



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

№ 1
2023

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ*

Кириленко О.В., головний редактор,
академік НАН України
Шидловський А.К., академік НАН України
Буткевич О.Ф., заступник головного
редактора, професор
Волков І.В., член-кор. НАН України
Жаркін А.Ф., член-кор. НАН України
Кенсицький О.Г., д-р 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
Мислович М.В., 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., д-р техн.наук
Городжа Л.В., відповідальний секретар
канд.техн.наук

EDITORIAL BOARD*

Kyrylenko O.V., Editor-in-Chief,
Member of N.A.S.Ukraine
Shydlovskiy A.K., Member of NAS Ukraine
Butkevych O.F., Deputy Editor-in-Chief, Professor
Volkov I.V., Corresponding Member of NAS Ukraine
Zharkin A.F. , Corresponding 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
Myslovych M.V. 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

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 Перемоги, 56,

Інститут електродинаміки НАН України.

Тел. (044) 366 26 57.

Email: ted@ied.org.ua

<https://techned.org.ua>

ЗМІСТ

Теоретична електротехніка та електрофізика

ЩЕРБА А.А., ЩЕРБА М.А., ПЕРЕТЯТКО Ю.В. Електрофізичні процеси деградації зшитої поліетиленової ізоляції силових кабелів і самоутримних ізольованих проводів за несинусоїдних напругах і струмах	3
ПОДОЛЬЦЕВ О.Д., ЛОМКО М.О. Оцінка швидкості старіння полімерної ізоляції силового кабелю під дією періодичної несинусоїдної напруги	7
Перетворення параметрів електричної енергії	
МИСАК Т.В. Аналіз стійкості системи стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі трифазного паралельного активного фільтра	12
МАРТИНОВ В.В. Визначення умов зменшення енергонакопичення у вихідних колах джерел електроживлення потужних газорозрядних установок	18
Електромеханічне перетворення енергії	
ПЕРЕСАДА С.М., НІКОНЕНКО Є.О., КОВБАСА С.М., КУЗНСЦОВ О. Адаптивні спостерігачі частоти двофазних та однофазних гармонічних сигналів	25
ШУРУБ Ю.В. Визначення параметрів типових цифрових статичних регуляторів промислових електроприводів	34
ПОПОВИЧ О.М., ЯШИН Р.В. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками	42
Електроенергетичні системи та установки	
КИРИЛЕНКО О.В., ПАВЛОВСЬКИЙ В.В., СТЕЛЮК А.О., ЛЕНЬГА О.В., ЗАЙЧЕНКО В.Б., ЛИХОВИД Ю.Г. Аналіз зміни частоти в ОЕС України за різних режимів її роботи	51
ДЕНИСЮК С.П., БЄЛОХА Г.С., ДЕРЕВ'ЯНКО Д.Г. Оптимізація витрат первинного палива на локальних ринках електроенергії в системах з дизель-генераторами	56
БЛІНОВ І.В., МІРОШНИК В.О., ЛОСКУТОВ С. Зниження витрат на покриття небалансів учасників балансуєної групи виробників електричної енергії з відновлюваних джерел	62
АНМЕД JASSIM АНМЕД, МОНАММЕД Н. АЛКНАФАЛІ, АЛІ JAFER МАНДІ. Decision-making method for the optimum allocation of charging stations of electric vehicle in distribution networks	67
Електротехнологічні комплекси та системи	
БОЖКО І.В., КОНДРАТЕНКО І.П., ЛОБАНОВ Л.М., ПАЩИН М.О., БЕРДНІКОВА О.М., МИХОДУЙ О.Л., КУШНАРЬОВА О.С., ГОНЧАРОВ П.В. Застосування імпульсного бар'єрного розряду для обробки поверхні пластин зі сталі марки 25ХГНМТ	76
Інформаційно-вимірювальні системи в електроенергетиці	
САМКОВ О.В., КОВАЛЬ В.В., ЛИСЕНКО В.П., КАЛЬЯН Д.О., РИБІНА О.Б., ОСІНСЬКИЙ О.Л. Пристрій багатоканального моніторингу синхросигналів SMART GRID енергосистем з оптимальним за швидкодією фазовим автопідстроюванням частоти	81

CONTENTS

Theoretical electrical engineering and electrophysics

- SHCHERBA A.A., SHCHERBA M.A., PERETYATKO JU.V. Electro-physical processes of degradation of cross-linked polyethylene insulation of power cables and self-carrying insulated wires under non-sinusoidal voltages and currents3
- PODOLTSEV A.D., LOMKO M.O. Evaluation of the aging rate of polymer insulation of power cable under the action of periodic non-sinusoidal voltage7

Conversion of electric energy parameters

- [MYSAK T.V.] Stability analysis of the voltage stabilization system on the storage capacitor of the three-phase shunt active filter12
- MARTYNOV V.V. Determination of conditions for reducing energy accumulation in the output circuits of power sources of powerful gas-discharge installations18

Electromechanical energy conversion

- PERESADA S.M, NIKONENKO Y., KOVBASA S., KUZNIETSOV A. Adaptive frequency observers for two-phase and single-phase harmonic signals25
- SHURUB YU.V. Determination of parameters of typical digital static regulators of industrial electric drives34
- POPOVYCH O.M., YASHYN R.V. Study of the energy efficiency of electro-mechanical water supply system of a multi-storey building with two-level risers42

Electric power systems and installations

- KYRYLENKO O.V., PAVLOVSKIY V.V., STELIUK A.O., LENGA O.V., ZAYCHENKO V.B., LYKHOVYD YU.G. Analysis of frequency change in the IPS of Ukraine under different regimes of its operation51
- DENYSIUK S.P., BIELOKHA H.S., DEREVIANKO D.G. Optimization of consumption of primary fuel in local electricity markets for systems using diesel generators56
- BLINOV I.V., MIROSHNYK V.O., LOSKUTOV S. Reducing the cost of imbalances of the balancing group of producers from renewable energy sources62
- AHMED JASSIM AHMED, MOHAMMED H. ALKHAFAJI, ALI JAFER MAHDI. Decision-making method for the optimum allocation of charging stations of electric vehicle in distribution networks 67

Electrotechnological complexes and systems

- BOZHKO I.V., KONDRATENKO I.P., LOBANOV L.M., PASHCHIN M.O., BERDNIKOVA O.M., MYKHODUI O.L., KUSHNAROVA O.S., GONCHAROV P.V. Pulsed barrier discharge for treatment of surfaces of 25XГНМТ steel plates 76

Information-measuring systems in power engineering

- SAMKOV O.V., KOVAL V.V., LYSENKO V.P., KALIN D.O., RYBINA O.B., OSINSKYI O.L. Multichannel clock signal monitoring appliances for smart grid networks with speed-optimal phase-locked loop 81

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

Друкується згідно з рекомендацією Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України, протокол № 13 від 22.12.2022 р. Включено до Переліку наукових фахових видань України 24.05.2018, категорія «А».
Підписано до друку 09.01.2023. Формат 60x84/8. Пап. друк. офс. Ум.-друк. арк. 11,4. Зареєстровано 20.01.94. Свідоцтво: серія КВ, № 388.

Поліграфічна дільниця Інституту електродинаміки НАН України 03057, м. Київ, пр. Перемоги, 56.

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ДЕГРАДАЦІЇ ЗШИТОЇ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ І САМОУТРИМНИХ ІЗОЛЬОВАНИХ ПРОВІДІВ ЗА НЕСИНУСОЇДНИХ НАПРУГАХ І СТРУМАХ

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, М.А. Щерба^{2**}, докт. техн. наук,
Ю.В. Перетятко^{2***}, канд. техн. наук

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

E-mail: anat.shcherba@gmail.com.

² НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: m.shcherba@gmail.com.

Досліджено особливості електрофізичних процесів деградації зшитої поліетиленової (ЗПЕ) ізоляції силових кабелів і самоутримних ізольованих проводів (СПП) з урахуванням водяних мікрровключень і віток триїнгів, виникаючих в ній під час виготовлення та експлуатації. Обґрунтовано, що поява несинусоїдних напруг і струмів у лініях електропередачі (ЛЕП), що використовують сучасні силові кабелі та СПП з твердою ЗПЕ ізоляцією, викликає підсилення електрофізичних чинників, спрямованих на збільшення пульсуючого електромеханічного тиску рідких струмопровідних мікрровключень і віток триїнгів на поверхню твердої ЗПЕ ізоляції та зростання з часом їхніх розмірів вздовж напруженості наявного електричного поля (ЕП). У роботі визначено закономірності змінення з часом величини напруженого об'єму та максимального тиску в ЗПЕ ізоляції та додаткового впливу на такі закономірності вищих гармонічних складових електричних напруг і струмів за несинусоїдних процесах в такій ізоляції. Вказано, що такі електрофізичні впливи на полімерну ізоляцію призводять до збільшення інтенсивності як порогових, так і стохастичних механізмів руйнації мікроструктури ЗПЕ ізоляції силових кабелів і СПП та вимагають розробку додаткових регламентів щодо стандартних умов їхнього виготовлення та експлуатації. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: напруженість електричного поля, сучасна полімерна ізоляція, водяні мікрровключення, пульсуючий електромеханічний тиск, напружений об'єм, деградація, силовий кабель, СПП, надійність.

