transfer (interconnecting) switches (STS)* [8].

Лінія зв'язку може вмикатися, коли одній з мікромереж потрібна підтримка додаткової потужності, а інша мікромережа (мікромережі) у той час має певний резерв потужності. Зазначені умови можуть бути визначені наступним чином.

Мікромережа i потребує додаткової потужності, якщо

$$\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} - \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^t < \alpha \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t}.$$

Підтримка i -тої мікромережі з боку m -тої можлива, якщо виконується умова

$$\sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^{\max,t} - \sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^t > \alpha \left[(1-\gamma) \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} + \sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^{\max,t} \right].$$

У наведених виразах $\alpha \approx 0,1$ та визначається експертним шляхом, $\gamma = \left(\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} - \sum_{j=1}^{N_i} S_{MFj}^t \right) / \left(\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} \right)$, де $S_{MGj}^{\max,t}$, S_{MGj}^t – відповідно максимально можлива та фактична

потужності, що генеруються j -м джерелом i -тої мікромережі у момент часу t ; N_i – кількість локальних джерел енергії i -тої мікромережі; $S_{MGk}^{\max,t}$, S_{MGk}^t , N_k – аналогічні показники для k -тої мікромережі.

Аналогічним чином можливо визначити й умови доцільності відключення відповідної лінії зв'язку, тобто роз'єднання мікромереж.

Додатковою позитивною рисою з'єднання мікромереж між собою лініями зв'язку є можливість концентрації в одній із них більш потужних, а, відповідно, і більш ефективних (мікротурбіни, газопоршньові установки) регульованих джерел енергії та/або установок її зберігання колективного використання. Це створить додаткові можливості для балансування режимів у межах кожної мікромережі під час їхньої роботи в автономному режимі.

Доцільність використання зв'язку між мікромережами у нормальному режимі роботи, звісно, потребує певного обґрунтування. Наприклад, це може бути виправдано, коли в одній з мікромереж у певний період часу є профіцит електроенергії, що генерується відновлюваними джерелами енергії. У загальному випадку як альтернатива обміну потужністю між мікромережами розглядається можливість отримання додаткової потужності з енергосистеми.

У той же час автори вважають важливим підкреслити, що в екстремальних умовах наявність та використання зв'язку між мікромережами може бути єдиним варіантом підтримки електропостачання максимальної кількості споживачів без їхнього масового відключення.

Внутрішні мережі об'єктів електропостачання. На перший погляд здається, що питання підтримки живлення найбільш важливих або критичних електроприймачів у певних об'єктах у разі відключення централізованих джерел чітко регламентується діючими нормативними документами, де наведено умови та конкретні схеми організації як безперебійного, так і гарантованого електропостачання [9].

У той же час, ситуація, що складається сьогодні у цій сфері, створює нові виклики, які мають бути враховані у процесі вирішення питання організації електропостачання різноманітних об'єктів.

Суттєво зростає спектр споживачів, які власним коштом або іншим шляхом бажають забезпечити гарантоване електропостачання критичних (на їх погляд) власних електроприймачів.

Припинення централізованого електропостачання надалі не є поодиноким явищем, а може отримати циклічний характер, наприклад, за умов впровадження графіку відключень, що суттєво підвищує частоту використання аварійних схем живлення об'єктів.

Тривалість відключення споживачів може суттєво збільшуватися та залежить від масштабу пошкоджень об'єктів інфраструктури у системах централізованого електропостачання.

Активне впровадження локальних джерел енергії з боку споживачів, по суті, створює умови для перетворення системи розподілу електроенергії в межах об'єкту в аналог мікромережі, що вимагатиме виконання певних умов задля забезпечення її максимально ефективного функціонування у будь-яких можливих ситуаціях.

Окрім цього додатково варто врахувати можливість появи зарядних станцій зі зростанням парку електромобілів, доцільність впровадження замість традиційних дизельних генераторів як засіб забезпечення гарантованого електропостачання, що передбачено діючими нормами, наприклад [9], когенераційного обладнання, враховуючи потребу багатьох споживачів і у тепловій енергії.

Зазначені обставини ускладнюють завдання розробки уніфікованого рішення щодо побудови оптимальної структури внутрішніх мереж об'єкту електропостачання, яка буде залежати як від обсягу критичного навантаження, яке, по суті, може визначатися індивідуально кожним окремим споживачем, так і наявності, номенклатури та параметрів існуючих локальних засобів генерування та зберігання енергії.

Висновки. Вирішення питань збільшення питомої ваги децентралізованих джерел енергії у забезпеченні електропостачання широкого кола споживачів із широким залученням локальних енергетичних ресурсів в умовах тривалої загрози зовнішнього руйнівного втручання в роботу об'єктів Об'єднаної енергетичної системи України може бути реалізовано за рахунок суттєвої зміни принципів побудови усіх ланок систем розподілу електричної енергії.

Запропоновані в роботі технічні рішення щодо побудови розподільних мереж пов'язані з використанням багатотермінальних силових перетворювачів, що у порівнянні з традиційною технологією *SOP* за рахунок гнучкості дає змогу додатково підвищити надійність електропостачання в умовах відмови окремих сегментів Об'єднаної енергетичної системи України. Одночасне залучення *micro-grids* у мережі низької напруги зі створенням певних електричних зв'язків між ними, використання власних джерел енергії безпосередньо у мережах самих об'єктів електропостачання надає можливість не тільки підтримати живлення максимальної кількості електроприймачів у залежності від поточного стану Об'єднаної енергетичної системи, але й створить умови для ефективного функціонування усєї системи розподілу електричної енергії в нормальних умовах їхньої експлуатації. Реалізація усіх зазначених технічних рішень потребує подальших досліджень, спрямованих на наукове обґрунтування принципів та розробку безпосередньо алгоритмів керування силовими перетворювачами адаптованих до різноманітної їхньої локалізації й умов використання.

1. Bloemink J.M., Green T.C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. *Proc. IEEE PES General Meeting*. 2010. Vol. 1. Pp. 1–8.

2. Fuad K.S., Hafezi H., Kauhaniemi K., Laaksonen H. Soft Open Point in Distribution Networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8 (2). Pp. 210550–210565. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039552>.

3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation. *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. Pp. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.005>.

4. Deakin M., Taylory P.C., Bialek J., Ming W. Design and Operation of Hybrid Multi-Terminal Soft Open Points using Feeder Selector Switches for Flexible Distribution System Interconnection. Proc. 22nd *Power Systems Computation Conference (PSCC 2022)*, Porto, Portugal, June 27 – July 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.05817>.
5. Popov V., Tkachenko V., Yarmoliuk O., Yatsenko D. Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control book series*. Switzerland: Springer Cham, 2022. Vol. 220. Pp. 319–346. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14.
6. Lou C., Yang J., Vega-Fuentes E., Meena N.K., Min L. Multi-terminal phase-changing soft open point SDP modeling for imbalance mitigation in active distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 142 (5). No 108228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108228>.
7. Wang Z., Chen B., Wang J., Begovic M.M., Chen C. Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No 1. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2329846>.
8. Pashajavid E., Shahnian F., Ghosh A. Development of a Self-Healing Strategy to Enhance the Overloading Resilience of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8. No 2. Pp. 868–880. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601>.
9. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 104 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356>.

MULTI-LEVEL FLEXIBLE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEMS

A.F. Zharkin¹, V.A. Popov², O.S. Yarmoliuk², S.O. Palachov¹, V.O. Natalych²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

37, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: tig@ukr.net, yarmolvuk.jena@gmail.com.

In the conditions of a long-term threat of the destruction of the energy structure, the distribution networks of our country need to change the principles of their construction. For this purpose, a multi-level structure of the construction of the distribution system is proposed. Such a structure, due to the use of modern hardware solutions and extensive involvement of local energy resources, makes it possible to ensure a high level of their flexibility. In order to maintain power supply to the maximum number of consumers in the event of damage of varying severity and duration that may occur in the centralized power supply system. References 9, figures 2.

Keywords: distribution systems, reliability, power electronics, microgrids.

1. Bloemink J.M., Green T.C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. Proc. IEEE PES General Meeting. 2010. Vol. 1. Pp. 1–8.
2. Fuad K.S., Hafezi H., Kauhaniemi K., Laaksonen H. Soft Open Point in Distribution Networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8 (2). Pp. 210550–210565. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039552>
3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation. *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. Pp. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.005>
4. Deakin M., Taylory P.C., Bialek J., Ming W. Design and Operation of Hybrid Multi-Terminal Soft Open Points using Feeder Selector Switches for Flexible Distribution System Interconnection. Proc. 22nd *Power Systems Computation Conference (PSCC 2022)*, Porto, Portugal, June 27 – July 1, 2022. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.05817>
5. Popov V., Tkachenko V., Yarmoliuk O., Yatsenko D. Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control book series*. Switzerland: Springer Cham, 2022. Vol. 220. Pp. 319–346. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14
6. Lou C., Yang J., Vega-Fuentes E., Meena N.K., Min L. Multi-terminal phase-changing soft open point SDP modeling for imbalance mitigation in active distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 142 (5), No. 108228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108228>
7. Wang Z., Chen B., Wang J., Begovic M.M., Chen C. Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6, No. 1. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2329846>
8. Pashajavid E., Shahnian F., Ghosh A. Development of a Self-Healing Strategy to Enhance the Overloading Resilience of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, No 2. Pp. 868–880. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601>
9. State construction standards V.2.5-23:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Designing electrical equipment of civil objects. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010. 104 p. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356> (Ukr).

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 06.06.2024

МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ З СЕС ТА УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

І.В. Блінов^{1*}, докт. техн. наук, Є.В. Парус^{1**}, канд. техн. наук, П.В. Шиманюк^{1***}, докт. філос.,
А.О. Ворушило^{2****}

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: blinovihor@gmail.com; paruseugene@gmail.com; shymanp@ied.org.ua.

² ТОВ «Проксіма рісєрч інтернешнл»,

пр. Миколи Бажана, 10А, Київ, 02000, Україна,

e-mail: anton2320@gmail.com.

Наведено опис моделі оптимізації функцій мікромережі для розв'язання задачі зменшення вартості закупівлі електроенергії власником такої мікромережі на роздрібному ринку електричної енергії. Формалізовано цільову функцію мінімізації вартості закупівлі електричної енергії. Сформульовано підходи до визначення коефіцієнтів штрафних функцій, призначених для відсікання технічно недопустимих режимів мікромережі. Запропоновано математичну модель установки зберігання енергії (УЗЕ), в якій формалізовано функції розрахунку технологічних витрат електроенергії. Наведено систему обмежень для задачі мінімізації вартості закупівлі електричної енергії. Визначено підходи до розв'язання задачі оцінювання ефекту від експлуатації СЕС та УЗЕ в мікромережі з використанням результатів оптимізації. Представлено приклади оптимізації функціонування мікромережі для підприємства з власними СЕС та УЗЕ. Відзначено потребу у додатковому контролі економічної доцільності залучення УЗЕ до регулювання балансів електроенергії на підприємстві. Бібл. 17, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: мікромережа, сонячна електростанція, установка зберігання енергії, оптимізація.

Вступ. На сьогодні у світі зростає інтерес до нових принципів генерації, розподілу та споживання енергії, які передбачають реалізацію концепції Smart Grid [1-3]. Одним із напрямків розвитку Smart Grid є побудова мікромереж [4, 5]. Згідно багаточастинного стандарту IEC TS 62898 [6, 7] мікромережа є групою взаємопов'язаних навантажень і розподіленої генерації із визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні системи розподілу електричної енергії [8], що діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати в умовах приєднання до систем розподілу або в ізолюваному (острівному) режимі роботи. Часто мікромережі реалізуються з застосуванням установок зберігання енергії [9-12] з метою накопичення її надлишку для подальшого використання задля балансування попиту в межах мікромережі та забезпечення резервного живлення під час відключень. Сьогодні в Україні найбільш очевидно перевагою мікромереж є їхня експлуатація задля забезпечення живлення споживачів в умовах відключень електропостачання, тобто забезпечення роботи мікромереж в ізолюваному режимі. Разом із тим згідно стандарту IEC TS 62898-1 [6] одним з варіантів впровадження мікромереж є зниження витрат на закупівлю електричної енергії для їхніх користувачів шляхом оптимізації роботи обладнання, зокрема і відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), керування навантаженнями [13], що входять до складу мікромережі.

Важливо, що організаційні та операційні питання задля досягнення цих цілей значною мірою залежать від нормативно-правової бази [14, 15], зокрема від статусу мікромережі, наприклад, законодавчих можливостей для власника мікромережі виступати у ролі як виключно споживача, так одночасно споживача та виробника електричної енергії. Для України характерним є випадок, коли власник (або оператор мікромережі) не може відпускати в загальну систему розподілу вироблену електричну енергію з ВДЕ. В цьому випадку графік сумарного навантаження мікромережі в кожній годині доби має відображати споживання електричної енергії з системи розподілу, але не її відпуск, або дорівнювати нулю.

Блінов І.В., Парус Є.В., Шиманюк П.В., Ворушило А.О., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-8010-5301>; ** <https://orcid.org/0000-0001-9087-3902>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-7585-7493>; **** <https://orcid.org/0009-0002-3162-3502>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Зменшення витрат у цьому випадку можливе за рахунок керування графіком споживання електричної енергії з урахуванням погодинних цін в оптовій частині ринку, платежів за передачу та розподіл електричної енергії, а також додаткових платежів постачальнику на роздрібному ринку. Реалізація цього можлива за рахунок використання систем енергетичного менеджменту мікромережі (СЕМ), які в своїй основі вирішують відповідні оптимізаційні задачі.

В межах публікації розглянуто один з варіантів використання СЕМ для підприємства, що не здійснює відпуск електричної енергії в систему розподілу, має у своєму складі навантаження, сонячну електростанцію (СЕС) та систему зберігання електричної енергії. При цьому математична модель сформована з огляду на подання задачі оптимізації у нормалізованій формі, придатній задля застосування існуючих методів нелінійної оптимізації [16]. Слід зауважити, що в роботі СЕС розглядається як альтернативне нерегульоване джерело електроенергії, тому математичний апарат сформовано таким чином, щоб за вхідні данні використовувалися відповідні прогнозовані графіки відпуску електричної енергії [17].

Економічна вигода від експлуатації СЕС розраховується як ринкова вартість тих обсягів електричної енергії, які заміщуються нерегульованою генерацією СЕС. Експлуатація УЗЕ дає змогу додатково зменшити вартість закупівлі електроенергії за рахунок накопичення електричної енергії у години з її низкою ринковою вартістю чи накопичення профіциту генерації СЕС та відпуску накопиченої електроенергії у години з високою її вартістю. Тоді задля зменшення витрат на закупівлю електроенергії необхідно, враховуючи прогнозований графік електроспоживання підприємства і прогнозований графік генерації СЕС, сформувати оптимальний графік експлуатації УЗЕ. Задача побудови оптимального графіка функціонування УЗЕ відноситься до задач планування графіків електроспоживання та роботи обладнання підприємства. Реалізацію запланованого графіка функціонування УЗЕ покладено на СЕМ. Відповідно математична модель задачі мінімізації вартості закупівлі електричної енергії має імітувати функції управління СЕМ в частинах контролю балансів електричної енергії на підприємстві та управління роботою УЗЕ.

Метою статті є опис розробленої математичної моделі оптимізації функціонування мікромережі із сонячною електричною станцією (задля забезпечення власних потреб електроспоживання), установкою зберігання електроенергії та навантаженням підприємства під управлінням системи енергоменеджменту з метою зменшення витрат на закупівлю електричної енергії на роздрібному ринку.

Ціль задачі оптимізації. Ціль оптимізації функціонування мікромережі полягає у зменшенні витрат на закупівлю електричної енергії власником мікромережі у постачальника на роздрібному ринку. Змінними оптимізації є погодинні обсяги закупівлі електричної енергії у постачальника, а також обсяги накопичення і відпуску електроенергії в УЗЕ

$$\text{Min} \left(\sum_{h=1}^{24} (C_h^{\text{EN}} \cdot V_h^{\text{EN}} + 0 \cdot V_{(r),h}^{\text{ESS}} + 0 \cdot V_{(s),h}^{\text{ESS}} + PF_h^{\text{ESS}} + PF_h^{\text{SPP}}) \right), \quad (1)$$

де V_h^{EN} , C_h^{EN} – погодинні значення відповідно обсягу (змінна оптимізації) та ціни електроенергії, проданої постачальником; $V_{(r),h}^{\text{ESS}}$, $V_{(s),h}^{\text{ESS}}$ – погодинні значення обсягів відповідно відпуску та накопичення електроенергії в УЗЕ (змінні оптимізації); PF_h^{ESS} , PF_h^{SPP} – штрафні функції.

Погодинні значення ціни проданої постачальником електроенергії в (1) визначаються як

$$C_h^{\text{EN}} = C_h^{\text{S}} + T_{\text{TS}} + T_{\text{DS}} \forall h = [1..24],$$

де C_h^{S} – ринкова ціна електричної енергії, отриманої від постачальника у розрахункову годину h ; T_{TS} – тариф на передачу електроенергії; T_{DS} – тариф на розподіл електричної енергії.

Штрафні функції в (1) призначені для відсікання окремих технологічно недопустимих режимів з області розв'язків, а саме:

- технічно недопустимий режим одночасного накопичення та відпуску електричної енергії в УЗЕ;
- технічно недопустимий режим профіциту генерації СЕС, некомпенсований іншими складовими балансу електроенергії на підприємстві.

Відсікання недопустимих режимів з області розв'язків задачі оптимізації балансів електроенергії на підприємстві проблематично реалізувати алгебраїчними рівняннями у системі обмежень. Тому в математичній моделі використовується відсікання недопустимих рішень системою штрафів у цільо-

вій функції. При цьому основне завдання штрафних функцій – зробити апріорі невиконаними рішення, в яких присутні технологічно недопустимі режими.