Вступ. Використання відновлюваних джерел електроенергії з вихідними напівпровідниковими інверторами напруги та потужних нелінійних навантажень в сучасних електричних мережах може призводити до погіршення якості електричної енергії, зокрема спотворювати синусоїдний характер напруг і струмів, сприяючи по суті появи в них високочастотних складових. В той же час експериментальні дослідження електрофізичних властивостей ЗПЕ ізоляції показали, що збільшення частоти синусоїдної напруги прискорює збільшення довжини водних триїнгів до певного розміру та змінення їхньої форми, зменшуючи тривалу стійкість ізоляції до повного електропробою [1, 2].

На збільшення довжини і змінення форми водних триїнгів впливають мультифізичні процеси, які умовно можна поділити на електрохімічні, електротермічні та електромеханічні [3]. З них слід виділити виникнення часткових розрядів (ЧР) у газових мікропорожнинах ізоляції в результаті втрати електронів молекулами полімеру під впливом ЕП [4], електротермічні впливи внаслідок підвищення тиску води через її нагрівання і випаровування та згорання локальних нанообластей ЗПЕ ізоляції з утворенням струмопровідних наночастинок вуглецю у плазмових мікрозонах ЧР [5]. Особливу увагу слід звернути на електромеханічні процеси, що проявляються у вигляді явища діелектрофорезу полярних молекул води у мікроструктурі полімерів під впливом неоднорідного ЕП [6]; електрострикції, тобто деформації ізоляції в змінному ЕП (іони кристалічної решітки організовані досить жорстко і можуть змішуватися під дією поля тільки на дуже малі відстані, що в змінному ЕП може спричинити електрострикцію решітки); електроосмосу, тобто проникнення води під дією ЕП в поверхневі та середні структурні нано- та мікропори в ізоляції; виникнення електростатичних і електродинамічних сил на межі діелектричних і провідних середовищ [5–7].

Під час дослідження мультифізичних процесів електродеградації ЗПЕ ізоляції важливою є оцінка ступеню впливу кожного з окремих ефектів на загальний механізм руйнації її мікроструктури,

© Щерба А.А., Щерба М.А., Перетятко Ю.В., 2023

ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; **<https://orcid.org/0000-0001-6616-4567> ;

***<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

оскільки на даний час відсутня єдина математична модель появи та розвитку водних триїнгів в ЗПЕ ізоляції. Узагальнення відомих результатів експериментальних досліджень показує, що для оцінки впливу на електрофізичні процеси деградації ЗПЕ ізоляції силових кабелів і СІП треба враховувати щонайменше наступні процеси: зростання інтенсивності та частоти електромеханічних впливів з боку рідких струмопровідних мікрровключень на структуру ізоляції; зростання енергетичних втрат в мікродефектах ізоляції через наявність додаткових вищих гармонічних складових наруги і струму; підвищення релаксаційних втрат і температури локальних мікрооб'ємів ізоляції; збільшення кількості виникаючих носіїв заряду за одиницю часу біля мікрровключень та зростання інтенсивності інжекції в них електронів. Узагальнюючим електрофізичним механізмом підвищення інтенсивності деградації ЗПЕ ізоляції в змінному ЕП є змінення форми та зростання довжини водяних мікрровключень та мікротриїнгів вздовж ЕП.

Метою роботи є вдосконалення математичної моделі ЗПЕ ізоляції силових кабелів та СІП шляхом урахування появи в них несинусоїдних напруг і струмів задля проведення чисельних розрахунків процесів зростання напруженості ЕП, величини напруженого об'єму та максимальних електромеханічних тисків, що можуть призводити до змінення форми та довжини внутрішніх водяних мікродефектів ізоляції.

Фізико-математичну постановку задачі сформульовано шляхом удосконалення математичної моделі, розробленої в роботах [8–10]. ЕП приймається несинусоїдальним і досліджується його розподіл в ЗПЕ ізоляції, що має водяні мікрровключення складної форми – еліпсоїдальні з циліндричними мікротриїнгами на вершині, довжина і кількість яких змінюється з часом. При цьому враховувалися нелінійні властивості ЗПЕ ізоляції, які проявляються за локальної напруженості ЕП $E > 100$ кВ/мм, тобто враховувалося змінення електропровідності ЗПЕ ізоляції від напруженості ЕП $\sigma(E)$ за залежностями, наведеними в [3, 6, 8].

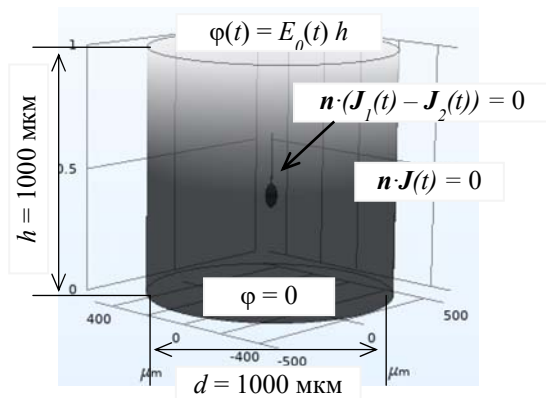


Рис. 1

У пакеті прикладних програм Comsol Multiphysics з використанням методу скінчених елементів та методу багатомасштабного моделювання проведено розрахунки збурень ЕП у локальному мікрооб'ємі ЗПЕ ізоляції кабелів або СІП з мікрровключенням комбінованої форми всередині, як показано на рис. 1.

Спочатку на макрорівні всього об'єму ізоляції у поперечному перерізі розраховувався розподіл електричного потенціалу $\varphi(t)$ і визначалися граничні умови для розв'язку задачі на мікрорівні локального об'єму з дефектом. Вирішувалася крайова задача для системи рівнянь Максвелла з граничними умовами для розрахункової області, як показано на рис. 1. На границях області у на-

прямку зовнішнього ЕП задавалися умови Дірихле – значення потенціалу $\varphi(t) = E_n(t) h$ і $\varphi = 0$. На границях, перпендикулярних ЕП, – умови Неймана – рівність нулю нормальних компонент повного струму $n \cdot J(t) = 0$ або, виражаючи через потенціал φ – рівність нулю похідних від потенціалу по нормалі до поверхні ($\partial\varphi/\partial n = 0$). На міжфазних границях всередині розрахункової області – границях ізоляція-мікродефект – також задавалися умови Неймана, тобто рівності між собою нормальних компонент повного струму $n \cdot (J_1(t) - J_2(t)) = 0$, тобто похідних $\partial\varphi_1/\partial n = \partial\varphi_2/\partial n$.

Система рівнянь Максвелла вирішувалася у квазістатичному припущенні ($\partial B/\partial t \approx 0$), оскільки частота гармонік ЕП була низькою. Розрахункове рівняння для знаходження розподілу потенціалу $\varphi(t)$ в мікрооб'ємі ЗПЕ ізоляції, як і в [10], мало вигляд

$$\operatorname{div} \left[-\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0, \quad (1)$$

де ε – відносна діелектрична проникність, а ε_0 – діелектрична стала.

Повний струм в розрахунковій області $J_{\text{повн}}(t)$ розраховувався як сума струмів провідності всередині мікрровключення та зміщення у діелектрику. Електромеханічні сили впливу ЕП зарядів на поверхні водяних мікротриїнгів на тверду ЗПЕ ізоляцію розраховувалися з використанням тензору напружень Максвелла. Середня напруженість ЕП в ізоляції $E_0 = 10$ кВ/мм. Розміри еліпсоїдального включення і триїнгу були меншими від допустимих відомих стандартами.

Результати чисельного експерименту. На рис. 2 напрямки і довжини стрілок (у логарифмічній шкалі) відповідають локальним тискам f зі сторони рідини дефекту на поверхню ізоляції. Значення тиску

f_{max} біля вістря триїнгу дорівнювало 2–4 МПа в залежності від його конфігурації і є порядку межі механічної міцності для ЗПЕ ізоляції. Тонування відповідає області напруженого об'єму V_n діелектрика, тобто об'єму, у якому напруженість ЕП є нижчою від значення електропробою ізоляції, але вищою від значення, за якого в ньому можуть виникати стохастичні руйнівні процеси. Область V_n розраховувалася як в [9, 10], в ній напруженість E принаймні у 1,5 рази вища від середньої напруженості E_0 . Колір тонування згідно шкали праворуч відповідає напруженості ЕП, наведеній у відносних одиницях, у вигляді коефіцієнта підсилення поля $k_E = E/E_0$.

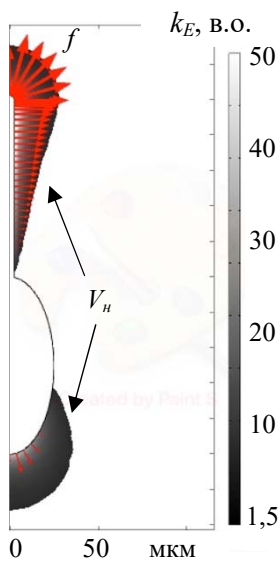
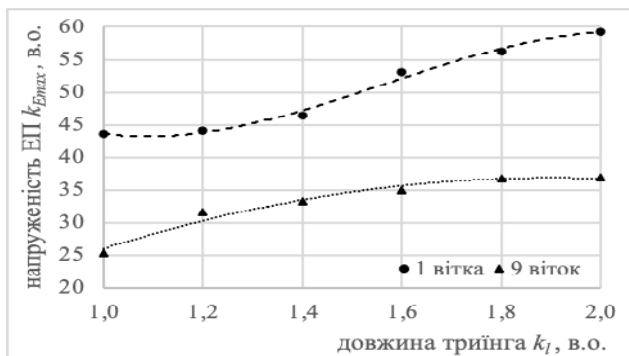


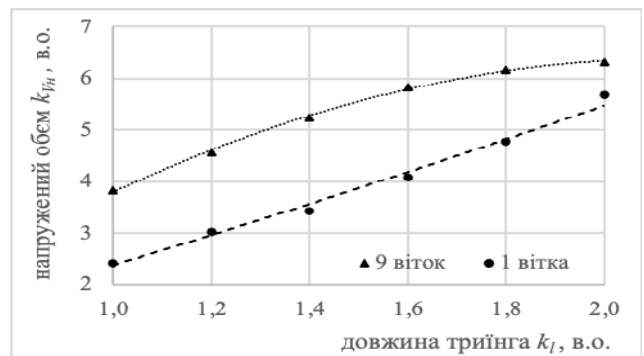
Рис. 2

На рис. 3 показано залежності величин максимальної напруженості ЕП E_{max} і напруженого об'єму V_n у відносних одиницях: $k_{E_{max}} = E_{max}/E_0$, $k_{V_n} = V_n/V_0$ (де V_0 – об'єм водного мікродфекту) від довжини триїнга l також у відносних одиницях $k_l = l/l_0$ (l_0 – початкова довжина триїнгу за частоти 50 Гц). Криві з маркерами у формі крапок і крупнішим пунктиром відповідають триїнгу з однією віткою, а криві з маркерами трикутниками і мілким пунктиром – розгалуженому триїнгу з 9 вітками.

Згідно [2, 5] підвищення на порядок частоти напруги та струму (наявність складових до 10-ої гармоніки включно) призводить до прискореного накопичення об'ємного заряду в ЗПЕ ізоляції та зростання за той же час максимального розміру триїнгу вздовж ЕП щонайменше в 1,8 разів ($k_l = 1,8$) порівняно з частотою 50 Гц. Наші розрахунки показують, що таке змінення триїнгу викликає збільшення максимальної напруженості поля E_{max} в 1,3 рази (від значень $k_{E_{max}}$ 43,6 до 56,2 – рис. 3,



а



б

Рис. 3

а), напруженого об'єму k_{V_n} майже у 1,6 разів (від значень 3,8 до 6,2 – рис. 3, б), а максимального тиску на поверхню твердої ізоляції k_f – у 1,7 рази. Причому такі руйнівні впливи на ізоляцію є додатковими до силових впливів, діючих за синусоїдних напругах і струмах згідно [8-10]. Таким чином, у разі виникнення в електричному полі складових до 10-ої гармоніки включно величина максимальної напруженості поля збільшується на 30 %, величина напруженого об'єму – на 60 %, а максимального пульсуючого електромеханічного тиску – на 70 % порівняно з основною частотою, що пояснює зменшення ресурсу ЗПЕ ізоляції та її стійкості до електропробою за несинусоїдних напругах і струмах в жилах силових кабелів та СІП. На жаль, наявність несинусоїдних напруг і струмів під час випробування та експлуатації силових кабелів і СІП, що використовують ЗПЕ ізоляцію, до цих пір ще не регламентується.

Висновки. 1. Поява в твердій ЗПЕ ізоляції несинусоїдного ЕП і відповідно його вищих гармонічних складових викликає зростання інтенсивності електромеханічних впливів зарядів, індукованих на поверхні водяних мікротриїнгів, на її мікроструктуру, викликаючи в ній більш швидке зростання довжини триїнгів вздовж поля, ніж за синусоїдних процесах. Це підтверджено результатами експериментальних досліджень [2, 4-6]. Таке явище виникає тому, що поява вищих гармонік ЕП підвищує інтенсивність інжекції електронів в мікроструктуру ізоляції і відповідно накопичення об'ємних зарядів. В ній зростають також релаксаційні втрати та температура локальних мікрооб'ємів.

2. Проведені в роботі розрахунки показали, що виникаюча за несинусоїдальних ЕП інтенсифікація збільшення довжини водяних мікротриїнгів вздовж ЕП викликає підвищення максимальної напруги ЕП, величини напруженого об'єму та максимального тиску в твердій ЗПЕ ізоляції, що використовується в сучасних силових кабелях та СІП. Так під час виникнення в електричному полі складових

до 10-ої гармоніки включно, величина максимальної напруженості поля збільшується на 30 %, величина напруженого об'єму – на 60 %, а максимального пульсуючого електромеханічного тиску – на 70 % порівняно з основною частотою. Це викликає зменшення ресурсу ЗПЕ ізоляції та її стійкості до електропробою при несинусоїдних напругах і струмах в жилах силових кабелів та СПП. Урахування вказаних обставин в електричних мережах України, що використовують силові кабелі та СПП з сучасною твердою ЗПЕ ізоляцією, на думку авторів, є необхідним як під час їхніх випробувань, так і експлуатації.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541030.

ELECTRO-PHYSICAL PROCESSES OF DEGRADATION OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLES AND SELF-CARRYING INSULATED WIRES UNDER NON-SINUSOIDAL VOLTAGES AND CURRENTS

A.A. Shcherba¹, M.A. Shcherba², Ju.V. Peretyatko²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: iednat1@gmail.com

² NTU Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: m.shcherba@gmail.com

The features of electro-physical processes of degradation of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of power cables and self-carrying insulated wires (SIW) are studied, taking into account water microinclusions and dendrite branches that appear in such insulation during manufacture and operation. It is substantiated that the appearance of non-sinusoidal voltages and currents in power transmission lines (TL) using modern power cables and SIW with solid XLPE insulation causes an increase in electro-physical factors aimed at increasing the pulsating electromechanical pressure on the surface of solid XLPE insulation by liquid conductive microinclusions and dendrite branches and an increase in over time, their sizes along the strength of the existing electric field (EF). The paper defines the patterns of change over time in the magnitude of the stressed volume and the maximum pressure in the XLPE insulation and the additional impact on such patterns of higher harmonic components of electrical voltages and currents during non-sinusoidal processes in such insulation. It is indicated that such electro-physical effects on solid polymer insulation lead to an increase in the intensity of both threshold mechanisms and stochastic ones of destruction of the microstructure of the solid XLPE insulation of power cables and self-carrying insulated wires and require the development of additional regulations for standard conditions for their manufacture and operation. References 10, figures 3.

Keywords: electric field strength, modern polymer insulation, water microinclusions, pulsating electromechanical pressure, stressed volume, degradation, power cable, self-carrying insulated wire, reliability.