Штрафи за режимів з одночасним накопиченням і відпуском електричної енергії в УЗЕ розраховуються як

$$PF_h^{ESS} = K_{PF}^{ESS} \cdot V_{(r),h}^{ESS} \cdot V_{(s),h}^{ESS} \forall h = [1..24]. \quad (2)$$

Коефіцієнт штрафу K_{PF}^{ESS} в (2) підбирається емпірично і його значення залежить від відношень між обсягами електроспоживання та ціною електроенергії. Штрафна функція (2) дорівнює нулю для рішень, в яких відсутні одночасно накопичення і відпуск електроенергії від УЗЕ. При цьому коефіцієнт штрафу повинен мати достатньо велике значення, за якого ненульове значення штрафної функції завжди негативно впливатиме на значення (1).

Штрафи профіцит генерації СЕС, некомпенсовані іншими складовими балансу електроенергії на підприємстві, розраховуються за формулою

$$PF_h^{SPP} = K_{PF}^{SPP} \cdot V_{R,h}^{SPP} \cdot C_h^{EN} \forall h = [1..24], \quad (3)$$

де K_{PF}^{SPP} – коефіцієнт штрафу за некомпенсований профіцит СЕС; $V_{R,h}^{SPP}$ – погодинний обсяг обмеження генерації СЕС (додаткова змінна оптимізації).

Коефіцієнт штрафу за некомпенсований профіцит СЕС підбирається емпірично. Значення цього коефіцієнта залежить від відношень між встановленою потужністю СЕС та обсягами електроспоживання підприємства. При цьому значення ціни електроенергії, отриманої від постачальника, в (3) компенсує вплив коливання погодинної вартості електроенергії та дає можливість підібрати єдине значення коефіцієнта штрафу для поточної архітектури СЕМ. Загалом значення коефіцієнта штрафу за некомпенсований профіцит СЕС має бути достатньо малим, щоб не впливати на пошук оптимальних рішень у ті години доби, коли відсутній профіцит генерації СЕС.

Підбір розмірностей достатньо великого значення K_{PF}^{ESS} та достатньо малого значення K_{PF}^{SPP} має узгоджуватися з обчислювальною точністю розрахунків. Наприклад, у розрахунках з використанням 8-байтових дійсних чисел слід дотримуватися відношення

$$\dim \frac{K_{PF}^{ESS}}{K_{PF}^{SPP}} \ll 10^{17}.$$

Використання штрафних функцій вносить нелінійність у цільову функцію (1). Тому для розв'язання задачі зменшення витрат на закупівлю електричної енергії у електропостачальника необхідно використовувати методи нелінійної оптимізації.

Модель режимів УЗЕ. Структурно математичний апарат функціонування УЗЕ формалізовано

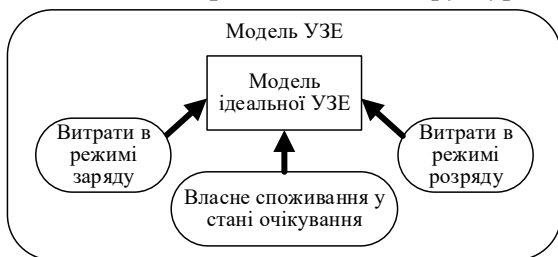


Рис. 1

як модель ідеального УЗЕ, на яку накладено складові витрат електроенергії в різних режимах роботи накопичувача (рис.1). Під моделлю ідеального УЗЕ в межах даної роботи розуміється формальне подання функцій накопичувача електричної енергії без технологічних витрат електричної енергії. Модель ідеального УЗЕ визначає функції, характерні для трьох базових режимів: очікування, заряду та зряду.

1. У стані очікування (за відсутності потоків заряду чи розряду) УЗЕ зберігає заряд незмінним

$$W_h^{ESS} = W_{h-1}^{ESS} : V_{(r),h}^{ESS} = 0 \vee V_{(s),h}^{ESS} = 0 \forall h = [2..24],$$

де W_{h-1}^{ESS} , W_h^{ESS} – обсяги накопиченого заряду в УЗЕ відповідно у попередню $h-1$ та поточну h розрахункові години; $V_{(r),h}^{ESS}$, $V_{(s),h}^{ESS}$ – значення обсягів відповідно відпуску та накопичення електроенергії в УЗЕ для години h .

2. В режимі заряду обсяг накопичення електроенергії в УЗЕ збільшується

$$W_h^{ESS} = W_{h-1}^{ESS} + V_{(s),h}^{ESS} \forall h = [2..24].$$

3. В режимі розряду обсяг накопичення електроенергії в УЗЕ зменшується

$$W_h^{ESS} = W_{h-1}^{ESS} - V_{(r),h}^{ESS} \forall h = [2..24].$$

Тоді для кожної години k обсяг накопиченої в УЗЕ електроенергії

$$W_k^{\text{ESS}} = W_{\text{beg}}^{\text{ESS}} + \sum_{h=1}^k (V_{(s),h}^{\text{ESS}} - V_{(r),h}^{\text{ESS}}) \forall k = [1..24], \quad (4)$$

де $W_{\text{beg}}^{\text{ESS}}$ – рівень заповнення УЗЕ електричною енергією на початку розрахункової доби.

Математичне відображення базових функцій ідеального УЗЕ доповнюється функціями технологічних витрат електроенергії. Так само визначаються функції витрат електроенергії у стані очікування, в режимі заряду і у режимі розряду. Крім того, в залежності від особливостей конструкції УЗЕ складові технологічних витрат групуються за ознакою впливу на рівень заряду УЗЕ:

– процеси, які впливають на рівень заряду УЗЕ (наприклад, саморозряд накопичувача), відображаються функціями витрат у рівняння (4);

– процеси, які не впливають на рівень заряду УЗЕ (наприклад, електроспоживання системи управління УЗЕ), відображаються функціями витрат у рівняннях балансів електроенергії;

– незмінні у будь-яких режимах роботи УЗЕ технологічні витрати електроенергії можуть бути виокремлені як складова електроспоживання підприємства.

Втрати електроенергії у стані очікування. Втрати електроенергії для УЗЕ у стані очікування розраховуються з приведенням до деякого фіксованого періоду часу, наприклад, до розрахункової години. У загальному випадку втрати електроенергії для УЗЕ у стані очікування залежать від обсягу накопиченої в УЗЕ електричної енергії. Лінійна функція витрат електроенергії як залежність від обсягу накопиченої електричної енергії

$$\Delta V_{(ws)}^{\text{ESS}} (W_h^{\text{ESS}}) = A_{(ws)}^{\text{ESS}} \cdot W_h^{\text{ESS}} + B_{(ws)}^{\text{ESS}} \left[\begin{array}{l} A_{(ws)}^{\text{ESS}} = \frac{\Delta V_{(ws)\text{max}}^{\text{ESS}} - \Delta V_{(ws)\text{min}}^{\text{ESS}}}{W_{\text{max}}^{\text{ESS}}} \forall h = [1..24], \\ B_{(ws)}^{\text{ESS}} = \Delta V_{(ws)\text{min}}^{\text{ESS}} \end{array} \right. \quad (5)$$

де $\Delta V_{(ws)\text{min}}^{\text{ESS}}$, $\Delta V_{(ws)\text{max}}^{\text{ESS}}$ – погодинні витрати електричної енергії за рівнями відповідно мінімального та максимального заповнення УЗЕ.

Потреба у врахуванні витрат електроенергії для УЗЕ у стані очікування як залежності від обсягу накопиченої електричної енергії виникає для УЗЕ з відносно великими значеннями саморозряду, наприклад, для свинцевих акумуляторів. Для літєвих акумуляторів значення саморозряду протягом розрахункової доби вкрай малі і допустимо прийняти незмінне значення витрат електроенергії для УЗЕ у стані очікування

$$\Delta V_{(ws)}^{\text{ESS}} (W_h^{\text{ESS}}) = \Delta V_{(ws)\text{min}}^{\text{ESS}} \rightarrow \text{const} \forall h = [1..24]. \quad (6)$$

Втрати електроенергії у режимі заряду УЗЕ. Втрати електроенергії у режимі заряду УЗЕ розраховуються з приведенням до значення струму чи обсягу електроенергії за фіксований період часу, наприклад, за розрахункову годину. В межах даної публікації під втратами електроенергії у режимі заряду УЗЕ розуміється та частина технологічних витрат, яка виникає за ненульових струмів заряджання УЗЕ. Втрати електроенергії в режимі заряджання УЗЕ відображають передусім втрати електроенергії в інверторі та у кабельних лініях. Тому функція втрат електроенергії у режимі заряду УЗЕ матиме переважно квадратичну залежність від струмів заряджання. Проте, в роботі для спрощення розглядається лінійна характеристика.

Лінійна залежність втрат електроенергії від потужності заряду УЗЕ має вигляд

$$\Delta V_{(cs)}^{\text{ESS}} = \frac{\Delta V_{(cs)\text{max}}^{\text{ESS}}}{V_{(s)\text{max}}^{\text{ESS}}} \cdot V_{(s),h}^{\text{ESS}} = K_{(cs)}^{\text{ESS}} \cdot V_{(s),h}^{\text{ESS}} \forall h = [1..24], \quad (7)$$

де $V_{(s)\text{max}}^{\text{ESS}}$ – максимальний погодинний обсяг заряду УЗЕ; $\Delta V_{(cs)\text{max}}^{\text{ESS}}$ – втрати електроенергії в режимі максимального заряду УЗЕ.

Відношення $K_{(cs)}^{\text{ESS}}$ визначає долю втрат електроенергії в обсягах потоку заряджання УЗЕ. Втрати електроенергії в інверторі та у кабельних лініях приймаємо 10% – 12% на цикл заряду/розряду УЗЕ.

Втрати електроенергії у режимі розряду УЗЕ. Аналогічно режиму заряду втрати електроенергії у режимі розряду УЗЕ розраховуються з приведенням до значення струму чи обсягу електроенергії за фіксований період часу, наприклад, за розрахункову годину. Лінійна залежність втрат електроенергії у режимі розряду УЗЕ від потужності розряджання враховується функцією

$$\Delta V_{(cr)}^{ESS} = \frac{\Delta V_{(cr)max}^{ESS}}{V_{(r)max}^{ESS}} \cdot V_{(r),h}^{ESS} = K_{(cr)}^{ESS} \cdot V_{(r),h}^{ESS} \forall h = [1..24], \quad (8)$$

де $V_{(r)max}^{ESS}$ – максимальний погодинний обсяг розряду УЗЕ; $\Delta V_{(rs)max}^{ESS}$ – втрати електроенергії в режимі максимального розряду УЗЕ; $K_{(cr)}^{ESS}$ – доля втрат електроенергії в обсягах потоку розряджання УЗЕ, яка за статистичними даними може оцінюватися як $K_{(cr)}^{ESS} \approx 0,06$.

Функція обсягу накопиченої в УЗЕ електроенергії. У системі обмежень рівностей та нерівностей стани УЗЕ подаються незалежними змінними значень погодинних обсягів заряджання і розряджання, а також обсягом накопиченої в УЗЕ електроенергії. Втрати електроенергії в режимах заряджання і розряджання УЗЕ впливають на відношення між обсягами накопиченої та відпущеної електроенергії і тому повинні враховуватися у функції розрахунку обсягів накопиченої електроенергії (4).

Тому функція розрахунку обсягів накопиченої в УЗЕ електроенергії для години h

$$W_h^{ESS} = W_{beg}^{ESS} + \sum_{k=1}^h (V_{(s),k}^{ESS} - V_{(r),k}^{ESS} - \Delta V_{(ws),k}^{ESS} - \Delta V_{(cs),k}^{ESS} - \Delta V_{(cr),k}^{ESS}) \forall h = [1..24].$$

Нехай технологічні витрати електроенергії УЗЕ у стані очікування не залежать від обсягів накопиченої електроенергії і розраховуються по (6). Тоді, враховуючи (6) – (8), маємо остаточно

$$W_h^{ESS} = W_{beg}^{ESS} + (1 - K_{(cs)}^{ESS}) \sum_{k=1}^h V_{(s),k}^{ESS} - (1 + K_{(cr)}^{ESS}) \sum_{k=1}^h V_{(r),k}^{ESS} - h \cdot \Delta V_{(ws)min}^{ESS} \forall h = [1..24]. \quad (9)$$

Функція (9) має сепарабельне подання незалежних змінних $V_{(s),k}^{ESS}$ та $V_{(r),k}^{ESS}$ і може достатньо просто бути формалізована до нормального подання, прийнятеного для розрахунків існуючими методами та засобами нелінійної оптимізації.

Система обмежень задачі оптимізації. До системи обмежень цільової функції (1) належать: рівняння погодинних балансів електроенергії в мікромережі, обмеження для контролю рівня заповнення УЗЕ, обмеження на погодинні обсяги заряджання і розряджання УЗЕ.

Рівняння погодинних балансів електроенергії в мікромережі мають наступний вигляд:

$$V_h^{EN} + V_h^{SPP} - V_{R,h}^{SPP} + V_{(r),h}^{ESS} - V_{(s),h}^{ESS} - V_h^{con} - V_{(wso)}^{ESS} = 0 \forall h = [1..24],$$

де V_h^{con} – обсяг електроспоживання підприємства у годину h ; $V_{(wso)}^{ESS}$ – обсяг електроспоживання системи управління УЗЕ у годину h .

Обмеження для контролю рівня заповнення УЗЕ протягом розрахункової доби мають вигляд

$$W_{min}^{ESS} \leq W_h^{ESS} \leq W_{max}^{ESS} \forall h = [1..24],$$

де W_{min}^{ESS} , W_{max}^{ESS} – відповідно мінімальний та максимальний обсяги накопичення електроенергії в УЗЕ.

Слід зазначити, що в (9) використовується значення початкового обсягу накопиченої в УЗЕ електроенергії W_{beg}^{ESS} . Але за результатами оптимізації зазвичай формується добовий графік функціонування УЗЕ з мінімально допустимим обсягом накопичення електроенергії в УЗЕ. У разі потреби зафіксувати на бажаному рівні обсяг накопиченої в УЗЕ електроенергії в кінці розрахункової доби на основі (9) формується додаткове рівняння добового балансу

$$W_{beg}^{ESS} + (1 - K_{(cs)}^{ESS}) \sum_{h=1}^{24} V_{(s),h}^{ESS} - (1 + K_{(cr)}^{ESS}) \sum_{h=1}^{24} V_{(r),h}^{ESS} - 24 \cdot \Delta V_{(ws)min}^{ESS} = W_{end}^{ESS},$$

де W_{end}^{ESS} – рівень заповнення УЗЕ електричною енергією на кінець розрахункової доби.

Додатково для змінних оптимізації означаються межі допустимих значень для кожної години розрахункової доби

$$[0 \leq V_h^{EN} \leq V_{max}^{EN}] \wedge [0 \leq V_{(r),h}^{ESS} \leq V_{(r),max}^{ESS}] \wedge [0 \leq V_{(s),h}^{ESS} \leq V_{(s),max}^{ESS}] \wedge [0 \leq V_{R,h}^{SPP}] \forall h = [1..24].$$

Аналіз результатів моделювання. Ефективність оптимізації функціонування мікромережі, що розглядається, може бути оцінена шляхом визначення вигоди спільної роботи від СЕС та УЗЕ під управлінням СЕМ у порівнянні із витратами на закупівлю електроенергії власником мікромережі на роздрібному ринку.

За такої постановки задачі пошук оптимального рішення щодо технічних характеристик СЕС і УЗЕ, а також відповідних графіків функціонування УЗЕ, здійснюється шляхом розв'язання задачі оптимізації

$$\text{Max} \left(\text{Prof}_f^{\text{MG}} - \text{Cost}_f^{\text{MG}} - \text{Cost}_{\text{const}}^{\text{MG}} \right) = \text{Max} \left(\Delta \text{FB}_f^{\text{MG}} - \text{Cost}_{\text{const}}^{\text{MG}} \right), \quad (10)$$

де $\text{Cost}_{\text{const}}^{\text{MG}}$ – постійна складова витрат; $\text{Cost}_f^{\text{MG}}$ – витрати, пов'язані із реалізацією функцій мікромережі; $\text{Prof}_f^{\text{MG}}$ – вигода, набута підприємством внаслідок зменшення витрат за закупівлю електричної енергії; $\Delta \text{FB}_f^{\text{MG}}$ – чиста вигода від експлуатації мікромережі.

Запропонована в роботі модель передбачає оптимізацію експлуатації вже існуючої СЕС та добового графіка функціонування УЗЕ на основі інформації про погодинні ціни у сегменті РДН, а також прогнозу погодинних обсягів відпуску електричної енергії від СЕС і прогнозу погодинних обсягів електроспоживання підприємства. Фактично без використання УЗЕ функції СЕМ зводяться до обмеження профіцитної частини обсягів генерації СЕС вище поточного обсягу електроспоживання підприємства з метою недопущення появи потоків електроенергії у мережу системи розподілу. Вигода від експлуатації СЕС розраховується з використанням значення вартості електроенергії, яку не закуплено у постачальника електричної енергії завдяки генерації СЕС. Добові витрати на забезпечення функцій мікромережі пов'язуються із споживанням власних потреб СЕМ та СЕС. Тоді функція вигоди від експлуатації мікромережі за розрахункову добу визначається як

$$\Delta \text{FB}_D^{\text{MG}} = \text{Prof}_D^{\text{MG}} - \text{Cost}_D^{\text{MG}} = \sum_{h=1}^{24} C_h^{\text{EN}} \cdot \left(V_h^{\text{SPP}} - V_{\text{o.n.},h}^{\text{SPP}} - V_{\text{o.n.},h}^{\text{MG}} \right),$$

де C_h^{EN} – ціна закупівлі підприємством електроенергії для години h ; V_h^{SPP} – обсяг відпущеної від СЕС електроенергії для години h ; $V_{\text{o.n.},h}^{\text{SPP}}$, $V_{\text{o.n.},h}^{\text{MG}}$ – обсяги споживання власних потреб відповідно СЕС та СЕМ для години h .