1. Montanari G.C., Fabiani D., Morshuis P., Dissado L. Why residual life estimation and maintenance strategies for electrical insulation systems have to rely upon condition monitoring. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23(3). Pp. 1375-1385. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005613>

2. Zhou C., Chen G. Influences of frequency on space charge formation in polyethylene under high voltage AC electric fields. IEEE Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Toronto, ON, Canada, October 16-19, 2016. Pp. 117-120. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2016.7785572>

3. Choudhary M., Shafiq M., Kiitam I., Hussain A., Palu I., Taklaja P. A Review of Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables. *Energies*. 2022. Vol. 15(9). 3408. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093408>

4. Suraci S.V., Fabiani D., Mazzocchetti L., Giorgini L. Degradation assessment of polyethylene-based material through electrical and chemical-physical analyses. *Energies*. 2020. Vol. 13(3). 650. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13030650>

5. Sekii Y. Charge generation and electrical degradation of cross-linked polyethylene. *IEEE Transaction on Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 14(1). Pp. 4-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/tee.22790>

6. Su J., Du B., Li J., Li Z. Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges. *High Voltage*. 2020. Vol. 5(4). Pp. 353-364. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2020.000>

7. Thomas A.J., Saha T.K. A new dielectric response model for water tree degraded XLPE insulation-part a: model development with small sample verification. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15(4). Pp. 1131-1143. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4591236>

8. Shcherba M.A. Multi-physical processes during electric field disturbance in solid dielectric near water micro-inclusions connected by conductive channels. IEEE 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, June 7-11, 2016. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521842>

9. Shcherba M.A. Modeling of water tree growth between micro-inclusions in XLPE cable isolation and its effect on electric field distribution. IEEE First Ukrainian Conference on *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, May 29 – June 02, 2017. Pp. 417-420. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100530>

10. Shcherba M., Shcherba A., Peretyatko Y. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation. Proc. IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems*. ESS 2020. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. Pp. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>

Надійшла 20.06.2022

Остаточний варіант 29.07.2022

ОЦІНКА ШВИДКОСТІ СТАРІННЯ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ ПІД ДІЄЮ ПЕРИОДИЧНОЇ НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ

О.Д. Подольцев*, докт. техн. наук, М.О. Ломко, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: podol@ied.org.ua

У роботі запропоновано методику оцінки швидкості проростання водних триїнгів у полімерній ізоляції силового кабелю із врахування наявності вищих гармонік напруги. Методика дає змогу прогнозувати строк служби кабелю, що використовується в електромережі із спотвореною формою напруги в залежності від частотного спектру цієї напруги, а також здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір розрахункового значення номінальної напруги кабелю, що залежить від частотного спектру напруги та за якого строк служби кабелю буде такий самий, як і під час роботи у штатному режимі. Задля реалізації цієї методики розроблено комп'ютерну програму в пакеті Matlab/Simulink, яка дає змогу за попередньо визначеною формою спотвореної напруги в електромережі провести відповідні розрахунки та оцінити строк служби ізоляції кабелю. Для розглянутої, як приклад, осцилограми напруги, що характеризується значенням $THD_U = 23,4\%$, показано, що значення відносної швидкості проростання триїнгу дорівнює $V_{Tr} = 1,62$, а строк служби кабелю буде складати 0,62 від його строку служби під час роботи у штатному режимі. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: розподілена генерація, вищі гармоніки напруги, кабельна лінія, полімерна ізоляція, водний триїнг, строк служби силового кабелю.

Вступ. Світовими тенденціями у галузі сучасного розвитку кабельної техніки є застосування високовольтних силових кабелів із ізоляцією зі зшитого поліетилену, вдосконалення способів спорудження кабельних ліній, виконаних на основі таких кабелів, та забезпечення високого рівня техніко-екологічної безпеки кабельних систем [1, 2]. На теперішній час силові кабелі широко застосовуються в системах із розподіленою генерацією електричної енергії, що використовують енергію сонця та вітру. Кабельні лінії, що використовуються в структурі таких систем, під'єднуються до потужних напівпровідникових перетворювачів – інверторів – та забезпечують передавання енергії в енергосистему. Особливістю роботи кабельних ліній в таких системах є наявність періодичної несинусоїдної напруги в лінії [3], що обумовлено роботою інвертора. Отже, наявність вищих гармонік в напрузі, яку прикладено до полімерної ізоляції кабелю, є особливістю роботи кабелів в таких системах. Звідси, вивчення процесів прискореного старіння полімерної ізоляції силових кабелів під дією напруги, що містить вищі гармоніки, є актуальною задачею, враховуючи безперервне зростання обсягу електричної енергії, яка генерується відновлюваними джерелами енергії.

Один із домінуючих механізмів старіння полімерної ізоляції силових кабелів пов'язаний із виникненням водних триїнгів [4, 5]. При цьому переважну більшість досліджень проведено для випадку гармонічної напруги промислової частоти. В той же час вплив вищих гармонік напруги на процес виникнення та проростання водних триїнгів в об'ємі полімерної ізоляції кабелів є недостатньо вивченим. При цьому відомо, що з ростом частоти швидкість проростання таких триїнгів збільшується. Отже можна припустити, що наявність вищих гармонік напруги потенційно призводить до прискореного старіння ізоляції кабелів, що повинно враховуватися на етапі проектування кабельних ліній.

Враховуючи актуальність задачі – попередньої оцінки на етапі проектування строку служби високовольтних кабельних ліній, що використовуються в системах із розподіленою генерацією, **метою** даної роботи є розробка методики, що дає змогу оцінити швидкість проростання водних триїнгів в полімерній ізоляції силового кабелю під дією періодичної несинусоїдної напруги, а також, на основі цих даних, швидкість старіння ізоляції кабелю, спираючись на інформацію щодо попередньо встановленого частотного спектра напруги в системі електроживлення.

Методика розрахунку швидкості проростання водного триїнгу в полімерній ізоляції кабелю. Початковою інформацією для визначення швидкості проростання водного триїнгу є існуюча на практиці форма кривої напруги між жилою та екраном силового кабелю $u(t)$, яка у випадку, що до-

сліджується, є періодичною несинусоїдною функцією. Необхідну інформацію щодо форми напруги можна отримати або за допомогою комп'ютерного розрахунку процесів в системі живлення із кабельною лінією, або за допомогою експериментальних даних у вигляді осцилограм напруги кабелю у діючій лінії. У даній роботі реалізовано саме другий підхід.

Запропонована методика передбачає послідовне виконання наступних етапів.

1. Визначення залежності у часі напруги на кабелі (жила – екран) у вигляді періодичної несинусоїдної функції $u(t)$ та розкладання її у ряд Фур'є

$$u(t) = \operatorname{Re} \sum_{h=1}^H U_h e^{j\omega_0 h t},$$

де H – номер найвищої у спектрі гармоніки, що враховується, який вибирається із попереднього аналізу частотного спектру напруги $u(t)$.

2. Оцінка швидкості проростання водного триїнгу V , виходячи з того, що ця швидкість залежить від час дії синусоїдної напруги від її амплітуди U_m та частоти f (а також інших факторів, які в даній роботі не розглядаються). При цьому залежність швидкості від частоти, згідно стандарту [6], можна апроксимувати наступним чином:

$$V \cong (f / 50)^\alpha, \quad (1)$$

де $\alpha = 0,6 \div 0,7$. В цьому виразі знаком « \cong » позначено пропорційність.

Залежність швидкості проростання водного триїнгу V від амплітуди синусоїдної напруги також приймається як ступенева функція виду

$$V \cong (U_m / U_{ном})^\beta, \quad (2)$$

де $U_{ном}$ – амплітудне значення номінальної напруги для даного кабелю (його паспортне значення). Значення показника ступеня β залежить від багатьох факторів, але в першому наближенні його значення можна визначити із результатів роботи [4], де наведено експериментальні дані щодо довжини триїнга, який зростає із часом за різних значеннях напруги. Ці результати показано на рис. 1, а та за якими на рис. 1, б побудовано залежність довжини триїнга від напруги у момент часу 6 годин. Із апроксимації цієї залежності отримуємо значення показника $\beta \approx 1,5$.

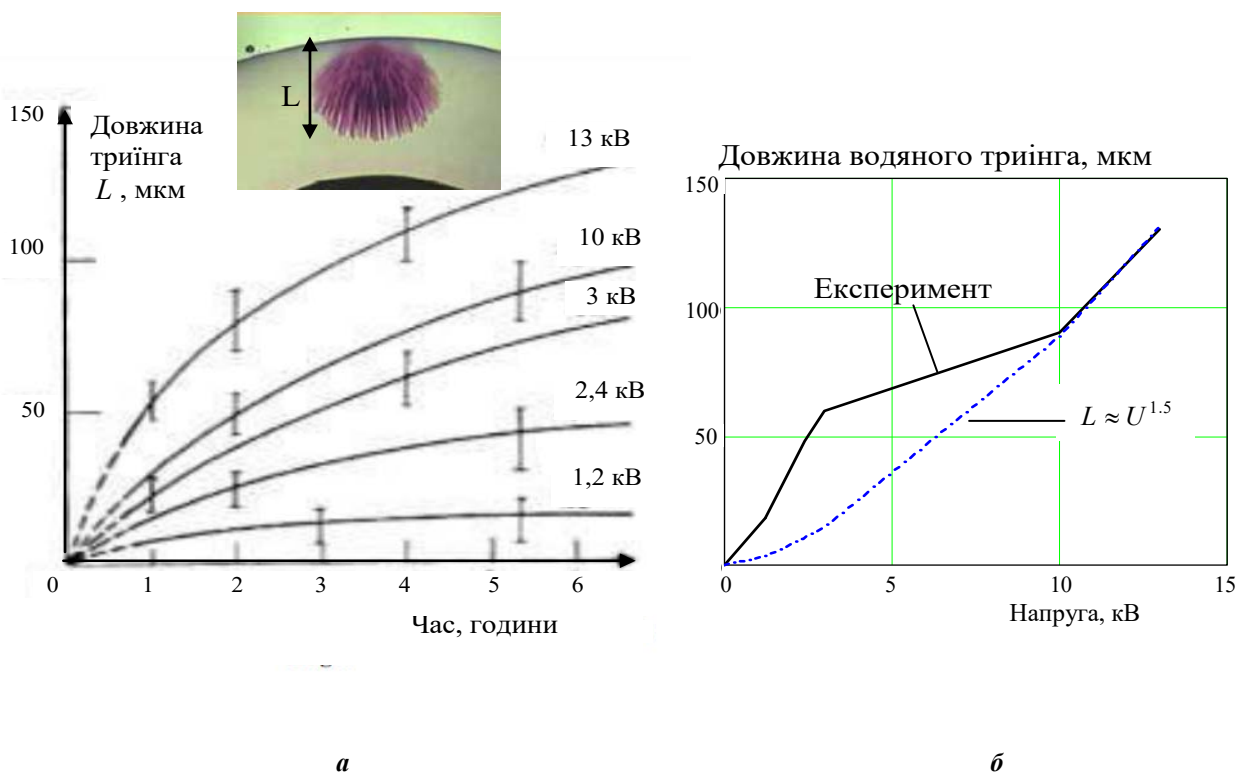


Рис. 1

3. Маючи окремо залежність швидкості V від частоти (вираз (1)) та від напруги (вираз (2)), в роботі припускається, що узагальнену залежність швидкості проростання водного триїнгу V для синусоїдної напруги та з врахуванням цих виразів можна записати як

$$V = K(f / 50)^\alpha (U_m / U_{ном})^\beta, \quad (3)$$

де K – розмірний масштабний коефіцієнт, що дорівнює швидкості при частоті 50 Гц та номінальній напрузі.

Згідно з (3), якщо на ізоляцію діє гармоніка напруги із номером $h = 1, 2, \dots, H$, що має частоту $f \cdot h$ та напругу u_h , то під дією такої гармоніки в цій ізоляції буде проростати триїнг зі швидкістю

$$V_h = K(fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta.$$

4. На наступному етапі припускається, що за одночасного впливу всіх гармонік напруги загальна швидкість руху триїнгу дорівнює сумі швидкостей по всім гармонікам, тобто ця швидкість розраховується як

$$\sum_h V_h = \sum_h K(fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta.$$

Таке припущення спирається на найпростіший механізм адитивної дії гармонік, і його справедливості планується перевірити у подальших експериментальних дослідженнях.

Далі вводиться поняття відносної швидкості проростання водного триїнгу

$$V_{Tr} = \sum_h V_h / V_0 = \sum_h (fh / 50)^\alpha (U_h / U_{ном})^\beta, \quad (4)$$

де $V_0 = K$ – швидкість проростання триїнгу за синусоїдної напруги із частотою $f = 50$ Гц та напрузі, що дорівнює номінальній. Отримане значення (4) для оцінки інтегральної швидкості проростання триїнгу в ізоляції дає змогу, маючи спектральний склад напруги та знаючи паспортне значення напруги кабелю $U_{ном}$, оцінити величину V_{Tr} .

Далі, припускаючи, що старіння ізоляції кабелю здійснюється переважно внаслідок виникнення та проростання водних триїнгів, вводиться поняття відносного значення часу старіння полімерної ізоляції кабелю

$$\tau_{Tr} = 1 / V_{Tr}, \quad (5)$$

тобто відношення часу старіння ізоляції через дію вищих гармонік до часу старіння через дію тільки першої гармоніки із амплітудним номінальним значенням напруги $U_{ном}$. Розрахунок введених величин V_{Tr} за виразом (4) та τ_{Tr} за виразом (5) є головним результатом застосування даної методики.

Результати комп'ютерних розрахунків. У роботі використовувалися осцилограми напруги на підземній кабельній лінії напругою 110 кВ. Ці осцилограми оцифровувалися і у вигляді таблиці використовувалися потім в розробленій Simulink-моделі – блок 1 на рис. 2, а. Далі ця напруга розкладалася в ряд Фур'є, при цьому вибиралося 20 перших гармонік напруги (див. блок 2, структуру якого показано на рис. 2, б), і проводився розрахунок значень V_{Tr} та τ_{Tr} , використовуючи, відповідно, вирази (4) та (5).

На рис. 3 наведено один із варіантів форми напруги на вході кабельній лінії та її частотний спектр. Розрахункове значення коефіцієнта гармонік складає $THD_U = 23,4\%$. Для напруги такої форми розраховане значення відносної швидкості V_{Tr} за умови $U_{ном} = U_1$ дорівнює 1,62. Припускаючи, що наявність триїнгів є домінуючим механізмом старіння ізоляції кабелю, можна стверджувати, що внаслідок дії вищих гармонік напруги строк служби кабелю буде знижено відповідно у 1,62 раз, тобто величина $\tau_{Tr} = 1/1,62 = 0,62$ і складає 0,62 від часу старіння ізоляції кабелю, що працює у штатному режимі.

Відомо, що якщо вибрати кабель з більш високою номінальною напругою $U_{ном}$, то його строк служби через роботу в зазначених умовах збільшиться. Для кількісної оцінки цього фактору проводилися розрахунки значення швидкості V_{Tr} за різних відносних значеннях розрахункової номінальної напруги кабелю $U_{ном} / U_1$ – результати наведено на рис. 4. З наведених результатів видно, що у разі збільшення розрахункової номінальної напруги до значення $U_{ном} / U_1 = 1,4$ величина $V_{Tr} = 1$ та строк служби кабелю буде таким, як і у штатному режимі його роботи (але при цьому збільшується вартість кабелю за рахунок збільшення товщини його ізоляції).