Впровадження УЗЕ у структуру СЕМ підприємства дає можливість додатково зменшити витрати на закупівлю електроенергії у постачальника за певного рівня цін на ринку. Збільшення вигоди за допомогою УЗЕ досягається за рахунок накопичення електричної енергії у години мінімальних ринкових цін та у години профіциту генерації СЕС із відпуском накопиченої електроенергії в години максимальних ринкових цін. Функції СЕМ при цьому розширюються управлінням режимами функціонування УЗЕ. Оптимальний графік функціонування УЗЕ протягом розрахункової доби визначається за результатами оптимізації (1), а значення вигоди (зменшення витрат на закупівлю електроенергії за рахунок експлуатації УЗЕ) враховується в (10).

Оптимізація по (10) із застосуванням описаної у роботі моделі виконується на етапі проектування для вибору оптимальних характеристик мікромережі. При цьому змінюються вимоги щодо вхідних даних для розрахунків. У процесі експлуатації мікромережі запропонована математична модель розв'язує задачу формування оптимального добового графіка погодинних обсягів закупівлі електроенергії у постачальника та формування оптимального графіка режимів функціонування УЗЕ. Задля розв'язання поставленої задачі використовуються вхідні дані, отримані за результатами прогнозування, а саме: прогнозовані на добу погодинні ціни закупівлі електроенергії у постачальника, прогнозований на добу графік погодинних обсягів електроспоживання на підприємстві, а також добовий прогноз погодинних обсягів відпуску електричної енергії від СЕС.

В задачах проектування необхідно додатково враховувати сезонні коливання значень ринкових цін та обсягів електроенергії. Тому розрахунки слід виконувати для розрахункового року (чи для окремих характерних днів з подальшою екстраполяцією результатів до розрахункового року). При цьому для розрахунків доцільно використовувати ретроспективну інформацію, що дає можливість безпосередньо порівняти економічний ефект (зменшені витрати на закупівлю електроенергії) від експлуатації мікромережі загалом та окремих її складових із витратами на закупівлю електроенергії на підприємстві без мікромережі чи окремих її складових.

Наведемо приклади розрахунків окремих складових ефекту від функціонування мікромережі на основі ретроспективної інформації за 21 червня та 22 грудня 2023 року.

У прикладі розрахунків обрано характеристики УЗЕ з літєвими акумуляторами номінальною ємністю 40 кВт·год та вартістю 1 000 000 ₴. Рекомендована виробником глибина розряду $DoD=90\%$. Робоча ємність УЗЕ становить 36 кВт·год. Максимальний погодинний обсяг заряджання УЗЕ стано-

виль 15 кВт·год, а розрядження – 30 кВт·год. Технологічні витрати електроенергії на живлення системи управління УЗЕ становлять 0,025 кВт·год. Технологічні витрати електроенергії на живлення системи управління УЗЕ через інвертор не враховувалися. Коефіцієнти втрат електроенергії в обсягах потоків відповідно заряджання і розряджання УЗЕ: $K_{(es)}^{ESS} = K_{(cr)}^{ESS} = 0,06$. Початковий обсяг заряду УЗЕ (на початок розрахункової доби) означено як $W_{beg}^{ESS} = 0$. Обсяг заряду УЗЕ на кінець розрахункової доби не фіксувався. На підприємстві також встановлено 2 СЕС по 40 кВт із вартістю 1 977 600 грн. Графіки генерації СЕС апроксимовано за ретроспективними даними Гарантованого покупця.

Оптимізацію виконано засобами *Frontline's Standard Excel Solver (Generalized Reduced Gradient algorithm)*. Результати розв'язання задачі мінімізації вартості закупівлі електроенергії наведено на рис. 2. Зокрема, для ретроспективних даних за 22 грудня 2023 року погодинні баланси електроенергії наведено на рис. 2, а, а графіки функціонування УЗЕ – на рис. 2, в. Для ретроспективних даних за 21 червня 2023 року погодинні баланси електроенергії відображено на рис. 2, б, а графіки функціонування УЗЕ – на рис. 2, з.

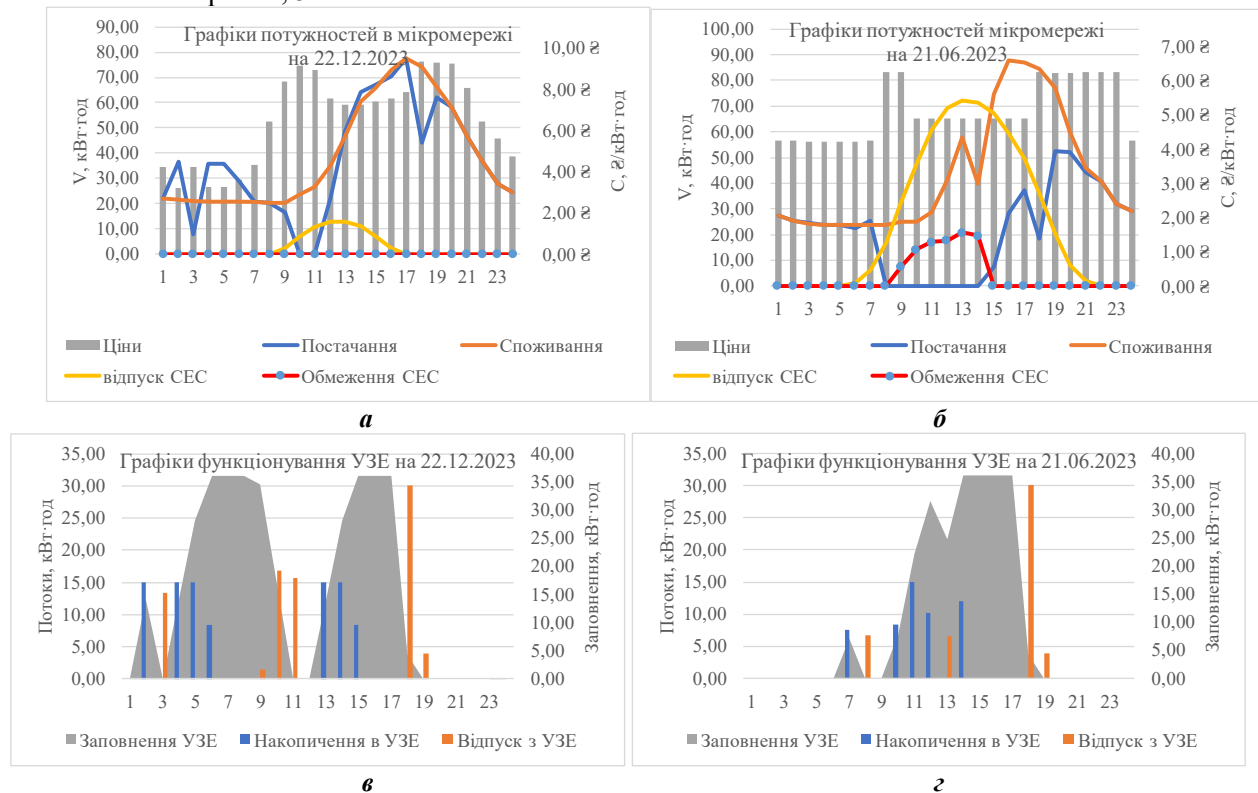


Рис. 2

На 21 червня (рис. 2, б) з 10:00 до 14:00 у локальній мережі підприємства спостерігався профіцит генерації СЕС, коли погодинні обсяги відпуску електроенергії СЕС були більшими за погодинні обсяги електроспоживання підприємства. Сумарний обсяг профіциту генерації СЕС за цей період часу склав 111,8 кВт·год, і ємності УЗЕ виявилось недостатньо задля компенсації такого обсягу профіциту. Тому за результатами оптимізації визначено потребу обмеження генерації СЕС з 10:00 до 14:00 сумарним обсягом 63,8 кВт·год. Тобто, оптимальний графік функціонування мікромережі передбачає у цій ситуації заповнення всієї робочої ємності УЗЕ 36 кВт·год (рис. 2, з), а також враховує технологічні витрати електроенергії в УЗЕ сумарним обсягом 3,1 кВт·год. Результати оцінки вигоди від функціонування СЕС і УЗЕ у складі мікромережі зведено у таблицю.

Доба	Зменшення вартості закупівлі електроенергії		
	СЕС (за добу)	УЗЕ (на 1 цикл)	СЕС та УЗЕ (за добу)
22.12.2023	518,20 € (7,72%)	185,13€	739,82 € (11,03%)
21.06.2023	2 506,83€ (46,17%)	165,23€	2 725,81€ (50,20%)

Розрахунки показників рентабельності та окупності мікромережі виходять за межі цієї публікації, тому для оцінювання отриманих результатів наведемо лише порівняння отримуваної вигоди з інвестиційною складовою витрат в СЕС та УЗЕ.

Так для СЕС із представленими у прикладі характеристиками та строком експлуатації 12 років окупність інвестиційної складової забезпечується вигодою від зменшення вартості закупівлі електроенергії не менше 451,51€ щодоби. Як видно із наведених у таблиці результатів, необхідне для окупності інвестиційної складової СЕС значення вигоди забезпечується навіть у сезон зимового мінімуму генерації електроенергії. Для УЗЕ із представленими у прикладі характеристиками окупність інвестиційної складової забезпечується вигодою не менше 166,67€ на один цикл заряд/розряд. Як видно із наведених у таблиці результатів оптимізації, отримувана внаслідок зменшення вартості закупівлі електроенергії вигода за 21.06.2023 не компенсує інвестиційну складову УЗЕ.

Для УЗЕ із представленими у прикладі характеристиками різниця у ринкових цінах для накопиченої та відпущеної електроенергії має складати не менше 3,24€. Тому представлена математична модель потребує додаткового обмеження: здійснювати цикл накопичення/відпуску електроенергії лише для тих годин доби, коли різниця у вартості відпущеної та накопиченої електроенергії забезпечує покриття витрат на функціонування УЗЕ. У протилежному випадку УЗЕ доцільно використовувати для розв'язання інших задач, наприклад, для утримування резерву електроенергії на живлення критично важливого навантаження у періоди роботи електричної мережі підприємства в ізольованому режимі. Обмеження щодо використання УЗЕ лише за умови отримання вигоди не менше мінімального заданого значення має вигляд

$$\sum_{h=1}^{24} V_{(r),h}^{ESS} \cdot (C_h^{EN} - \Delta C_{min1c}^{ESS}) - \sum_{h=1}^{24} V_{(r),h}^{ESS} \cdot C_h^{EN} \geq 0,$$

де ΔC_{min1c}^{ESS} – приведена до 1 кВт·год мінімально допустима різниця вартостей відпущеної та накопиченої електроенергії за один цикл «заряд/розряд», яка розраховується за формулою

$$\Delta C_{min1c}^{ESS} = \frac{B_{min,1c}^{ESS}}{W_{nom}^{ESS} \cdot DoD},$$

де $B_{min,1c}^{ESS}$ – мінімальна сума вигоди, яку слід отримати в результаті реалізації одного циклу «заряд/розряд» УЗЕ; W_{nom}^{ESS} – номінальна ємність УЗЕ; DoD – глибина розряду для циклу «заряд/розряд» УЗЕ.

Приклад залучення УЗЕ до розв'язання задачі зменшення витрат на закупівлю електроенергії з обмеженням на мінімально необхідну суму отримуваної вигоди наведений на рис. 3.

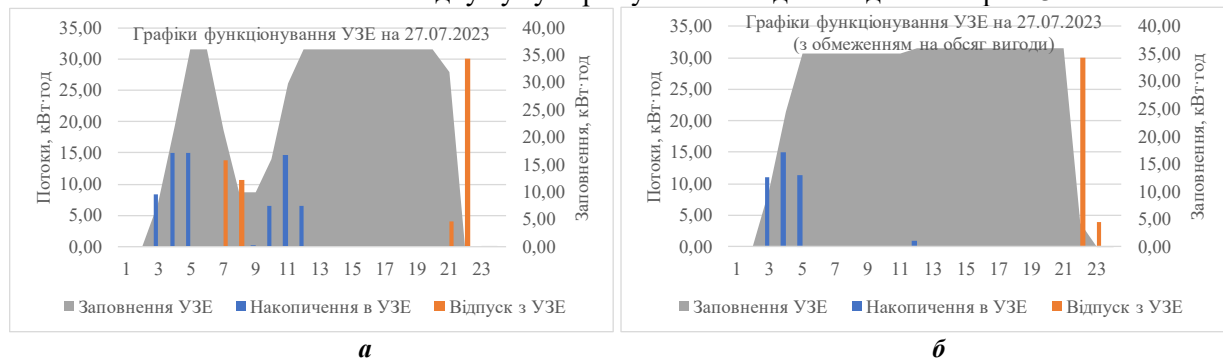


Рис. 3

В розрахунках використана ретроспективна інформація за 27 липня 2023 року, коли різниця погодинних ринкових цін була достатньою для обґрунтування використання УЗЕ в задачі зменшення вартості закупівлі електроенергії. Для розрахункової доби накопичення електроенергії в УЗЕ відбувається в умовах максимальної генерації електроенергії від СЕС та денного зменшення ринкової вартості електроенергії. Відпуск електроенергії від УЗЕ відбувається в години вечірнього піку електроспоживання та максимуму вартості електроенергії, коли обсяги генерації СЕС падають до нуля. За результатами розв'язання задачі мінімізації витрат на закупівлю електроенергії з обмеженням на обсяг вигоди не менше 166,67€ за один цикл заряд/розряд сумарний відпуск електричної енергії від УЗЕ за добу зменшився з 58,59 кВт·год (рис. 3, а) до 33,96 кВт·год (рис. 3, б), що забезпечило задане значення вигоди.

Висновки. Запропонована в даній роботі модель оптимізації функціонування мікромережі у складі навантаження підприємства, СЕС та УЗЕ дає змогу забезпечити формування графіків функціонування УЗЕ для налаштування СЕМ мікромережі за умов її приєднання до системи

розподілу задля зменшення витрат на закупівлю електроенергії на роздрібному ринку. В моделі враховуються: технологічні витрати електроенергії, пов'язані з різними режимами роботи УЗЕ в різні проміжки розрахункової доби, наявні обмеження СЕС, графік погодинних цін закупівлі електричної енергії на роздрібному ринку у постачальника електричної енергії та графік електроспоживання підприємства. За умов використання ретроспективних даних для моделювання режимів мікромережі із СЕС та УЗЕ, розроблена модель може використовуватися як основа для побудови моделей вибору оптимальних характеристик обладнання мікромережі в задачах проектування.

Роботу виконано в межах виконання наукової роботи «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів (Монітор-4)» (КПКВК 6541030).

- 1 Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.С. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47–48.
- 2 IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
- 3 Denysiuk S., Derevianko D. Optimisation features of energy processes in energy systems with Distributed Generation. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2020), Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020. Pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160212>.
- 4 Cagnano A., De Tuglie E., Mancarella P. Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. *Appl. Energy*. 2020. Vol. 258. 114039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114039>.
- 5 Imani M.H., Ghadi J., Ghavidel S., Li L. Demand response modeling in microgrid operation: A review and application for incentive-based and time-based programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 94. Pp. 486–499.
- 6 IEC TR 62898-1. Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. IEC. 2023. 86 p.
- 7 IEC TR 62898-4 Microgrids – Part 4: Use cases. IEC. 2023. 70 p.
- 8 Про затвердження кодексу систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. №310.
- 9 Akinyele D., Olabode E., Amole A. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems. *Inventions*. 2020. No 5. 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>.
- 10 Блінов І.В., Трач І.В., Парус Є.В., Дерев'янюк Д.Г., Хоменко В.М. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах шляхом використання відновлювальних джерел енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>.
- 11 Rebollal D., Carpintero-Rentería M., Santos-Martín D., Chinchilla M. Microgrid and distributed energy resources standards and guidelines review: Grid connection and operation technical requirements. *Energies*. 2021. Vol. 14(3). 523. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14030523>.
- 12 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>.
- 13 Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 13-17 September 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>.
- 14 Про затвердження правил роздрібного ринку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. №312.
- 15 Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 р. № 311.
- 16 Martins Joaquim R.R. A., Ning Andrew. Engineering Design Optimization. Cambridge University Press, 2021.
- 17 Loskutov S., Miroshnyk V., Blinov I. Comparison of widely-used models for multifactoral short-term photovoltaic generation forecast. IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2022), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 123–126. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969270>.

OPTIMIZATION MODEL OF MICROGRID FUNCTIONING WITH SOLAR POWER PLANT AND ENERGY STORAGE SYSTEM

I.V. Blinov¹, Ye.V. Parus¹, P.V. Shymaniuk¹, A.O. Vorushylo²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: blinovihor@gmail.com; paruseugene@gmail.com; shymanp@ied.org.ua.

² LLC «Proxima Research International»,

Mykola Bazhana Ave., 10A, Kyiv, 02000, Ukraine, e-mail: anton2320@gmail.com.

The article provides a description of the microgrid function optimization model for solving the problem of reducing the cost of electricity purchases by the owner of such a microgrid on the retail electricity market. The objective function of minimizing the cost of electricity purchase has been formalized. Approaches to determining the coefficients of penalty functions designed to cut off technically unacceptable modes of the microgrid have been determined. A mathematical model of an energy storage system (ESS) is proposed, in which the functions of calculating the technological costs of electricity are formalized. A system of constraints for the problem of minimization of the cost of electricity purchase is given. Approaches to solving the problem of evaluating the effect of SPP and ESS operation in microgrids using optimization results are determined. Examples of microgrid operation optimization for an enterprise with its own SPP and ESS are presented. The need for additional control of the economic expediency of involving ESS in the regulation of electricity balances at the enterprise was noted. References 17, figures 3, table 1.

Keywords: Microgrid, solar power plant, energy storage system, optimization.

1. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevych S.Ye. Smart grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 47–48. (Ukr)
2. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
3. Denysiuk S., Derevianko D. Optimisation features of energy processes in energy systems with Distributed Generation. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2020), Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020. Pp. 211–214. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160212>.
4. Cagnano A., De Tuglie E., Mancarella P. Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. *Appl. Energy*. 2020. Vol. 258. 114039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114039>.
5. Imani M.H., Ghadi J., Ghavidel S., Li L. Demand response modeling in microgrid operation: A review and application for incentive-based and time-based programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 94. Pp. 486–499.
6. IEC TR 62898-1. Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. IEC. 2023. 86 p.
7. IEC TR 62898-4 Microgrids – Part 4: Use cases. IEC. 2023. 70 p.
8. On Approval of Distribution Network Code: NEURC Resolution 14.03.2018 No 310. (Ukr)
9. Akinyele D., Olabode E., Amole A. Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems. *Inventions*. 2020. No 5. 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions5030042>.
10. Blinov I.V., Trach I.V., Parus Ye.V., Derevianko D.G., Khomenko V.M. Voltage regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 1. Pp.60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>. (Ukr)
11. Rebolal D., Carpintero-Rentería M., Santos-Martín D., Chinchilla M. Microgrid and distributed energy resources standards and guidelines review: Grid connection and operation technical requirements. *Energies*. 2021. Vol. 14(3). 523. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14030523>.
12. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>. (Ukr)
13. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 13-17 September 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>.
14. On Approval of Retail Market Rules: NEURC Resolution 14. 03.2018 No 312. (Ukr)
15. On Approval of the Commercial Electricity Metering Code: NEURC Resolution 14.03.2018 No 311. (Ukr)
16. Martins Joaquim R.R. A., Ning Andrew. Engineering Design Optimization. Cambridge University Press, 2021.
17. Loskutov S., Miroshnyk V., Blinov I. Comparison of widely-used models for multifactorial short-term photovoltaic generation forecast. IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS 2022), Kyiv, Ukraine, 12-14 October 2022. Pp. 123–126. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969270>.

Надійшла 03.05.2024

Остаточний варіант 16.05.2024

АНАЛІЗ НАЛАШТУВАННЯ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ВИМОГ

А.О. Стелюк¹, канд. техн. наук; Л.М. Лук'яненко², канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: astelyuk@gmail.com.

Розглянуто організацію автоматичного частотного розвантаження (АЧР) в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України. Розроблено еквівалентну модель енергосистеми для дослідження роботи АЧР, а також сформувано основні сценарії налаштування пристроїв АЧР з урахуванням вимог, що діють в ENTSO-E. Досліджено режими за частотою для різних сценаріїв налаштування АЧР за умов виникнення розрахункового та аварійного небалансів активної потужності. Наведено графіки, що відображають зміну частоти в енергосистемі за зазначених умов. Бібл. 4, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: частота, стійкість, автоматичне частотне розвантаження, об'єднана енергосистема, небаланс активної потужності.

Одним із основних засобів забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань за частотою під час виникнення системних аварій, ймовірність виникнення яких, на жаль, значно збільшилася в умовах знищення енергетичної структури України, є пристрої автоматичного частотного розвантаження (АЧР), які діють на вимкнення частини навантаження споживачів [1]. Враховуючи синхронну роботу об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України з енергооб'єднанням ENTSO-E, однією з важливих задач є забезпечення узгодженої роботи систем протиаварійного керування, зокрема АЧР, відповідно до вимог, що діють в ENTSO-E [2]. При цьому також слід враховувати відмінність архітектури побудови АЧР в Україні та європейських країнах. Так, однією із задач української АЧР, адаптивність роботи якої забезпечується за рахунок відповідного вибору уставок спрацювання за частотою (в межах (49,2-47,2) Гц) та часом, є попередження зниження частоти в область спрацювання «частотних захистів», що діють на зменшення потужності генерації, а у випадках тривалого зниження частоти – на відключення від мережі енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). За таких умов виникнення додаткового небалансу активної потужності може призвести до системної аварії з можливим її переходом до особливої системної аварії, яка супроводжується порушенням нормального режиму ОЕС України зі втратою власних потреб атомних та теплових електростанцій. В той же час в енергосистемах ENTSO-E використовується швидкодіюча АЧР, уставки спрацювання за частотою якої налаштовуються в межах (49,0-48,0) Гц, при цьому обсяг потужності споживання, що обмежується дією АЧР, визначається відповідним системним оператором [2, 3]. Зазначимо, що під час дослідження режимів за частотою ОЕС України одним з найбільш визначальних збурень є її перехід на ізольований режим, що характеризується значно більшим відхиленням частоти за умов вимкнення потужних блоків, порівняно з синхронною роботою ОЕС України з ENTSO-E. Таким чином, набуває актуальності задача оцінки впливу різних сценаріїв налаштування АЧР з урахуванням європейських вимог на стійкість за частотою в ОЕС України.

Відмітимо, що дослідження стійкості за частотою з урахуванням АЧР проводяться як з використанням спрощеної комп'ютерної моделі ОЕС України, так і моделі, в якій представлено магістральні та розподільчі мережі енергосистем [4, 5]. Перевагою використання детальної моделі є можливість визначення впливу АЧР на режими роботи мереж як в масштабах окремих енергосистем, так і в ОЕС України в цілому. Проте проведення таких досліджень вимагає попереднього створення спеціалізованих засобів автоматизації налаштування користувальницьких моделей АЧР для обробки більше ніж 2000 фактичних уставок спрацювання цих пристроїв [4], що в деякому сенсі призводить до «пе-

© Стелюк А.О., Лук'яненко Л.М., 2024

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0001-7548-4757>; ² <https://orcid.org/0000-0003-1749-5209>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

ребтяження» розрахункової моделі. В той же час, дослідження лише режимів за частотою, без необхідності представлення детальних моделей електричних мереж, можуть бути проведені на базі еквівалентної моделі енергосистеми, однією з переваг якої, порівняно з «детальною» моделлю, є суттєве зменшення обсягу вхідних даних налаштування АЧР без суттєвого спотворення результатів моделювання процесів зміни частоти та активної потужності. Останній підхід дає змогу проаналізувати більшу кількість сценаріїв і зробити більш «ширші» висновки. До недоліків еквівалентної моделі можна віднести «агреговані» результати досліджень без можливості їх деталізації в масштабах окремого генератора або навантаження, а також без представлення режимів роботи електричних мереж з урахуванням їхньої топології.

Метою роботи є визначення характеру зміни частоти в ОЕС України за різних сценаріїв налаштування АЧР відповідно до європейських вимог та формування рекомендацій щодо найбільш ефективного використання української АЧР. Розглянемо більш детально структуру АЧР, що використовується в ОЕС України. Залежно від уставок за частотою та часом спрацювання розрізняються п'ять категорій АЧР [1]:

1) *спеціальна АЧР*, що призначена для попередження зниження частоти в область спрацювання АЧР-2 несуміщеної. Уставка спрацювання за частотою дорівнює 49,2 Гц, а час спрацювання знаходиться в межах (0,1-0,3) с;

2) *захисна АЧР*, що призначена для попередження спрацювання «частотних захистів» АЕС, що діють на зменшення генерації блоків цих станцій за умов небезпечного зниження частоти в енергосистемі (нижче ніж 49 Гц). Уставка спрацювання за частотою захисної АЧР становить 49,1 Гц, а час спрацювання знаходиться в межах (0,1-0,3) с;

3) *АЧР-1 (основна черга)* – використовується для попередження глибокого зменшення частоти. Для обмеження зниження частоти ця категорія швидкодіючих пристроїв має різні уставки за частотою для забезпечення адаптивної дії залежно від небалансу активної потужності в ОЕС України (або в її окремих областях). Уставки спрацювання за частотою АЧР-1 знаходяться в межах (48,8-47,2) Гц, а час спрацювання – в межах (0,1-0,3) с;

4) *АЧР-2 несуміщена* – повільнодіюча АЧР, яка є не суміщеною з АЧР-1 і призначена для підвищення частоти після дії черг АЧР-1 у разі зависання частоти на неприпустимо низькому рівні. Уставка за частотою пристроїв АЧР-2(н) становить 49,1 Гц, при цьому витримка часу знаходиться в межах (5-20) с з інтервалом 3 с між чергами (шість черг);

5) *АЧР-2 суміщена* – призначена для ліквідації зниження частоти за відносно повільного аварійного збільшення дефіциту потужності (сповзання частоти), а також для підвищення частоти у разі недостатньої ефективності дії АЧР-2н. Уставки спрацювання за частотою АЧР-2(с) знаходяться в межах (48,7-49) Гц, а час спрацювання – в межах (21-60) с.

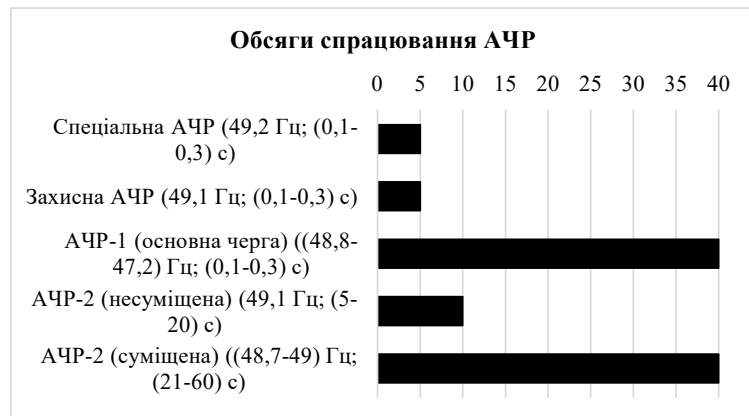


Рис. 1

що виник. У разі тривалого зниження частоти (нижче 49,1 Гц) спрацює АЧР-2 несуміщена, що діє на вимкнення 10% від сумарного споживання ОЕС України (за умови активізації повного обсягу спрацювання цієї АЧР). Якщо ефективність роботи АЧР-2 несуміщеної є недостатньою, то додатково спрацює АЧР-2 суміщена. Як видно з рис. 1, обсяг основної черги АЧР-1 є ідентичним обсягу АЧР-2 суміщеної (40% від сумарного споживання). Зазначимо, що основна черга АЧР-1 і АЧР-2 суміщена діють на вимкнення від мережі одного й того ж споживача, при цьому відстроювання цих АЧР між собою забезпечується за рахунок вибору відповідних уставок за частотою та часом спрацювання. Така «спільна» організація АЧР дещо ускладнює оцінку фактичного обсягу спрацювання АЧР-2 суміщеної. Це обумовлено тим, що спрацювання основної черги АЧР-1 відповідно призводить до зменшення об-

Як видно з діаграми обсягів спрацювання АЧР (рис. 1), на швидкодіючі черги АЧР (спеціальна, захисна та основна черги) припадає біля 50% від сумарного споживання ОЕС України. Спрацювання цих АЧР дає можливість попередити глибоке зменшення частоти, при цьому адаптивність її дії (основна черга) забезпечується за рахунок обмеження потужності споживання спрацюванням окремих черг за частотою залежно від небалансу активної потужності,

сягу АЧР-2 суміщеної, і за таких умов обсяг цієї АЧР буде визначатися «неспрацьованим» обсягом АЧР-1. Таким чином, якщо розглядати спеціальну, захисну, основну чергу АЧР-1, а також АЧР-2 не-суміщену, то їхній сумарний обсяг спрацювання в масштабах ОЕС України становить 60% від потужності споживання ОЕС.

Дослідження режимів за частотою виконано з використанням спеціальної еквівалентної моделі, що відповідає ізольованій роботі ОЕС України, блок-схему якої наведено на рис. 2. Так, сумарна потужність споживання ОЕС України дорівнює 23700 МВт*¹, а сумарна крутизна статичної частотної характеристики вітчизняної ОЕС – 1800 МВт/Гц. Для врахування впливу частоти і напруги на зміну потужності споживання з урахуванням дії АЧР в моделі враховано динамічну характеристику навантаження. Для дослідження реакції генераторів на зміну частоти в моделі також враховано первинне регулювання частоти, сумарний резерв якого в масштабах ОЕС України прийнято рівним 200 МВт.

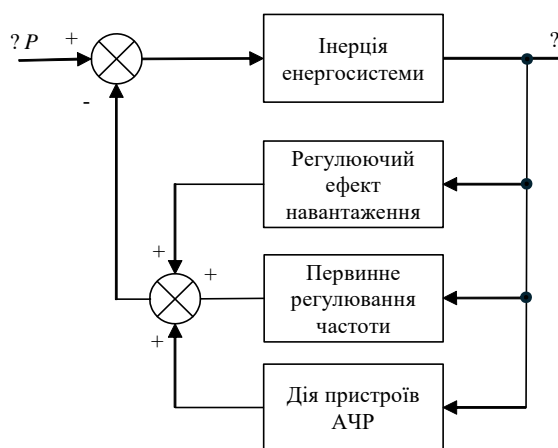


Рис. 2

Черги АЧР, Гц	Налаштування АЧР в ОЕС України		Налаштування АЧР відповідно до вимог ENTSO-E							
	Базовий сценарій		Сценарій 1		Сценарій 2		Сценарій 3		Сценарій 4	
	Обсяг спрац., МВт	Частка від $P_{сп}$, %	Обсяг спрац., МВт	Частка від $P_{сп}$, %	Обсяг спрац., МВт	Частка від $P_{сп}$, %	Обсяг спрац., МВт	Частка від $P_{сп}$, %	Обсяг спрац., МВт	Частка від $P_{сп}$, %
49,2	1051	10,0								
49,1	1332	12,7								
49			1089	4,6	1000	4,3	1501	6,4	500	2,1
48,9			1089	4,6	1000	4,3	91	0,4	500	2,1
48,8	479	2,0	1089	4,6	800	3,4	261	1,1	800	3,4
48,7	470	2,0	1089	4,6	800	3,4	823	3,5	800	3,4
48,6	425	1,8	1089	4,6	800	3,4	272	1,2	800	3,4
48,5	462	2,0	846	3,6	800	3,4	537	2,3	1123	4,8
48,4	453	1,9	846	3,6	800	3,4	966	4,1	1200	5,1
48,3	496	2,1	846	3,6	1000	4,3	46	0,2	1200	5,1
48,2	482	2,1	846	3,6	1123	4,8	173	0,7	1200	5,1
48,1	493	2,1	846	3,6	1200	5,1	126	0,5	1200	5,1
48	500	2,1	846	3,6	1200	5,1	625	2,7	1200	5,1
47,9	602	2,6								
47,8	490	2,1								
47,7	547	2,3								
47,6	453	1,9								
47,5	470	2,0								
47,4	416	1,8								
47,3	442	1,9								
47,2	460	2,0								
Всього	10523	44,8	10523	44,8	10523	44,8	11289	48	10523	44,8

За умов виникнення небалансів активної потужності, що супроводжуються значним зменшенням частоти, найбільш визначальною є дія швидкодіючих пристроїв АЧР. Для оцінки ефективності

¹ Враховуючи військовий стан та режим секретності, в роботі використані довоєнні дані. Але розроблена модель та підходи добре масштабуються і можуть застосовуватися до «післявоєнної» моделі ОЕС України.

налаштування АЧР в роботі розглянуто відповідні сценарії, які охоплюють базовий сценарій, що відповідає існуючому налаштуванню АЧР в ОЕС України, а також налаштування АЧР відповідно до вимог ENTSO-E (таблиця). Так, в ОЕС України використовуються 19 черг АЧР з уставками спрацювання за частотою, що знаходяться в межах (49,2-47,2) Гц, а уставки АЧР в ENTSO-E – в діапазоні (49,0-48,0) Гц (в таблиці уставки за частотою, що не використовуються, позначено сірим кольором). Сумарний обсяг спрацювання АЧР для кожного сценарію, окрім третього, становить 10523 МВт, що складає майже 45% від сумарної потужності споживання ОЕС України. При цьому необхідно окремо виділити сценарій №3, що відповідає фактичному налаштуванню АЧР в енергосистемах ENTSO-E і характеризується дещо збільшеним обсягом спрацювання [3].

Дослідження стійкості за частотою з використанням розробленої моделі виконано за умов виникнення розрахункового та аварійного небалансів активної потужності. Під «розрахунковим небалансом» розуміється небаланс потужності, що викликаний відключенням від мережі найбільш потужного енергоблоку (в ОЕС України – це енергоблок АЕС потужністю 1000 МВт) і який повинен бути скомпенсований відповідними резервами регулювання частоти. В той же час аварійний небаланс визначається, зокрема, одночасним аварійним відключенням двох потужних енергоблоків (в ОЕС України – це небаланс потужності 2000 МВт) і виникнення якого може призвести до спрацювання АЧР. В подальшому оцінювання ефективності сценаріїв налаштування АЧР проведено на основі аналізу відхилення частоти на етапі первинного регулювання (після спрацювання АЧР), яке повинно знаходитися в межах ± 200 мГц [2]. Зміни частоти для зазначених небалансів активної потужності наведено на рис. 3 та 4.