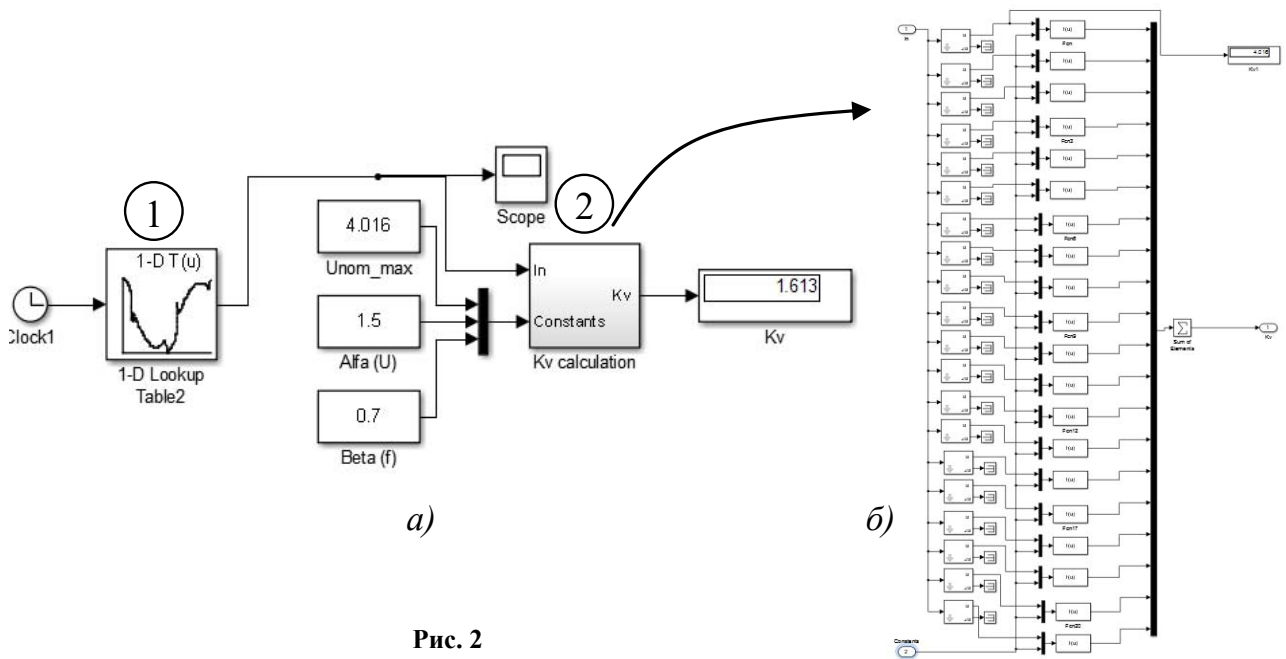


Рис. 2

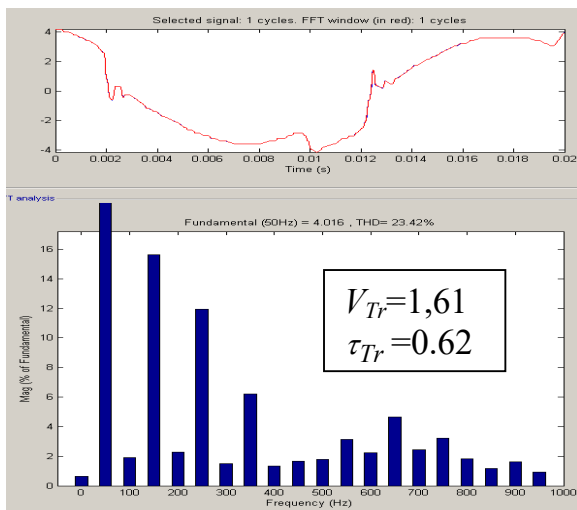


Рис. 3

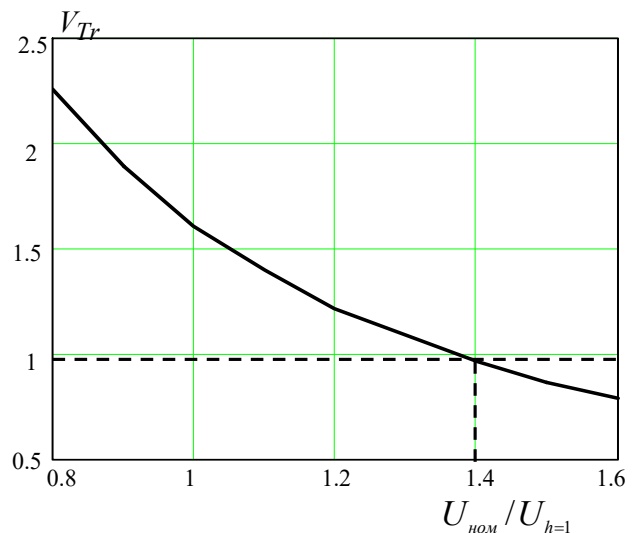


Рис. 4

Таким чином, описана методика дає змогу, по-перше, прогнозувати строк служби кабелю, що вже використовується в лінії, в залежності від частотного спектру напруги на ньому та розраховувати для цього спектру значення V_{Tr} і τ_{Tr} , та, по-друге, здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір такого розрахункового значення номінальної напруги кабелю (що залежить від частотного спектру напруги в електромережі), за якого значення швидкості буде дорівнювати $V_{Tr}=1$, тобто строк його служби буде такий ж самий, як і під час роботи у штатному режимі.

Висновки. 1. У роботі запропоновано методику оцінки швидкості проростання водних триїнів у полімерній ізоляції силового кабелю із врахування наявності вищих гармонік напруги. Методика дає змогу прогнозувати строк служби кабелю, що вже використовується в електромережі, в залежності від частотному спектру напруги на ньому, а також здійснювати на етапі проектування кабельної лінії вибір розрахункового значення номінальної напруги кабелю, яке буде залежати від частотного спектру напруги в електромережі та за якого строк служби кабелю буде дорівнювати цьому показнику у штатному режимі роботи.

2. Задля реалізації цієї методики розроблено комп'ютерну програму в пакеті Matlab/Simulink, що дає змогу за попередньо визначеною формою спотвореної напруги в електромережі, де розміщено

кабельну лінію (ця форма може бути задана у вигляді, наприклад, pdf-файлу), провести відповідні розрахунки та оцінити строк служби ізоляції кабелю, що знаходиться під дією цієї напруги. Для розглянутої як приклад осцилограми напруги, що характеризується значенням $THD_U = 23,4\%$, показано, що значення відносної швидкості проростання триїнгу дорівнює $V_{Tr} = 1,62$, а строк служби кабелю буде складати 0,62 від його строку служби під час роботи у штатному режимі.

Роботу виконано за рахунок бюджетної теми "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541030.

1. Peschke E., Von Olshausen R. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. MCD Verlag, 1999. 296 p.
2. 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.
3. F.C. De La Rosa. Harmonics, Power Systems, and Smart Grids. CRC Press, 2015, 274 p.
4. Jaghannath K. Water treeing in polyethylene cables. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2017. Vol. 5. Issue 1. Pp. 51-60.
5. Dissado L.A., Fothengill J.C. Electric Degradation and Breakdown in Polymers. The Institute of Engineering and Technology, 2008. 624 p.
6. D6097-16. Standard Test Method for Relative Resistance to Vented Water-Tree Growth in Solid Dielectric Insulating Materials. 2016.

EVALUATION OF THE AGING RATE OF POLYMER INSULATION OF POWER CABLE UNDER THE ACTION OF PERIODIC NON-SINUSOIDAL VOLTAGE

O.D. Podoltsev, M.O. Lomko

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

E-mail: podol@ied.org.ua

The paper proposes a method for estimating the rate of water treeing growth in the polymer insulation of the power cable, taking into account the presence of higher voltage harmonics. The technique allows to predict the service life of a cable used in a power grid with a distorted voltage, depending on the frequency spectrum of this voltage, as well as to select at the design stage of the cable line the calculated value of the nominal voltage of the cable the service life of the cable will be the same as when operating normally. To implement this technique, a computer program in the Matlab/Simulink package has been developed, which allows to perform appropriate calculations and estimate the service life of the cable insulation according to a predetermined form of distorted voltage in the power grid. For the voltage oscillogram considered as an example, characterized by the value of $THD_U = 23.4\%$, it is shown that the value of the relative water treeing growth is equal 1.62, and the service life of the cable will be 0.62 of its service life when operating normally. References 6, figures 4.

Key words: distributed generation, higher voltage harmonics, polymer insulation, water treeing, power cable life.

1. Peschke E., Von Olshausen R. Cable Systems for High and Extra-High Voltage. MCD Verlag, 1999, 296 p.
2. Shidlovski A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kuchertava I.M. Ultra-high voltage polymer insulated cables. Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
3. F.C. De La Rosa. Harmonics, Power Systems, and Smart Grids. CRC Press, 2015. 274 p.
4. Jaghannath K. Water treeing in polyethylene cables. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2017. Vol. 5. Issue1. Pp. 51-60.
5. Dissado L.A., Fothengill J.C. Electric Degradation and Breakdown in Polymers. The Institute of Engineering and Technology, 2008. 624 p.
6. D6097-16. Standard Test Method for Relative Resistance to Vented Water-Tree Growth in Solid Dielectric Insulating Materials.

Надійшла 30.06.2022
Остаточний варіант 12.09.2022

**АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ
НА НАКОПИЧУВАЛЬНОМУ КОНДЕНСАТОРІ ТРИФАЗНОГО
ПАРАЛЕЛЬНОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА**

Т.В. Мисак*, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: taras@igbt.com.ua

Об'єктом дослідження є трифазний паралельний активний фільтр, який складається з дворівневого інвертора напруги, ємнісного накопичувача та притлумлюючої RL-ланки. Декомпозиція об'єкта за темпами рухів динамічної системи дає змогу розділити цю систему на дві підсистеми, зв'язані між собою за керуванням. Розглядається вплив динамічних характеристик низькочастотного фільтра, який виконує роль підсистеми зв'язку між контуром стабілізації напруги на конденсаторі накопичувача трифазного паралельного активного фільтра та контурами формування компенсаційного струму, на стійкість системи. Формування компенсаційного струму здійснюється за допомогою примусового введення ковзних режимів першого порядку. Математичну модель підсистеми стабілізації напруги на конденсаторі побудовано із застосуванням вектора еквівалентного керування за припущення існування ковзного режиму при формуванні компенсаційного струму. Аналіз стійкості системи стабілізації напруги під час застосування низькочастотного фільтра другого порядку проводиться за першим наближенням. Для цього використовується характеристичне рівняння замкненої системи, для якої будується інтервальний характеристичний поліном, теорема Харитонова та метод Рауса-Гурвіца для сімейства цих поліномів. Задля підтвердження теоретичних припущень побудовано імітаційну модель та проаналізовано результати цифрового моделювання. Бібл. 9, рис. 1.