Як видно з рис. 3, що відповідає небалансу потужності 1000 МВт, для усіх сценаріїв спостерігається зниження частоти в область спрацювання АЧР, що обумовлено недостатністю резервів первинного регулювання (200 МВт) порівняно з небалансом потужності, що виник. Зазначимо, що такий характер зміни частоти узгоджується з результатами досліджень режимів за частотою, що отримані з використанням детальної моделі ОЕС України. Після спрацювання АЧР частота знаходиться у допустимому діапазоні (49,8-50,2) Гц для базового сценарію, а також для першого та другого сценаріїв налаштування АЧР відповідно до європейських вимог (таблиця). Так, в рамках базового сценарію спостерігається спрацювання спеціальної АЧР (уставка за частотою 49,2 Гц), обсяг якої є достатнім для компенсації небалансу потужності, при цьому АЧР, уставки яких налаштовано відповідно до сценаріїв № 1-4, спрацьовують у разі досягнення частотою значення 49 Гц. Незадовільна ефективність роботи АЧР відповідно до сценарію №3 обумовлена значним обсягом потужності споживання (1500 МВт), що обмежується дією АЧР, в той час, як обсяг АЧР для сценарію №4 (500 МВт) за досягнення частотою уставки 49 Гц є недостатнім для відновлення частоти в межах (49,8-50,2) Гц.

За умов виникнення аварійного небалансу потужності 2000 МВт (рис. 4) задовільна зміна частоти спостерігається для базового сценарію, а також для налаштування АЧР відповідно до сценаріїв № 1, 2 та 4. Так, в рамках

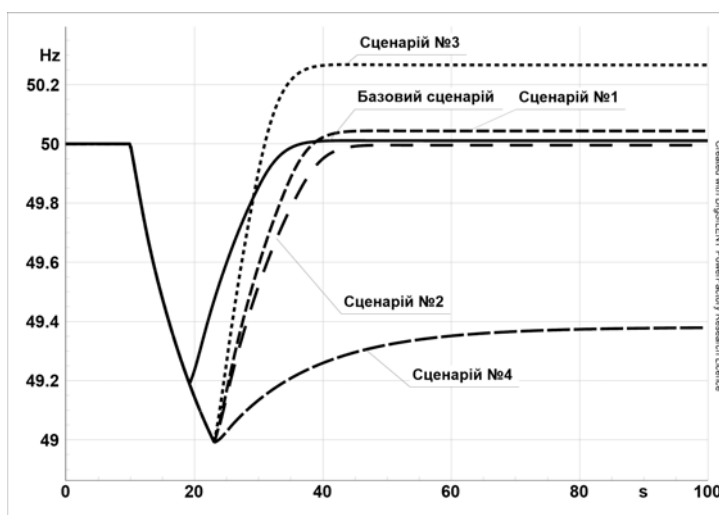


Рис. 3

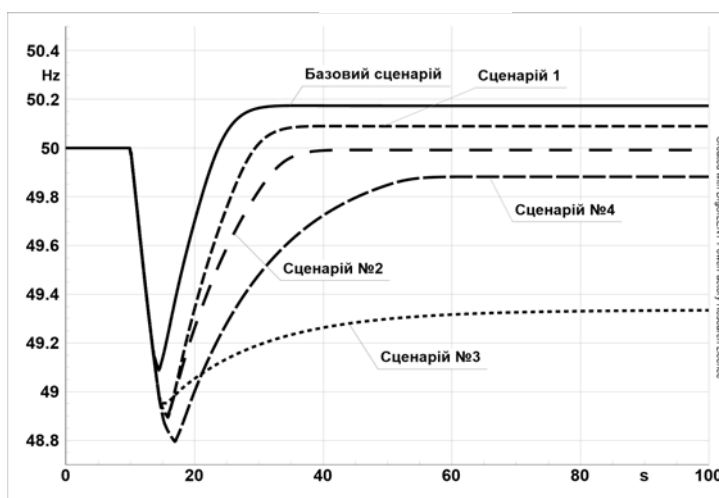


Рис. 4

базового сценарію спостерігається спрацювання спеціальної (49,2 Гц) та захисної (49,1 Гц) АЧР, що є достатнім для компенсації зазначеного небалансу активної потужності. Проте, як видно з рис. 4, налаштування АЧР відповідно до сценарію №3 також є неефективним. Це обумовлено тим, що за умов спрацювання першої черги частота не знижується до наступної черги спрацювання (48,9 Гц), що спонукає до зависання частоти на рівні 49,3 Гц, яке є значно меншим допустимого значення 49,8 Гц. Як свідчать отримані результати моделювання режимів за частотою, найбільш ефективним є рівномірний розподіл обсягу навантаження, що відключається дією АЧР, причому на верхніх чергах спрацювання АЧР такий обсяг повинен бути достатнім для компенсації розрахункового та аварійного небалансів активної потужності (сценарії №1 та 2).

Оскільки під час спрацювання АЧР стійкість за частотою забезпечується шляхом відключення частини навантаження споживачів дією цієї автоматики, розглянемо характер зміни сумарної потужності споживання в ОЕС України на прикладі базового сценарію у разі виникнення небалансу активної потужності 1000 МВт (рис. 5). Так, перший етап визначається зміною потужності споживання (23700-23281=419 МВт) залежно від частоти та напруги. На другому етапі спостерігається спрацювання пристроїв АЧР, при цьому потужність споживання змінюється на 23281-22273=1005 МВт. Відповідно зміна потужності споживання на наступному, третьому етапі визначається зміною частоти, напруги, а також дією АЧР. По завершенню перехідного процесу зміна сумарної потужності споживання становить 23700-22689=1011 МВт, що фактично відповідає небалансу потужності, який виник.

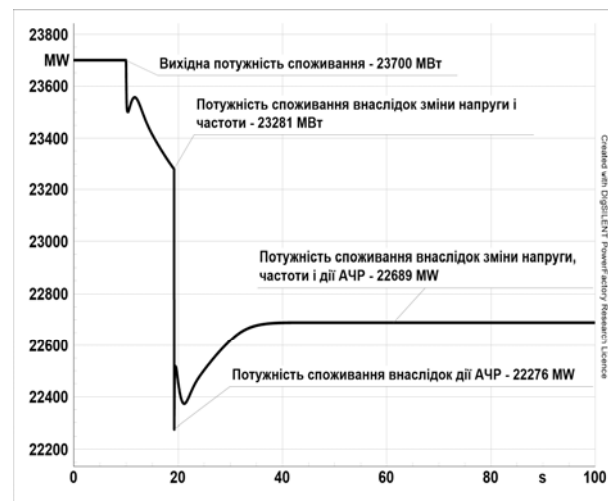


Рис.5

Таким чином, на підставі проведених досліджень, можна стверджувати, що задля забезпечення ефективності роботи АЧР, налаштованої відповідно до європейських вимог, рекомендується забезпечити рівномірний розподіл навантаження (сценарії № 1 і 2), що вимикається дією цієї автоматики, при цьому на верхніх чергах спрацювання такий обсяг повинен бути достатнім для компенсації збурень за активною потужністю, що виникають в ОЕС України.

Роботу виконано за державною бюджетною темою «Науково-технічні засади відновлення та керування електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи (ENTSO-E)» (код КПКВК 6541030).

1. Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах, затвержені Наказом Міністерства палива та енергетики України від 01.12.2003 р. № 714 (у редакції наказу Міністерства палива та енергетики України від 31.07.2012 р.).
2. P5 – Policy 5: Emergency Operations, 20 p. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_5_final.pdf (дата доступу 25.03.2024).
3. Technical background for the Low Frequency Demand Disconnection requirements, 20 p. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20ER/141215_Technical_background_for_LFDD.pdf (дата доступу 25.03.2024).
4. Pavlovsky V., Steliuk A., Lenga O., Zaychenko V., Vyshnevskiy M. Frequency stability simulation considering under-frequency load shedding relays, special protection automatics and AGC software models. Proceedings of IEEE Manchester PowerTech Conference, Manchester, UK, 18-22 June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981043>.

CONFIGURATION ANALYSIS OF UNDER-FREQUENCY LOAD SHEDDING RELAYS CONSIDERING EUROPEAN REQUIREMENTS

A.O. Steliuk, L.M. Lukianenko
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: astelvuk@gmail.com.

The paper deals with the structure of under-frequency load shedding (UFLS) relays in the interconnected power system (IPS) of Ukraine. The equivalent power system model to study the UFLS operation is developed, and UFLS configuration scenarios considering the requirements of ENTSO-E, are configured. The frequency stability for different scenarios of UFLS settings considering planned and emergency active power imbalances are studied. The plots illustrating the frequency change in the power system under these conditions are presented. References 4, table 1, figures 5.

Keywords: frequency, stability, under-frequency load shedding, interconnected power system, active power imbalance.

1. The application rules of the system emergency automation to prevent and eliminate dangerous decrease or increase of frequency in power systems, approved by the Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine No 714 dated December 1, 2003 (as amended by of the Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated July 31st, 2012). (Ukr)
2. P5 – Policy 5: Emergency Operations, 20 p. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_5_final.pdf (accessed at 25.03.2024).
3. Technical background for the Low Frequency Demand Disconnection requirements, 20 p. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20ER/141215_Technical_background_for_LFDD.pdf (accessed at 25.03.2024).
4. Pavlovsky V., Steliuk A., Lenga O., Zaychenko V., Vyshnevskiy M. Frequency stability simulation considering under-frequency load shedding relays, special protection automatics and AGC software models. Proceedings of *IEEE Manchester PowerTech* Conference, Manchester, UK, 18-22 June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981043>.

Надійшла 01.04.2024
Остаточний варіант 27.05.2024

УРАХУВАННЯ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ ПОТЕНЦІАЛУ ПІДЗЕМНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ПІД ЧАС РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЇХНЬОГО ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ

О.О. Азюковський*, канд. техн. наук, **Ю.А. Папаїка****, докт. техн. наук, **М.В. Бабенко*****
НТУ «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, 49005, Україна, e-mail: azalex@nmu.one

Виконано огляд попередніх досліджень катодного захисту підземних сталевих трубопроводів від їхньої руйнації внаслідок виникаючих корозійних процесів. Приведено результати досліджень І.М. Францевича та його учнів і послідовників щодо впливу рівня катодної поляризації на інтенсивність реального руйнування сталевих трубопроводів. Додатково враховано вплив змінної складової потенціалу таких трубопроводів на інтенсивність корозії і надано оцінку критичних параметрів системи захисту підземних металевих трубопроводів за допомогою активних перетворювачів енергії. Досліджено можливі режими діючих комплексів захисту. Наведено аналітичні залежності визначення рівнів захисного потенціалу з урахуванням змінної складової в умовах неоднорідного середовища та різних варіацій топології прокладання системи трубопроводів. Отримані результати багатofакторного моделювання та моніторингу параметрів і характеристик системи катодного захисту дали змогу сформулювати енергетично і функціонально доцільні режими та забезпечити необхідну високую ефективність електротехнічного комплексу захисту підземних металевих трубопроводів. Бібл. 22, рис. 11.

Ключові слова: металеві підземні трубопроводи, електрохімічна корозія, катодний захист, моніторинг режимів захисту, аналітичні розрахунки рівня захисного потенціалу, змінна складова потенціалу.

Актуальність проблеми. Підземні металеві (у більшості випадків сталеві) трубопроводи та відповідні струмопровідні конструкції, які використовують для транспортування газу, нафти і води, з часом зазнають електрокорозійних руйнувань, пов'язаних з появою і розвитком так званих електрокорозійних процесів, які в Україні почали особливо інтенсивно досліджувати після будівництва і початку експлуатації в 1949 році газового трубопровода Дашава – Київ [1, 2]. Суттєвий позитивний внесок у вирішення складної науково-технічної проблеми захисту цього трубопроводу від електрокорозійних процесів його руйнації було внесено відомим фізхіміком і матеріалознавцем, академіком України І.М. Францевичем та його учнями і науковими послідовниками [1-4].

На даний час розрізняють ґрунтову електрокорозію струмопровідних поверхонь трубопроводів, зумовлену неоднорідністю металевих поверхонь і питомого опору ґрунту, що залежить від концентрації в ньому води, солей, кислот, лугів і навіть бактерій, які активізують розвиток процесів корозії; та корозію металевих поверхонь трубопроводів блукаючими струмами, які наводяться змінними струмами з металевих рельс електрифікованого транспорту через їхню недосконалу електроізоляцію від ґрунту та завдяки наявності порушень електричних контактів на рельсових стиках [5].

Критерієм небезпеки електрокорозії поверхні підземних металевих трубопроводів від блукаючих струмів є наявність позитивної або знакозмінної різниці потенціалів між трубопроводом і землею (тобто поява анодних і знакозмінних зон). Джерелами таких струмів у містах є рейкові шляхи електрифікованого транспорту (трамваїв, метро, електропоїздів) та промислові підприємства з потужним електрообладнанням, в якому виникають комутаційні, перехідні та інші нестационарні процеси. Особливо інтенсивні блукаючі струми можуть викликати електроімпульсні розрядні установки, що формують короткочасні уніполярні [6] та біполярні [7] розрядні імпульси великого струму (в тисячі ампер) [6, 7], величина якого може стохастично змінюватися [8]. Тому у разі прокладання підземного трубопроводу поблизу вказаних

© Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Бабенко М.В., 2024

ORCID: *<https://orcid.org/0000-0003-1901-4333>; **<https://orcid.org/0000-0001-6953-1705> ;
***<https://orcid.org/0000-0003-2309-0291>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

типів джерел потужних електромагнітних впливів, які можуть суттєво посилювати корозійні процеси і руйнацію підземних металевих конструкцій, необхідно проводити оцінку їхнього технічного стану з урахуванням впливу блукаючих струмів на інтенсивність електрохімічної корозії [9, 10].

Зараз небезпека підвищення інтенсивності електрокорозії поверхні підземних металевих трубопроводів від блукаючих струмів зростає як в Україні, так і в інших країнах світу [11, 12]. Вона проявляється у виникненні позитивної або знакозмінної різниці потенціалів між трубопроводом і землею (тобто появою анодних і знакозмінних зон). Для захисту трубопроводів від такої руйнації найбільш доцільним є використання комбінованого методу створення ізоляційного покриття на їхній поверхні та здійснення катодної поляризації [13, 14]. Основним критерієм системи катодного захисту (СКЗ) вважається наявність поляризаційного потенціалу, який для сталі повинен знаходитись у межах від $(-0,85)$ В до $(-1,15)$ В відносно створеного анодного електроду [15]. Задля підтримання потенціалу металокопункцій в слабо електропровідному середовищі використовують спеціалізоване електротехнічне обладнання. Це дає можливість контролювати та підтримувати електричний потенціал металевих поверхонь в необхідному діапазоні значень задля забезпечення захисту металу від корозії.

Наукові роботи з дослідження систем катодного захисту у більшості випадків розглядали електрохімічні та електрофізичні процеси у замкненій системі «трубопровід-СКЗ-анод» [15]. Окремі наукові школи займалися дослідженнями в області органічної хімії для розробки ефективних ізоляційних матеріалів ізоляції трубопроводів [15]. Достовірних моделей визначення залежностей захисного потенціалу сталевих трубопроводів, які враховують різноманітність режимів і схемних реалізацій катодних станцій, топології прокладки і геології ґрунтів, на жаль, поки що не існує. Особливо складні процеси корозії протікають в результаті дії змінної складової захисного потенціалу. Це виявили результати практичного моніторингу. Тому актуальною є задача врахування змінної складової сигналів на виході станцій катодного захисту, яка створює суперечливі залежності потенціалу у координаті відстані та ускладнює корозійну ситуацію.

Тому **метою даної роботи** було обґрунтування необхідності врахування змінної полігармонічної складової захисного потенціалу задля створення ефективних електротехнічних комплексів електрохімічного захисту.

Аналіз проблематики дослідження. Сучасні СКЗ створено за високочастотним принципом перетворення сигналу. На рис. 1 наведено інверторний високочастотний перетворювач. Головною їхньою перевагою є масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дають змогу інтегрувати елементи комплексу до систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії. Високовольтний випрямляч (ВВ) здійснює перетворення напруги силовим частотним перетворювачем (СЧП) до змінної. Високочастотний трансформатор (ТВ) перетворює рівень напруги до потрібного значення. Низьковольтний випрямляч (ВН) приєднується до підземного сталевих трубопроводу та анодного заземлювача, створюючи захисний потенціал (полігармонічний) [16]. Змінна складова захисного потенціалу проявляється при комплексному захисті дистанції трубопроводу групою СКЗ з вентильними перетворювачами та наявності неоднорідностей на трасі прокладки. У деяких режимних точках вплив змінної складової виражається у неприпустимому рівні підвищення рівня захисного потенціалу, що призводить до стрімкої деградації металокопункцій.

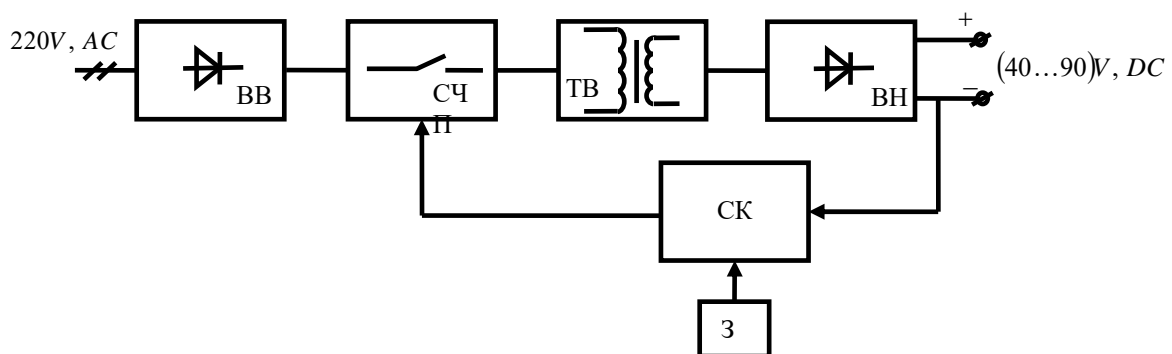


Рис. 1

Система керування (СК) відпрацьовує сигнал блока завдання (3) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СЧП [17, 18].

Потенціал захисту вздовж трубопроводу характеризується експоненціальною залежністю [12]. Вона змінюється в межах мінімального значення у точці підключення станції катодного захисту сталевому підземному трубопроводу та максимального (природного) значення. Прийнято вважати: у зонах, де потенціал підземного сталевих трубопроводу дорівнює природному значенню, закінчується межа впливу станції катодного захисту, й сповільнення корозійних процесів не відбувається [12]. За цих умов інша частина трубопроводу лишається без захисту від електрохімічної корозії.

Відповідно до визнаних підходів у випадку, коли станції катодного захисту містять трансформаторну схему з діодним випрямлячем, на виході якого існують пульсації 100 Гц, вважають: у кожній точці за координатою "X" значення потенціалу за часом є незмінним [19].

Значне поширення отримали станції, що мають високочастотні перетворювачі. Це обумовлює

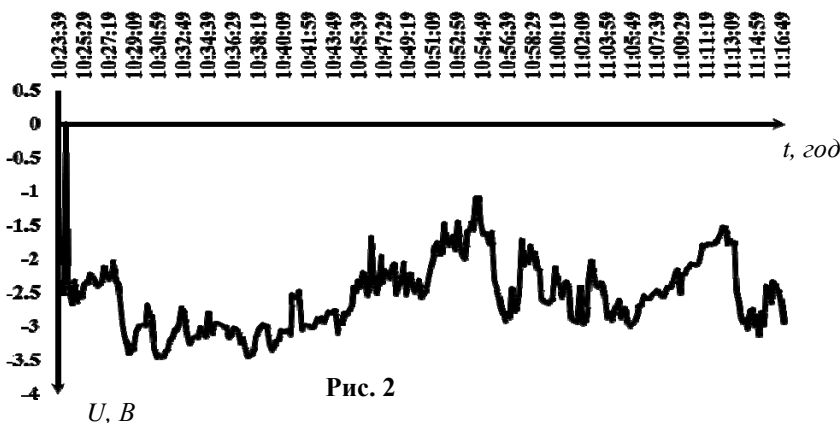


Рис. 2

дещо іншу залежність зміни потенціалу за часом на виході станції. На рис. 2 наведено потенціал підземного трубопроводу як результат сумісної роботи декількох станцій катодного захисту. У фіксованій за координатою "X" точці значення потенціалу має складну залежність, яка містить достатньо широкий спектр сигналу (рис. 3). Враховують, що струми під час протікання корозійних процесів досягають рівня мілі/мікро ампер, для виносу 1 г металу потрібен струм 0,1 мА протягом одного року. Тому амплітудне значення високочастотної складової сигналу СКЗ достатньо для значного погіршення корозійної ситуації. Виявляючи та оцінюючи вплив змінної (високочастотної) складової сигналу на виході станції, помітно покращується корозійна ситуація та подовжується термін експлуатації підземних сталевих трубопроводів. Без урахування змінної складової неможливо налаштувати сумісну роботу декількох СКЗ за наявності неоднорідностей у зоні прокладки.

Результати практичного моніторингу. Протягом кількох років науковці Дніпровської політехніки проводили експериментальні дослідження та реєстрували часові та координатні еволюції захисного потенціалу в різних умовах прокладки підземних газопроводів у Дніпропетровській області. Захисний потенціал підземного трубопроводу (рис. 2) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем (без впливу блукаючих струмів). Досягають значення потенціалу: мінімальне (-3,46) В, максимальне (+0,001) В, середнє (-2,54) В. За умов забезпечення раціонального режиму захисту приймається середнє значення потенціалу. Такий рівень потенціалу прийнятний задля здійснення ефективного захисту від корозії, що підтверджують результати моделювання та багатofакторного моніторингу.

За умов врахування мінімального значення потенціалу досягаються надлишкова перекомпенсація та нераціональна витрата електричної енергії і матеріалу анодного заземлювача. Нерівномірність розподілення потенціалу за часом досить значна, містить як перевищення рівня (-0,55) В, так і позитивні значення. На рис. 3 показано критичні межі зміни захисного потенціалу підземного трубопроводу.

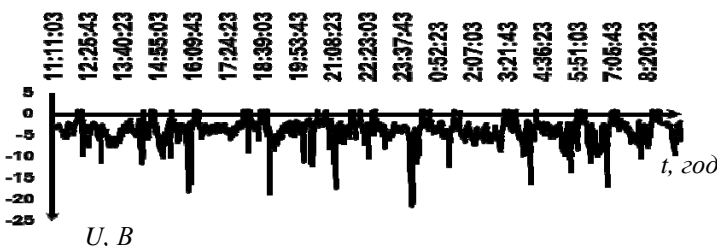


Рис. 3

Частота зміни потенціалу за часом знаходиться у діапазоні від низькочастотно-модульованого сигналу (10 Гц) до високочастотної складової (18 кГц) [14]. За результатами моніторингу отримано: амплітуда коливань потенціалу незначна (рис. 4), а частота зміни значень висока. Напряга на виході випрямляча пульсуюча. За активного навантаження форма зміни струму повторює форму напруги. Сучасні підземні трубопроводи з ізоля-

ційною оболонкою мають іншу схему заміщення, що містить реактивні елементи [19, 20]. Електромагнітні перехідні процеси обумовлюють відхилення сигналу, що сягає позитивного значення. На рис. 4, час 14:05:08 показано потенціал підземного трубопроводу, сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем.

У проміжки часу, коли захисний потенціал перевищує мінімально припустиме значення, підземний трубопровід лишається захищеною, а металева споруда є джерелом блукаючих струмів та активно руйнується. Тому, навіть за відсутності широкоамплітудних коливань потенціалу, фактичний корозійний стан відрізняється від очікуваного і запланованого.

Станція катодного захисту, що має керований тиристорний перетворювач, генерує періодичні сигнали (рис. 5 – сигнал на виході СКЗ з керованим тиристорним перетворювачем). Спектр такого сигналу містить частоти, що перевищують значення 4 кГц (рис. 6).

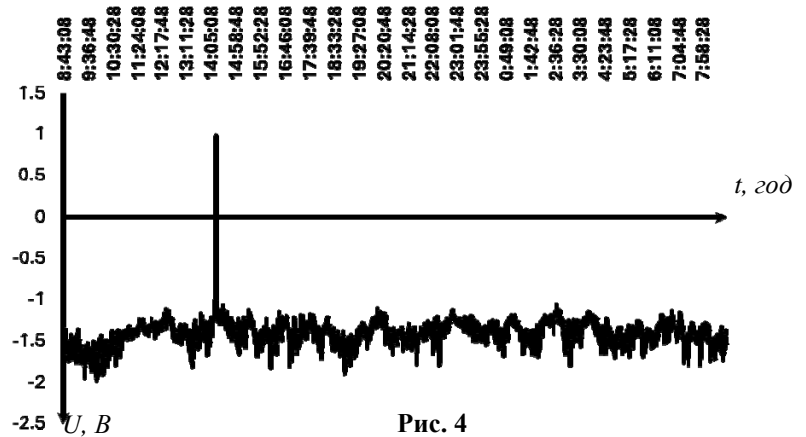


Рис. 4

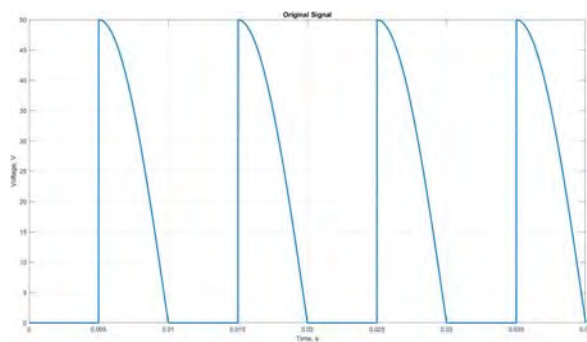


Рис. 5

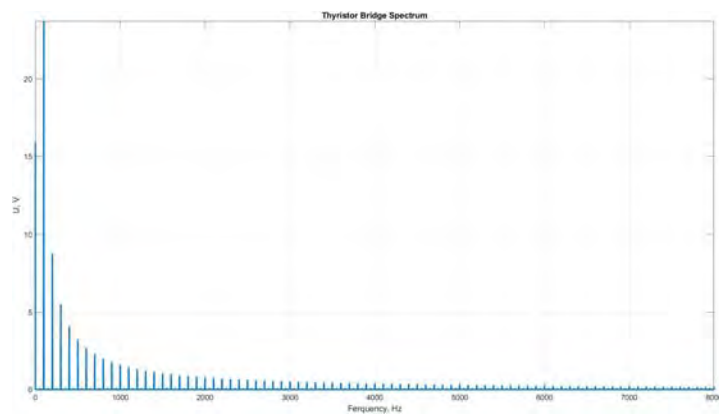


Рис. 6

Враховуючи стрімкий розвиток сучасної елементної бази, сьогодні активно використовуються СКЗ з більш складними алгоритмами перетворення енергії. Сигнал на виході таких станцій має інший вигляд (рис. 7) у порівнянні з тиристорними схемами. Спектр такого сигналу містить частоти, що перевищують 45 кГц (рис. 8). Доведено, що навіть незначні корозійні струми призводять до помітних втрат металу та викликають наскрізні корозійні пошкодження трубопроводів [21]. Наявність незначних, у порівнянні з основною амплітудою, змінних складових сигналу потребує їх врахування під час аналізу корозійної ситуації і розрахунку необхідної системи захисту.

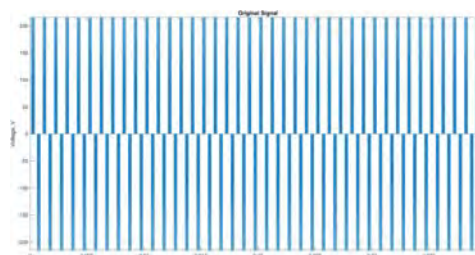


Рис. 7

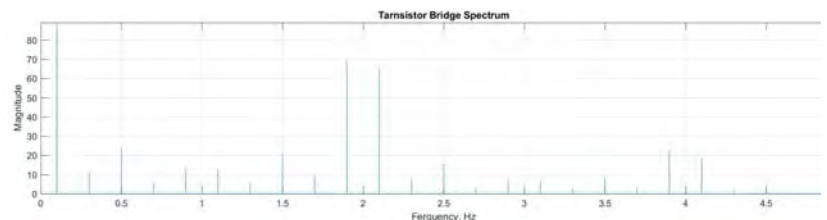


Рис. 8

Модельовання змінної складової захисного потенціалу. Розглянуто підземний трубопровід, що побудований на основі сталеві труби великої протяжності та розташований в слабкому

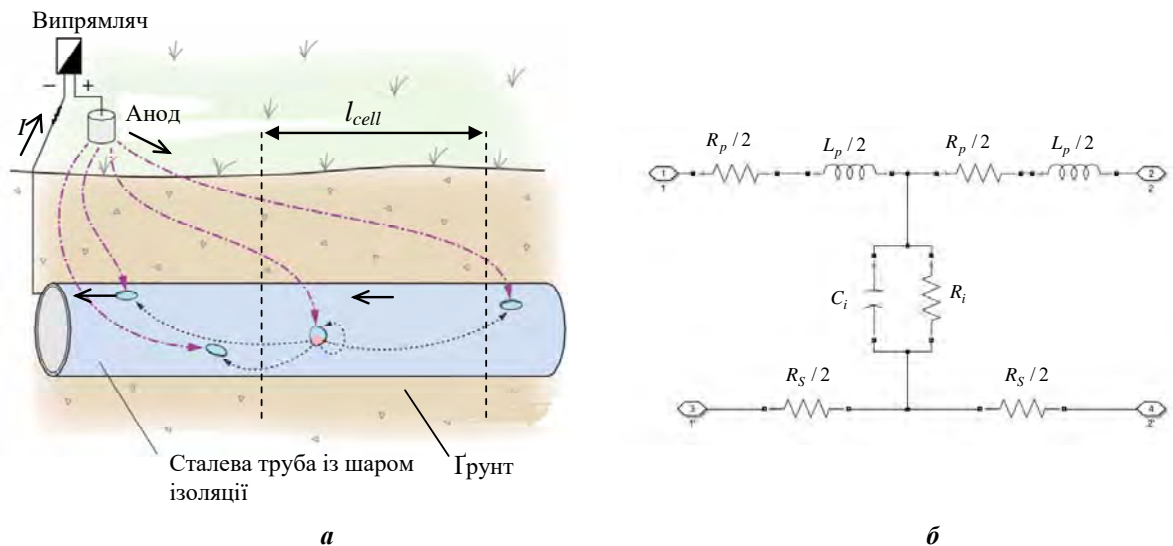


Рис. 9

електропровідному середовищі – ґрунті (рис. 9, а). Труба покрита шаром бітумної ізоляції для зменшення струмів в системі "труба – ґрунт" при застосуванні катодного захисту. На рис. 9, б – його розрахункова схема.

Внаслідок наявності дефектів в ізоляції електричний струм, що протікає між ґрунтом та трубою, має складну структуру з наявністю вищих гармонік. Катодний захист здійснюється за допомогою джерела постійного струму, від'ємний потенціал якого приєднується до поверхні труби, а позитивний – до спеціально створеного анода. Як результат, на трубі утворюється електричний потенціал, що змінюється від (-0,85) В до (-1,15) В та значно гальмує протікання корозійних процесів.

Задля отримання розрахункової схеми протяжного трубопроводу доцільно виділити елементарну комірку довжиною l_{cell} , для якої еквівалентне електричне коло має відповідну схему (рис. 9, б). Еквівалентна модель трубопроводу складається як послідовно з'єднані комірки. Тоді загальна довжина трубопроводу $l_p = N l_{cell}$, де N – загальне число комірок. Схема містить наступні елементи, що відповідають довжині елементарної комірки l_{cell} : R_p, L_p – активний опір та індуктивність труби, R_i, C_i – еквівалентний активний опір і ємність ізоляції труби, R_s – активний опір ґрунту.

Результати розрахунку розподілу електричного потенціалу вздовж трубопроводу (падіння напруги на ізоляції), з яким пов'язана координатна вісь x_p , демонструє рис. 10, а. Як видно, через розтікання електричного струму по трубі, електричний потенціал спадає у разі віддалені від точки

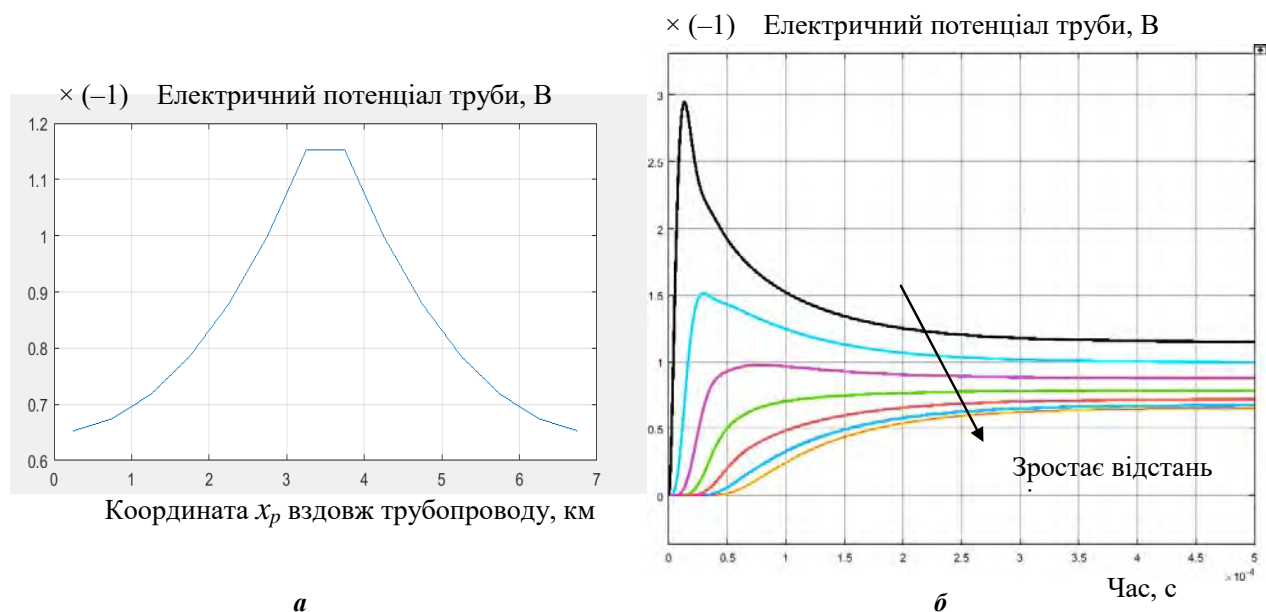


Рис. 10

підключення джерела живлення, на початку та в кінці трубопроводу має значення $(-0,65)$ В. Необхідне значення потенціалу $(-0,85)$ В.

Важливо оцінити електричний потенціал на різних ділянках труби при перехідному процесі та підключенні до труби джерела постійного струму (рис. 10, б). Максимальний стрибок потенціалу досягається у точці приєднання джерела до труби. Перехідний процес затухає майже за 0,4 мс. Це необхідно враховувати під час побудови системи керування пристроєм катодного захисту.

Визначено умови прокладки трубопроводу поблизу повітряної лінії електропередачі. У трубі будуть протікати одночасно два струми – постійний від пристрою катодного захисту та змінний із частотою 50 Гц (вплив повітряної лінії). Від співвідношення струмів, що змінюється на різних ділянках трубопроводу, залежать корозійні процеси в сталевій трубі. Наявність таких струмів доцільно враховувати на етапі проектування трубопроводу [22].