Ключові слова: паралельний активний фільтр, ковзний режим, низькочастотний фільтр, стійкість, інтервальний поліном, характеристичне рівняння.

Вступ. Паралельні активні фільтри (ПАФ) небезпідставно вважаються одним з найбільш ефективних засобів боротьби з негативним впливом нелінійних навантажень на показники якості електроенергії мережі споживача. Вирішенню задач керування ПАФ продовжує присвячуватися достатньо велика кількість публікацій. Оскільки ПАФ, беззаперечно, слід відносити до класу складних систем, для керування ним широко застосовуються різноманітні методи та їхні комбінації. Це, в свою чергу, призводить до виникнення проблеми взаємодії різних підсистем, наявних у складі ПАФ. Спроби з'ясувати рівень впливу структури та параметрів контуру формування напруги накопичувача на стійкість системи в цілому, які можна знайти в роботах [1, 2], підтверджують, що застосування передавальних функцій низького порядку радше дає змогу виокремити проблему, аніж її дослідити.

Математична модель ПАФ. Силова частина ПАФ може бути описана за допомогою широко вживаної системи диференціальних рівнянь (СДР) у синхронній системі координат $d-q$, яка обертається з кутовою швидкістю ω

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f L_f^{-1} & \omega & L_f^{-1} u_d \\ -\omega & -R_f L_f^{-1} & L_f^{-1} u_q \\ C_{dc}^{-1} u_d & C_{dc}^{-1} u_q & R_{dc}^{-1} C_{dc}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} U_{gd} \\ U_{gq} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $I_{fd,q}$ – компоненти двовимірного вектора компенсаційного струму; $U_{gd,q}$ – компоненти двовимірного вектора напруги мережі живлення; $R_f=R_d=R_q$, $L_f=L_d=L_q$ – активний опір та індуктивність RL -фільтра інвертора ПАФ; U_{dc} – постійна напруга на конденсаторі накопичувача; R_{dc} , C_{dc} – активний опір, який враховує втрати та ємність конденсатора накопичувача; ω – кутова частота напруги мережі; $u_{d,q}$ – розривні компоненти двовимірного вектора керування.

В системі з одноланковим RL -фільтром достатньо використовувати тільки відхилення вихідної координати від завдання, щоб забезпечити бажаний характер руху зображуючої точки за рахунок ковзних режимів. Якщо вибирати критеріями якості точність формування компенсаційного струму та

швидкодію, двовимірний похибка керування відповідатиме виразом

$$\begin{bmatrix} \delta_d \\ \delta_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{refd} \\ I_{refq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де I_{ref} – двовимірний вектор бажаного струму.

Вибравши поверхнями ковзання $S=\delta$ та вважаючи, що вектор збурень належить просторові керування, можна стверджувати, що на перетині цих поверхонь виникне ковзний режим першого порядку, якщо компоненти вектора керування СДР (1) визначатимуться виразами $u_{d,q} = \text{sign}(S_{d,q})$.

Умови існування ковзного режиму на перетині поверхонь ковзання S можна визначити за допомогою другого метода Ляпунова, вибравши скалярну функцію V у вигляді суми квадратів компонент $S_{d,q}$ [3], та забезпечити за допомогою $u_{d,q}$ виконання нерівності $dV/dt < 0$, записаної на підставі двох перших рівнянь СДР (1). Записавши нерівність для похідної $dV/dt < 0$ покомпонентно [4], матимемо

$$\begin{cases} S_d \dot{S}_d < 0 \\ S_q \dot{S}_q < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -S_d \omega I_{fq} + S_d (R_f L_f^{-1} + \dot{I}_{refd}) + S_d L_f^{-1} U_{gd} < S_d L_f^{-1} U_{dc} u_d, \\ S_q \omega I_{fd} + S_q (R_f L_f^{-1} + \dot{I}_{refq}) + S_d L_f^{-1} U_{gq} < S_q L_f^{-1} U_{dc} u_q, \end{cases} \quad (3)$$

що дасть можливість оцінити величину U_{dc} , яка забезпечить існування та стійкість ковзного режиму на перетині поверхонь ковзання $S=\delta=0$, за допомогою виразу

$$U_{dc} > L_f \max \left\{ \left(-\omega I_{fq} + R_f L_f^{-1} I_d + \dot{I}_{refd} \right), \left(\omega I_{fd} + R_f L_f^{-1} I_q + \dot{I}_{refq} \right) \right\} + |U_g|. \quad (4)$$

Вектор еквівалентного керування u_{eq} можна визначити, розв'язавши рівняння $dS/dt=0$ відносно компонент вектора керування $u_{d,q}$ на підставі двох перших рівнянь СДР (1) наступним чином:

$$\begin{bmatrix} u_{eqd} \\ u_{eqq} \end{bmatrix} = \frac{L_f}{U_{dc}} \left(\begin{bmatrix} R_f L_f^{-1} & -\omega \\ \omega & R_f L_f^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} U_{gd} \\ U_{gq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{refd} \\ I_{refq} \end{bmatrix} \right). \quad (5)$$

Для стабілізації належного рівня напруги $U_{dc} = U_{dcref}$ на конденсаторі накопичувача (виконання умови (4) в робочій області) застосуємо традиційний ПІ-регулятор [4]

$$\frac{\Delta i_{ref}}{\delta U} = k_i p^{-1} + k_p \quad (6)$$

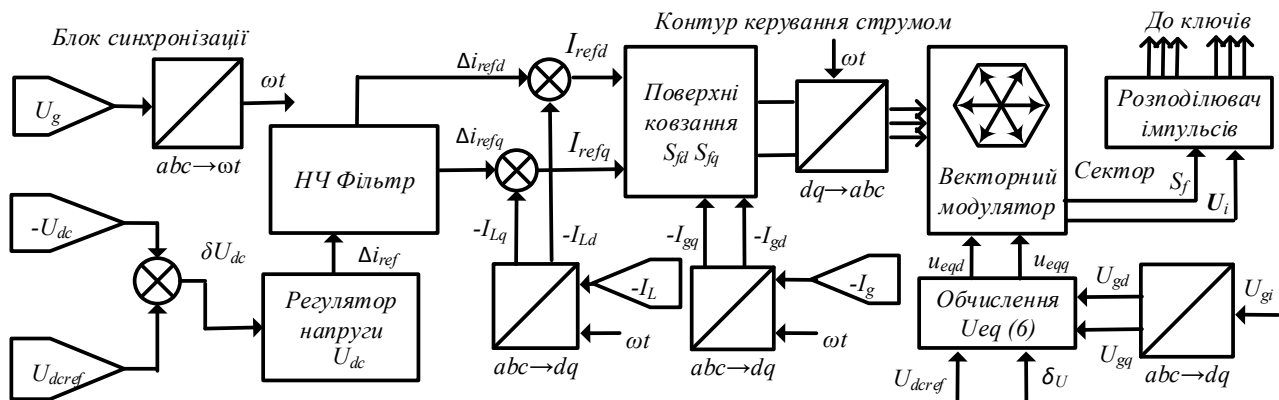
з коефіцієнтами k_i (інтегральний) та k_p (пропорційний), залежність яких від інших параметрів ПАФ буде визначено нижче, для чого введемо похибку стабілізації напруги звичним чином

$$\delta U = U_{dcref} - U_{dc}. \quad (7)$$

де U_{dcref} – референсна величина U_{dc} , яка є безумовно необхідною для виконання (4).