Аналітичні моделі визначення розподілу захисного потенціалу. Розглянуто порожню нескінченну підземну сталеву циліндричну трубу із зовнішнім радіусом $r=30$ мм і товщиною стінки $h_p=4$ мм, центр якої розташовано на глибині $H=1,5$ см. Труба знаходиться в однорідному ґрунті з електропровідністю $\sigma_s=2 \cdot 10^{-2}$ Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$. Досліджено монохроматичний випадок, коли параметри системи змінюються з частотою $f=25$ кГц. Ізоляція вважається достатньо якісною з питомим опором $R_i=10^6$ Ом·м. Константи загасання сталі та ґрунту розраховуються наступним чином [15]:

$$\gamma_{st} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_{st} \sigma_{st}}{2}}; \quad \gamma_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma_s}{2}}, \quad (1)$$

де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – константа; $\omega=2\pi f$ – кутова частота; $\mu_{st}=200$ – магнітна провідність сталі; σ_{st} – провідність сталі; $\sigma_{st}=1/\rho_{st}$, $\rho_{st}=1.3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – питомий опір сталі.

Імпеданс труби Z , перехідний опір R_i і постійна поширення α

$$Z = \frac{\omega \mu_0}{8} + i \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1,3}{\gamma_s r} \right) + \frac{(1-i)\gamma_{st}}{2\pi r \sigma_{st}} \cot((1-i)\gamma_{st} h_p);$$

$$R_t = R_i + \frac{1}{\pi \sigma_s} \ln \left(\frac{1,12}{\gamma_s \sqrt{rH}} \right); \quad \alpha = \sqrt{\frac{Z}{R_t}}. \quad (2)$$

Враховуючи вимоги безперервності потенціалу очевидно, що експоненційне зростання неможливе за $z \rightarrow \pm\infty$. Тому комплексна амплітуда потенціалу

$$U(z, t) = \operatorname{Re}(V(z) e^{i\omega t}) = \begin{cases} U_1(z, t), & z < 0 \\ U_2(z, t), & z \in [0, L], \\ U_3(z, t), & z > L, \end{cases} \quad (3)$$

де маємо

$$U_1(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st1}} V_{a1} e^{\alpha_1 z} \cos[\omega t + \alpha_2 z + \varphi_1];$$

$$U_2(z, t) = V_{a1} \frac{R_t}{R_{s-st1}} \frac{h(L-z)}{h(L)} \cos[\omega t + g(L-z) - g(L) + \varphi_1] +$$

$$+ V_{a2} \frac{R_t}{R_{s-st2}} \frac{h(z)}{h(L)} \cos[\omega t + g(z) - g(L) + \varphi_2];$$

$$U_3(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st2}} V_{a2} e^{\alpha_1(L-z)} \cos[\omega t + \alpha_2(L-z) + \varphi_2],$$

де

$$h(z) = \sqrt{\cosh(2\alpha_1 z) - \cos(2\alpha_2 z)}, \quad g(z) = \operatorname{atan}[\cosh(\alpha_1 z) \sin(\alpha_2 z), \sinh(\alpha_1 z) \cos(\alpha_2 z)].$$

Функція $U(z, t)$ істотно відрізняється у випадках, коли станції мають рівні або протилежні фази: рис. 11, а – залежність потенціалу для $\varphi_1=\varphi_2=0$, б – $\varphi_1=0$, $\varphi_2=\pi$. Залежності отримані за умов $y_1=y_2=0,1$ м, $L=3$ км.

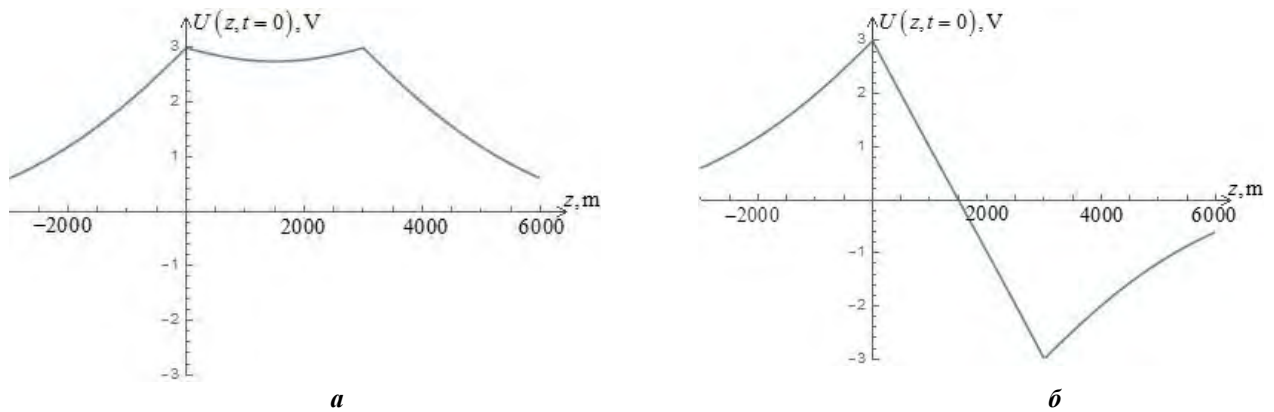


Рис. 11

Висновки.

1. Незважаючи на наявність багатьох досліджень у науковому напрямку розробки та створення електротехнічних комплексів та систем активного електрохімічного захисту підземних металевих трубопроводів, на даний час поки що відсутні адекватні методи і методики визначення та реалізації сукупності необхідних і достатніх параметрів та закономірностей їхнього керування (регулювання), здатних враховувати наявну сукупність детермінованих і стохастичних факторів прокладання та умов надійної і тривалої експлуатації таких трубопроводів.

2. Задля розробки і створення надійних і енергоефективних електротехнічних комплексів активного катодного захисту підземних металевих трубопроводів необхідно одночасно враховувати режимні особливості формування змінної складової захисного потенціалу, електрофізичні особливості таких трубопроводів та їхньої електроізоляції і складної топології приєднання станцій. Це дає змогу підвищувати точність прогнозування рівнів захисного потенціалу з точковими неоднорідностями середовища прокладання підземних металевих трубопроводів.

3. Результати практичного моніторингу рівнів захисного потенціалу на реальних об'єктах газотранспортної системи України зазвичай дозволяють виявляти амплітудні зони відхилення потенціалу від припустимих значень. Це обґрунтовує необхідність урахування полігармонічного спектру вихідного сигналу катодних станцій задля розробки методики вибору кількості, потужності та кроків приєднання захисних станцій до трубопроводу.

4. Запропонований підхід до розрахунку електричних процесів у підземному трубопроводі з використанням комп'ютерного моделювання за умов впливу повітряної лінії електропередачі забезпечує виявлення режимних зон з неприйнятними рівнями потенціалу, які призводять до передчасного витoku металу з трубопроводу.

5. Досягнення мети створення безпечних умов функціонування підземних сталевих трубопроводів можливо шляхом розробки нових принципів моделювання рівнів змінної складової полігармонічного сигналу на виході СКЗ. Адекватність отриманих математичних моделей доведено результатами комплексного моніторингу режимних параметрів електротехнічних комплексів захисту у польових умовах.

1. Францевич И.Н., Хрущева Е.В., Францевич-Заблудовская Т.Ф. Катодная защита магистральных газопроводов. Киев: Изд-во АН УССР. 1959. 80 с.

2. Францевич И.М., Горбачев Ю.А., Гримайловський В.О. Про деякі результати 20-річного комплексного захисту магістрального газопроводу Дашава – Київ від корозії. Вісник АН УРСР. 1975. № 10. С. 67–73.

3. Францевич И.Н., Остапенко В.Н., Лукович В.В. К расчету параметров электрозащиты трубопроводов от коррозии. Препринт №4. Институт проблем материаловедения АН УССР. Киев. 1985. 14 с.

4. Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович В.В., Кохановский И.Н., Егоров Е.В., Кузьменко Ю.А., Калькутин Ю.Г. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. Киев: Наукова думка, 1988. 192 с.

5. Ратушняк Г.С., Ободянська О.І. Оцінка технічного стану сталевих підземних газопроводів з врахуванням впливу блукаючих струмів на інтенсивність електрохімічної корозії. *Нова тема*. 2011. № 3(29). С. 42–43.

6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Probabilistic properties of electrical characteristics of capacitor charge circuit with stochastic active resistance. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.014>
9. Ратушняк Г.С., Ободяньська О.І. Корозійно-діагностичний моніторинг підземної сталеві газотранспортної мережі. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 1 (5). С. 90–98.
10. Ободяньська О. І., Коваль О. І. Засоби захисту підземних газопроводів від корозії. Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7051>. (дата звернення 21.03.2024)
11. Wang, Chengtao & Li, Wei & Wang, Yuqiao. A probabilistic-based model for dynamic predicting pitting corrosion rate of pipeline under stray current interference. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1. Issue 3, Pp. 339-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.003>.
12. Стрілецький Ю. Й., Боднар Р. Т. Аналіз розподілу напруженості магнітного поля в результаті протікання струму в стінках підземних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. 2007. No. 1(18). Pp. 36–40.
13. Mujezinovic A., Turkovic I. Review on cathodic protection system modelling. *B&H Electrical Engineering*. 2017. No. 11. Pp. 81-91.
14. Alhaboubi, Naseer. Simulation of Cathodic Protection System Using Matlab. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. No 14. Pp. 25-37.
15. Mohamad Oghli, Hamed & Akhbari, Mahdi & Kalaki, Ali & Eskandarzade, Mehdi. Design and analysis of the cathodic protection system of oil and gas pipelines, using distributed equivalent circuit model.. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103701>
16. Angst, Ueli. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *Corrosion*. 2019. Vol. 75. No 12. Pp. 1420–1433. DOI: <https://doi.org/10.5006/3355> .
17. Kosobudzki G., Rogoza, M., Lysenko O., Papaika Y. Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. *14 th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Szczecin, Poland, 2018. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8748987>.
18. Pivnyak G., Azukovskiy O., Papaika Yu., E. Careres Cabana, Olczak P., Dyczko A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*. 2021. No 4(155). Pp. 75-84.
19. Aziukovskyi O. O., Tsyplenkov D. V. Forming the current of underground metal pipelines by the high-frequency components of cathodic stations output signal. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 123-129.
20. Aziukovskyi O.O., Papaika Yu.A., Gorev V.N., Babenko N.V. Regulations of the formation of protective potential of underground steel pipelines under conditions of heterogeneous environment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.023>
21. Underground pipeline corrosion detection, analysis and prevention. Ed. by Mark E. Orazem Elsevier, 2014, 343 p.
22. Ahmed N.E.I. Ayad, Wafa Krika, Houari Boudjella, Farid Benhamida, Abdessamad Horch. Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line. *European Journal of Electrical Engineering*. February. 2019. Vol. 21. No. 1. Pp. 49-53. DOI: <https://doi.org/10.18280/ejee.210108>.

CONSIDERATION OF THE VARIABLE STORAGE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRICAL COMPLEXES FOR THEIR PROTECTION AGAINST ELECTROCHEMICAL CORROSION

O.O. Aziukovskyi, Yu.A. Papaika, M.V. Babenko

Dnipro University of Technology,

Dmytro Yavornytskyi ave., 19, Dnipro, 49005, Ukraine, E-mail: azalex@nmu.one

The paper analyzes the problem of protection of underground metal pipelines using active cathodic protection. Shortcomings and emergency situations of active defense complexes are given. Analytical dependences of determining the levels of the protective potential in the conditions of a heterogeneous environment, various variations of the topology of laying the pipeline system are generally presented. The results of comprehensive monitoring of the operation modes of electrotechnical complexes of electrochemical protection allowed to develop a universal methodology for creating energy-efficient and reliable systems of cathodic protection of pipelines. References 22, figures 11.

Key words: metal underground pipelines, electrochemical corrosion, cathodic protection, monitoring of protection modes, analytical calculations of the protective potential level.

1. Frantsevich I.N., Khrushcheva E.V., Frantsevich-Zabludovskaya T.F. Cathodic protection of main gas pipelines. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 1959. 80 p. (Rus)
2. Frantsevich I.M., Gorbachev Yu.A., Hrymailovskiy V.O. About some results of the 20-year comprehensive protection of the main gas pipeline Dashava - Kyiv from corrosion. Bulletin of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 1975. No. 10. Pp. 67–73. (Rus)
3. Frantsevich I.N., Ostapenko V.N., Lukovych V.V. To calculate the parameters of electrical protection of pipelines from corrosion. Preprint 4. Institute of Materials Science Problems of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev. 1985. 14 p. (Rus)
4. Ostapenko V.N., Yagupolskaya L.N., Lukovych V.V., Kokhanovsky I.N., Egorov E.V., Kuzmenko Yu.A., Kalkutin Yu.G. Electrochemical protection of pipelines from corrosion. Kyiv: Naukova dumka, 1988. 192 p. (Rus)
5. Ratushnyak G.S., Obidyanska O.I. Assessment of the technical condition of steel underground gas pipelines, taking into account the influence of stray currents on the intensity of electrochemical corrosion. *Nova tema*. 2011. No. 3(29). Pp. 42–43. (Ukr)
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47. <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>
7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 3–9. <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Probabilistic properties of electrical characteristics of capacitor charge circuit with stochastic active resistance. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 14–17. <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.014>
9. Ratushnyak G.S., Obidyanska O.I. Corrosion-diagnostic monitoring of the underground steel gas transport network. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2017. No. 1 (5). Pp. 90–98. (Ukr)
10. Obidyanska O. I., Koval O. I. Means of protection of underground gas pipelines against corrosion. Materials of the *XLVIII scientific and technical conference of VNTU divisions*, Vinnytsia, March 13-15, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7051>. (available at 21.03.2024) (Ukr)
11. Wang, Chengtao & Li, Wei & Wang, Yuqiao. (2021). A probabilistic-based model for dynamic predicting pitting corrosion rate of pipeline under stray current interference. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1. Issue 3, Pp. 339-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.003>.
12. Striletskyi Yu. Y. and Bodnar R. T. Analysis of magnetic field strength distribution as a result of current flow in the walls of underground pipelines. *Metody ta prylady kontroliu iakociti*. 2007. No. 1(18). Pp. 36–39. (Ukr)
13. Mujezinovic, Adnan & Turkovic, Irfan. Review on cathodic protection system modelling. *B&H Electrical Engineering*. 2017. Vol. 11. Pp. 81-91.
14. Alhaboubi, Naseer. Simulation of Cathodic Protection System Using Matlab. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. No 14. Pp. 25-37.
15. Mohamad Oghli, Hamed & Akhbari, Mahdi & Kalaki, Ali & Eskandarzade, Mehdi. Design and analysis of the cathodic protection system of oil and gas pipelines, using distributed equivalent circuit model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103701>
16. Angst, Ueli. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *Corrosion*. 2019. Vol. 75. No 12. Pp. 1420–1433. DOI: <https://doi.org/10.5006/3355>.
17. Kosobudzki G., Rogoza, M., Lysenko O., Papaika Y. Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. *14 th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Szczecin, Poland, 2018. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8748987>.
18. Pivnyak G., Azukovskiy O., Papaika Yu., E. Careres Cabana, Olczak P., Dyczko A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*. 2021. No 4(155). Pp. 75-84.
19. Aziukovskiy O. O., Tsyplenkov D. V. Forming the current of underground metal pipelines by the high-frequency components of cathodic stations output signal. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. 2015. No 94. Pp. 123-129.
20. Aziukovskiy O.O., Papaika Yu.A., Gorev V.N., Babenko N.V. Regulations of the formation of protective potential of underground steel pipelines under conditions of heterogeneous environment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.023>
21. Underground pipeline corrosion detection, analysis and prevention. Ed. by Mark E. Orazem Elsevier, 2014, 343 p.
22. Ahmed N.E.I. Ayad, Wafa Krika, Houari Boudjella, Farid Benhamida, Abdessamad Horch. Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line. *European Journal of Electrical Engineering*. February. 2019. Vol. 21. No. 1. Pp. 49-53. DOI: <https://doi.org/10.18280/ejee.210108>.

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 29.07.2024

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ КОМПОНЕНТІВ БАГАТОРІВНЕВИХ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗДРОТОВИХ БЛОКІВ ЗВ'ЯЗКУ

Ю.І. Гижко*, канд. техн. наук, **В.М. Зварич****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: zvaritch@gmail.com.

Розглянуто деякі особливості побудови елементів бездротових каналів зв'язку, що входять до складу багаторівневих інформаційно-вимірювальних систем діагностування електротехнічного обладнання. Розглянуто один з можливих варіантів побудови первинного вимірювального каналу, орієнтованого на використання бездротових вимірювальних сенсорів, які відповідають міжнародним стандартам. Коротко наведено опис можливих діагностичних ознак задля визначення технічного стану і класифікації можливих дефектів в окремих вузлах електротехнічного. Бібл. 21, рис. 1.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, система діагностики, лінійні AR процеси.

Вступ.

Оцінка надійності роботи електротехнічного обладнання приймає особливе значення в повоєнний період. Для надійної роботи електростанції важливе безперебійне функціонування не тільки її основного обладнання, але і обладнання власних потреб [1, 2]. Задля вирішення цієї проблеми необхідно мати надійні системи моніторингу та діагностики такого обладнання. Розробкою подібних систем займаються такі компанії як Brüel & Kjær, PCB, SPM, Bently Nevada [3], Timken [4], а також виробники крупного електротехнічного обладнання – Siemens, ABB та інш. [5, 6]. Зрозуміло, що в повоєнний час доцільно мати мобільні системи моніторингу та діагностики. Вони повинні давати можливість оперативної оцінки технічного стану як основного, так і допоміжного обладнання. Особливо привабливими в такий час є використання бездротових технологій побудови систем контролю та діагностики. Існує низка сучасних технологічних рішень, які вже стали стандартами бездротового зв'язку і використовуються для обміну даними між об'єктами на певній відстані. Більш широко застосовується серія стандартів IEEE 802.11 (Wi-Fi) [7], стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [8], а також рішення за стандартом 802.15.4 (ZigBee, WirelessHART, MiWi) [9]. Великі перспективи має використання стандарту LPWAN [9], що забезпечує велику дальність зв'язку, але має обмеження в швидкодії.

Метою роботи є аналіз особливостей побудови бездротових елементів експертної системи (ЕС) моніторингу і діагностики електротехнічного обладнання та деяких методів побудови розв'язувальних правил [10]. Основну увагу в роботі приділено питанням побудови інформаційних каналів та розв'язувальних правил з використання моделей лінійних випадкових процесів як математичних моделей інформаційних сигналів електротехнічного обладнання (ЕО).

Особливості побудови безпроводних елементів багаторівневої ЕС вібродіагностики ЕО.

В Інституті електродинаміки НАН України проводяться дослідження з розробки багаторівневих ЕС вібродіагностики електротехнічного обладнання, які включають в себе блоки бездротових систем передачі інформаційних сигналів. Створено лабораторний зразок такого безпроводного блоку передачі та обробки інформаційних сигналів.

© Гижко Ю.І., Зварич В.М., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-5702-4738>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



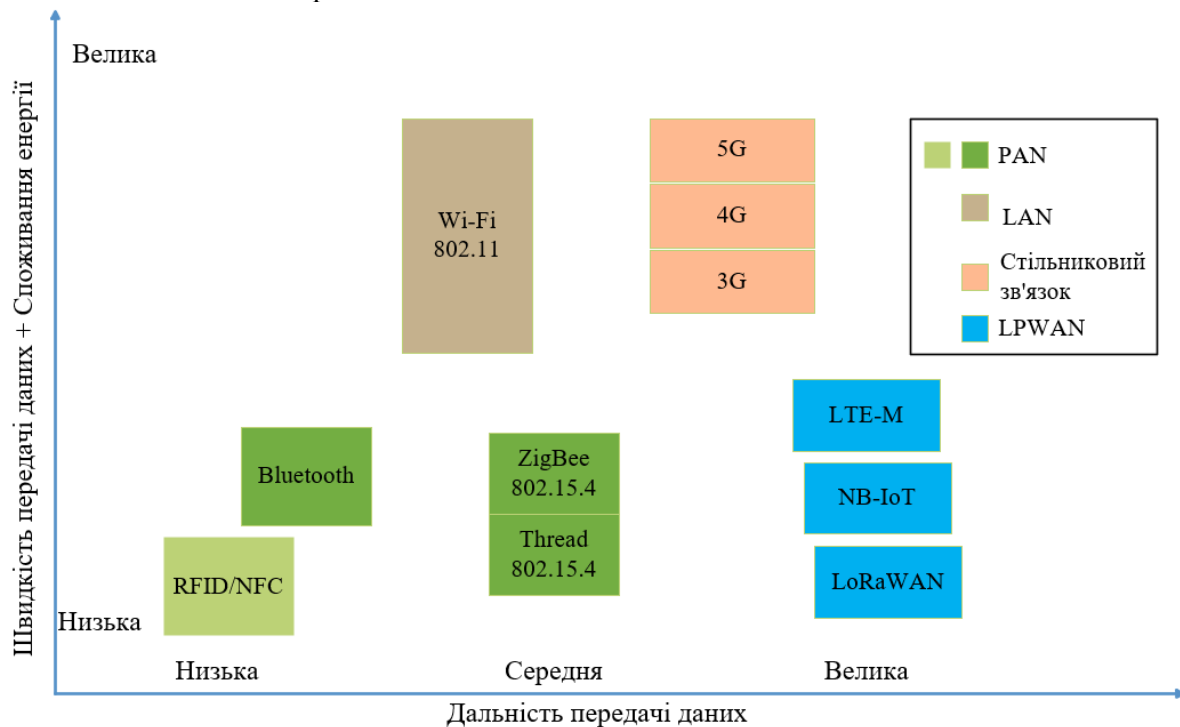
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Бездротова ЕС вібродіагностики має блоки вимірювання, перетворення та передачі інформації (технічні засоби) та блоки, які реалізують програмне управління ЕС, статистичну обробку вимірювальних сигналів, та побудову розв'язуючих правил з визначення технічного стану обладнання, що діагностується (програмні засоби).

Блок сенсорів виконує функцію виміру, обробки та передачі вимірювальних інформаційних сигналів на окремих вузлах електричних машин. У процесі створення лабораторного зразка ЕС вібродіагностування використовувалися принципи модульності задля забезпечення можливості модифікації ЕС з урахуванням конкретних потреб користувача.

На етапі створення елементів ЕС, які враховують особливості функціонування об'єкту діагностування, важливим кроком є визначення типу бездротового протоколу зв'язку та розробка алгоритму функціонування автономного вимірювального перетворювача, що буде враховувати як особливості каналу передачі даних, так і потреби в отриманні та передачі діагностичної інформації.

На рисунку наведено порівняння найпоширеніших протоколів передачі даних з точки зору швидкодії та дальності передачі даних.



Розглянемо варіант побудови блока сенсорів, що базується на використанні сенсора ADXL202 виробництва компанії Analog Devices [12] та протоколу передачі даних Bluetooth [8].

Фізично блок сенсорів, який використано у створеному лабораторному зразку ІВС вібродіагностування, містить наступні основні складові: два акселерометра ADXL202 [12]; мікроконтролер PIC16LF873-041 [13] виробництва компанії Microchip Technology; модуль Bluetooth EUMF2CAMM-XX [14] виробництва компанії TAIYO YUDEN.

Вібраційний сигнал, виміряний на електричній машині, що діагностується, на виході сенсора представляється в аналоговому вигляді.

Особливістю даного блока сенсорів є висока швидкість безпроводного каналу, але відносно невисока автономність функціонування блоку сенсорів без використання енергозберігаючих алгоритмів, що враховують характеристики роботи об'єкту діагностування, та без застосування додаткових пристроїв накопичення енергії як складової безпроводного блоку сенсорів.

Запропоновано також використання сенсорів серії 8911 виробництва компанії TE connectivity, які використовують безпроводний канал передачі LoRaWAN [9], що, в залежності від частоти передачі діагностичної інформації, забезпечує можливість автономного функціонування протягом п'яти років та можливість обробки вібраційного сигналу з частотою до 15кГц (резонансна частота 30 кГц). Блок сенсору серії 8911 складається також з мікропроцесора, який згідно з вбудованим

програмним забезпеченням оцінює спектри зареєстрованого сигналу та фіксує їхні пікові значення на визначених частотах. Тобто, після формування навчальних сукупностей для певного вузла діагностування його можливо використати як основний сенсор для автономного діагностування вузлів обладнання на певному ієрархічному рівні Smart Grid з можливістю самостійного визначення критичних значень віброприскорення для передачі інформації на оперативний рівень. Це забезпечує можливість прийняття рішення про наявність дефекту об'єкту діагностування. Особливістю використання даного сенсору є широкий частотний діапазон вимірюваного сигналу, висока автономність функціонування, але низька швидкодія безпроводного каналу передачі даних.

Застосування комплексного підходу для створення ЕС вібродіагностики, яка враховує як можливості блоків сенсорів, особливості функціонування об'єкту діагностування та його окремих вузлів, розробку методик діагностування та алгоритмів керування блоками сенсорів разом з програмним забезпеченням, що відповідає за формування навчальних сукупностей та прийняття діагностичних рішень, дає змогу створювати ЕС з мережею безпроводних сенсорів.

Використання лінійних випадкових процесів з дискретним часом в задачах побудови розв'язувальних правил багаторівневих систем діагностики ЕО.

Лінійні випадкові процеси знаходять все більше застосування під час вирішення завдань виділення (детектування) та класифікації інформаційних сигналів у радіотехніці, геофізиці, вібродіагностиці, біомедичних дослідженнях. Важливим завданням застосування лінійних випадкових процесів у програмах є розробка методів класифікації таких процесів та їх використання в задачах діагностики ЕО.

Розглянемо деякі підходи (методи) для побудови розв'язувальних правил, які можна застосувати у разі використання випадкових процесів як математичної моделі інформаційних сигналів [2, 10, 15–18]. В даній роботі як математичні моделі будемо використовувати лінійні процеси авторегресії [2, 10, 19].

Лінійним процесом авторегресії (AR) [10,20] називається процес який задається наступним різницеvim рівнянням:

$$\xi_t + a_1 \xi_{t-1} + \dots + a_p \xi_{t-p} = \zeta_t, \quad (1)$$

де a_1, \dots, a_p – параметри авторегресії; p – порядок авторегресії; ζ_t – породжуючий процес ξ_t . Для лінійних (AR) процесів, породжуючий процес є процесом з незалежними значеннями, що має безмежно подільний закон розподілу.

Якщо корені характеристичного рівняння

$$\Psi(z) = a_p + a_{p-1}z + \dots + a_1 z^p \quad (2)$$

лежать усередині одиничного кола, рівняння має єдине стаціонарне рішення

$$\xi_t = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) \zeta_{t-\tau}. \quad (3)$$

Ядро $\{\varphi(\tau), t \in \mathbb{Z}\}$ пов'язане з параметрами авторегресії $\{a_j, j = \overline{1, p}\}$ рекурентними співвідношеннями [10]

$$\varphi^*(k) = \begin{cases} 0 & k < 0 \\ 1 & k = 0 \\ b_k + \sum_{\tau=1}^p a_\tau \varphi^*(k - \tau) & \end{cases}. \quad (4)$$

Передбачається, що $\varphi(0) = 1$; $\sum_{\tau=0}^{\infty} |\varphi(\tau)|^2 < \infty$.

У разі використання параметрів авторегресії як інформативних ознак в задачах діагностики технічного стану технічних об'єктів розв'язувальні правила можна побудувати в багатовимірних просторах. Таку задачу вібродіагностики вузлів енергетичного обладнання та побудову розв'язувальних правил у багатовимірних діагностичних просторах розглянуто у роботах [2, 10].

Задля побудови розв'язувальних правил діагностики вузлів енергетичного обладнання пропонується використовувати ядра лінійних випадкових процесів. Причому така процедура

передбачає можливість побудови розв'язувальних правил у випадку, коли інформаційні сигнали описуються різними типами лінійних випадкових процесів, наприклад AR та ARMA.

Експериментальні результати дослідження вібраційних сигналів.

Оцінено ядра лінійних випадкових процесів, що відповідають вібраціям підшипника 309ЕШ2, відповідних як справним підшипникам, так і підшипникам, що мають перекіс $12' \pm 2,5'$. Експериментально було визначено діапазон значень параметрів $\varphi^2(\tau)$. Об'єм вибірки під час оцінки параметра змінювався в діапазоні 100-1000. Методична помилка, пов'язана з обмеженим обсягом вибірки у такому діапазоні, $\delta \leq 0.01\%$.

Як показано в роботі [21], можна побудувати міру різниці між стаціонарними процесами авторегресії [4], використовуючи ядра таких процесів. Така міра визначається відстанню $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$, яку можна визначити таким чином:

$$d[\xi_1(t), \xi_2(t)] = \sqrt{\sum_{\tau=0}^{\infty} (\varphi_{\xi_1}(\tau) - \varphi_{\xi_2}(\tau))^2}, \quad (5)$$

де $\varphi_{\xi_1}(\tau)$ – ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_1(t)$; $\varphi_{\xi_2}(\tau)$ – ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_2(t)$. Зазначимо, що таким чином можна побудувати розв'язувальні правила для лінійних процесів авторегресії, що мають різний порядок авторегресії, а також побудувати розв'язувальні правила для процесів авторегресії та процесів ковзного середнього. Відповідно до [21], функція $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$ завжди існує і задовольняє властивостям функції відстаней тобто, вона позитивна, існує нульовий елемент і має місце нерівність трикутника.

Розглянемо наступний приклад. Нехай вібраційний сигнал, що апроксимується процесом авторегресії п'ятого порядку, який відповідає справному підшипнику 309 ЕШ2: $a_1 = -0.9854$; $a_2 = 1.2509$; $a_3 = -0.5536$; $a_4 = 0.4249$; $a_5 = 0.0426$, а процесом авторегресії четвертого порядку апроксимується вібраційний сигнал, який відповідає підшипнику 309 ЕШ2 з перекосом $12' \pm 2,5'$: $a_1 = -1.1281$; $a_2 = 1.4005$; $a_3 = -0.7095$; $a_4 = 0.5145$.

Тоді

$$d[\xi_1(t), \xi_2(t)] = \sqrt{\sum_{\tau=0}^{\infty} (\varphi_{\xi_1}(\tau) - \varphi_{\xi_2}(\tau))^2} = 0.9836.$$

Таким чином, $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$ можна використати як діагностичну ознаку. Вона дає можливість побудувати розв'язувальні правила для випадку апроксимації реалізацій вібраційних сигналів лінійними процесами AR та ARMA різних порядків та з різними значеннями коефіцієнтів.

Висновки.

У відповідності з сформульованою метою отримані наступні основні результати.

1. Показані особливості бездротових елементів багаторівневих ІВС діагностики електротехнічного обладнання та створеного лабораторного зразка елемента таких бездротових елементів.

2. Наведено один з способів побудови розв'язувальних правил з діагностики електротехнічного обладнання у разі використання лінійних AR процесів як математичні моделі вібраційних сигналів, що використовує ядра таких процесів як діагностичні ознаки.

Роботу виконано за державною науково-дослідною роботою «Діагностика-ЕМ-3» державний реєстраційний номер 0120U002002 (КПКВК 6541030) та в рамках проекту НФДУ «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень системи тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів».

1. Titko O.I. Increased reliability and efficiency of electric machines in dynamic modes of generating power units. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2009. Vol. 23. Pp. 83-90. (Ukr)

2. Zvaritch V.N., Myslovych M.V., Gyzhko Y.I. Application of Linear Random Processes to Construction of Diagnostic System for Power Engineering Equipment. In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*. APMS. IFIP *Advances in Information and Communication Technology*. 2021. Vol. 630. Part 1. Pp. 617-622. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_67.

3. Bently Nevada Machine Condition Monitoring. URL: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada> (accessed at 15.04.2024).

4. Timken World. URL: <https://www.timken.com/timken-world/products/> (accessed at 15.04.2024).
5. Siemens Product & Services. URL: <https://www.siemens.com/> (accessed at 05.04.2024).
6. ABB Power-Generation. URL: <https://www.new.abb.com/power-generation/> (accessed at 15.03.2024).
7. IEEE 802.11-2016. IEEE Standard. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/> (accessed at 15.04.2024).
8. IEEE 802.15.1-2005 IEEE Standard. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.1/3513/> (accessed at 20.03.2024).
9. IEEE 802.15.4 IEEE Standard. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4 (accessed at 15.04.2024).
10. Babak V., Babak S., Myslovych M., Zaporozhets A., Zvaritch V. Methods and Models for Information Data Analysis. *Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 281. Pp. 23-70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2 (accessed at 15.04.2024).
11. TE 8911 Wireless Accelerometer. URL: <https://www.te.com/en/about-te/news-center/8911-wireless-accelerometer.html> (accessed at 10.04.2024).
12. Analog Devices ADXL202. URL: <https://www.analog.com/en/products/adxl202.html> (accessed at 15.04.2024).
13. Microchip PIC16F873-04. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/pic16f873> (accessed at 11.04.2024).
14. Taiyo Yuden EYMF2Camm-XX Datasheet. URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/117754/TAIYO-YUDEN/EYMF2Camm-XX/3679/5/EYMF2Camm-XX.html> (accessed at 15.04.2024).
15. Anderson T.W. The statistical analysis of time series. John Wiley & Sons, Inc, 1971. 558 p.
16. Berger D. Levy driven CARMA generalized process and stochastic partial differential equations. *Stochastic Processes and their Applications*. 2020. Vol. 130(10). Pp. 5865-5887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spa.2020.04.009>.
17. Brockwell P., Lindner A. Prediction of Levy-driven CARMA processes. *Journal of Econometrics*. 2015. Vol. 189(2). Pp. 263-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.03.021>.
18. Ge. R., Zhai Q., Wang H., Huang Ya. Wiener Degradation Models With Scale Mixture Normal Distributed Measurement Errors for RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 173. 109029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109029>.
19. Scherbak L., Fryz M., Hotovych V. Electricity consumption simulation using random coefficient periodic autoregressive model. 4th International Conference on *Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters* (ICFS-2023). Kryvyi Rih, Ukraine, 22-26 May 2023. Vol. 1254. 012026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012027>.
20. Zvaritch V. Some Singularities of Linear AR Processes Characterization in Applied Problems of Power Equipment and Power Systems Diagnosis. In: Kyrylenko O., Denysiuk S., Strzelecki R., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (eds). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 512. Pp. 263-278. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_12.
21. Triacca U. Feedback causality and distance between ARMA models. *Mathematical and Computing in Simulation*. 2004. Vol. 64. Pp. 679-685.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF ELEMENTS OF MULTILEVEL EXPERT SYSTEMS FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT UNITS, TAKING INTO ACCOUNT THE USE OF WIRELESS SYSTEM ELEMENTS

Yu.I. Gyzhko, V.M. Zvaritch
Institute of Electrodynamics National Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: zvaritch@gmail.com.

Some peculiarities of construction of elements of wireless communication channels, which are part of multilevel information and measuring systems for diagnosing electrical equipment, are considered. One of the possible options for constructing the primary measurement channel, focused on the use of wireless measurement sensors that are consistent with international standards, is considered. A brief description of possible diagnostic features for determining the technical condition and classification of possible defects in individual components of electrical equipment is given. References 21, figures 1.

Key words: electrical engineering equipment, diagnostics system, linear AR processes.

Надійшла 25.04.2024
 Остаточний варіант 03.06.2024