Оскільки напруга U_{dc} має, окрім постійної складової, деякий рівень пульсацій, на I_{refd} накладається гармонічний сигнал, який вносить шкідливі спотворення. Амплітуда паразитного гармонічного струму пропорційна коефіцієнту k_p вибраного ПІ-регулятора та пульсації напруги U_{dc} . Існує два різних способи позбутися цієї проблеми: перший – використовувати невеликі значення коефіцієнтів k_i та k_p , другий – притлумити пульсації власне в похибці керування. Як наслідок, занадто низькі коефіцієнти підсилення в ланцюзі зворотнього зв'язку призводять до затягування перехідного процесу та відчутному послабленню притлумлення збурень. Можливим (проте не дуже бажаним з огляду на суттєве збільшення масо-габаритних показників ПАФ) варіантом є збільшення ємності конденсатора C_{dc} . Більш прийнятним є варіант використання фільтра нижніх частот (ФНЧ або LPF – *Low Pass Filter* в англійській термінології) з наперед розрахованою передавальною характеристикою $H(p)$ для обробки сигналу похибки δU . ФНЧ здатен зменшити непотрібний гармонічний струм, який накладається на компенсаційний струм, та зберегти необхідні характеристики компенсації гармонік в усталених режимах [5, 6].

Розглянемо блок-схему системи керування ПАФ (рисунок). Схема генератора опорного струму в синхронному координатному базисі dq використовується для отримання референсних сигналів струму фільтра активної потужності [7]. Ця схема забезпечує швидке та точне відстеження сигналу завдання. Її характеристики дають змогу уникнути коливаний напруги, які погіршують поточний опорний сигнал та негативно впливають на якість компенсації. Опорні сигнали струму I_{refd} , I_{refq} отримують з відповідних струмів навантаження $I_{L,abc}$, як показано на рисунку.



Вимоги до схеми генератора опорного сигналу є суперечливими. З одного боку, ФНЧ мусить вносити мінімальний вплив власною динамікою для отримання максимальної швидкодії ПАФ, з іншого – максимально обмежувати смугу пропускання системи задля мінімізації впливу шкідливих складових струму завдання на ТНД. Ця суперечливість змушує шукати компромісний варіант між наведеними вище вимогами, оскільки має бути забезпечена стійкість замкненої системи.

Використання передавальних функцій другого порядку у вигляді $W(p) = U_{dc} / U_{dcref}$ та припущення щодо повної незалежності систем стабілізації напруги та формування компенсаційного струму, яке має місце в роботах [4, 5], не дає можливості навіть наближено оцінити стійкість замкненої системи. Оскільки в цьому випадку жодним чином не враховується як нелінійність по керуванню, так і наявність навіть найпростішого ФНЧ.

Постановка задачі. Для визначення показників стійкості перейдемо до системи рівнянь, якою можна описати замкнену підсистему стабілізації напруги з ПІ-регулятором (6). Виходячи з того, що величину похідної $d\delta_U/dt$ можна виміряти в схемі безпосередньо

$$\frac{d\delta_U}{dt} = \frac{dU_{ref}}{dt} - \frac{dU_{dc}}{dt} = -I_{Cdc}, \quad (8)$$

виберемо в якості ФНЧ поліноміальний фільтр другого порядку з передавальною характеристикою

$$W(p) = \frac{\delta_{LPF}}{\delta_U} = \frac{k_0 + k_1 p}{c_2 p^2 + c_1 p + c_0}, \quad (9)$$

де $k_0, k_1, c_0, \dots, c_2$ – коефіцієнти налаштування, які в першу чергу залежать від ω .

Якщо перейти від передавальних функцій до диференціальних рівнянь, з урахуванням (6), (7), підсистему стабілізації напруги можна переписати в такому вигляді

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c_0/c_2 & -c_1/c_2 & 0 & 0 \\ k_i & k_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{dc}^{-1} C_{dc}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\delta_U (k_0 + k_1 p) / c_2 \\ 0 \\ C_{dc}^{-1} I_{Cdc} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Мета роботи полягає в тому, щоб визначити вплив параметрів налаштування СК та допустимих величин навантаження на стійкість підсистеми стабілізації напруги на конденсаторі накопичувача ПАФ, в якій застосовується фільтр низького порядку.

Розв'язок. Застосування принципу декомпозиції дає змогу розглянути рівняння (8) з урахуванням останнього рівняння з СДР (1) у вигляді

$$\frac{d\delta_U}{dt} = \frac{dU_{ref}}{dt} - \frac{dU_{dc}}{dt} = 0 - C_{dc}^{-1} (I_{fd} u_d + I_{fq} u_q) + U_{dc} C_{dc}^{-1} R_{dc}^{-1}. \quad (11)$$

Припустимо, що умови (4) виконуються, а в СДР (3) має місце ковзний режим на перетині поверхонь $S=0$. Це дозволяє замінити в (11) компоненти вектора струму I_f на I_{ref} , а вектор керування з розривними компонентами u_d, u_q на вектор еквівалентного керування u_{eq} .

Розклавши змінну $1/U_{dc}$ в (5) в ряд по ступенях δ_U та згрупувавши змінні, матимемо

$$\frac{d\delta_U}{dt} = a_{11} \delta_{LPF} + a_{12} x_1 + a_{13} \Delta i_{ref} + a_{14} \delta_U + \varphi_1 (\delta_{LPF}, x_1, \Delta i_{ref}, \delta_U) + F_2(t) + F_3(t),$$

де

$$a_0 = -C_{dc}^{-1}U_{dcref}^{-1}, a_{11} = a_0L_fk_iI_{Ld}, a_{12} = a_0L_fk_pI_{Ld}, a_{13} = a_0\left(2I_{Ld}R_f + U_{gd} + L_f\frac{dI_{Ld}}{dt}\right), a_{14} = b_1 - C_{dc}^{-1}R_{dc}^{-1},$$

$$b_1 = \frac{a_0}{U_{dcref}}\left(R_f(I_{Ld}^2 + I_{Lq}^2) + I_{Ld}U_{gd} + U_{gq}I_{Lq}\right), F_2(t) = U_{dcref}C_{dc}^{-1}R_{dc}^{-1}, F_3(t) = b_1\left(\left(\frac{\delta_U}{U_{dcref}}\right)^2 + \dots\right),$$

$$\varphi_1(\delta_{LPF}, x_1, \Delta i_{ref}, \delta_U) = -\frac{C_{dc}^{-1}}{U_{dcref}}\left(R_f\Delta i_{ref}^2 + L_f\Delta i_{ref}(k_p\delta_{LPF} + k_ix_1)\right)f_1(\delta_U) +$$

$$+\left(a_1(t)\delta_{LPF} + a_2(t)x_1 + a_3(t)\Delta i_{ref}\right)(f_1(\delta_U) - 1), f_1(\delta_U) = \left(1 + \delta_U/U_{dcref} + (\delta_U/U_{dcref})^2 + \dots\right).$$

З урахуванням наведеного вище, СДР (10) можна записати у вигляді

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ \delta_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ (-c_0 + k_1a_{11})/c_2 & (-c_1 + k_1a_{12})/c_2 & k_1a_{13}/c_2 & (k_0 + k_1a_{14})/c_2 \\ k_i & k_p & 0 & 0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ \delta_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_1(\varphi_1 + F_2 + F_3) \\ 0 \\ \varphi_1 + F_2 + F_3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де функції φ_1 та F_3 є ступеневими рядами по змінних, які починаються з членів 2-го порядку.

Виходячи зі структури СДР (12), можна зробити висновок – навіть при найпростішому вигляді еквівалентного керування має місце доволі складна неоднорідна нелінійна СДР 4-го порядку. Рівняння першого наближення для СДР (12) матимуть вигляд

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ \delta_U \end{bmatrix} = [A]\begin{bmatrix} \delta_{LPF} \\ x_1 \\ \Delta i_{ref} \\ \delta_U \end{bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ (-c_0 + k_1a_{11})/c_2 & (-c_1 + k_1a_{12})/c_2 & k_1a_{13}/c_2 & (k_0 + k_1a_{14})/c_2 \\ k_i & k_p & 0 & 0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

Коефіцієнти матриці $[A]$ (13) мають бути неперервними та обмеженими для всіх $t > 0$, що накладає відповідні обмеження на компоненти струмів навантаження та напруги мережі живлення. Зауважимо, що коефіцієнти характеристичного рівняння залежать від компонент струмів нелінійного навантаження та напруг мережі споживача. Тому оцінити вплив параметрів $k_0, k_1, c_0, \dots, c_2$ з (9) на стійкість можна лише поблизу екілібріуму (точки рівноваги).

Задля отримання характеристичного рівняння однорідної СДР (13) введемо позначення $c_{21} = (-c_0 + k_1a_{11})/c_2, c_{22} = (-c_1 + k_1a_{12})/c_2, c_{23} = k_1a_{13}/c_2, c_{24} = (k_0 + k_1a_{14})/c_2, c_{31} = -k_p, c_{32} = -k_i, c_{4n} = a_{1n}$, що дасть можливість записати характеристичний поліном $M(\lambda)$ у вигляді

$$M(\lambda) = \lambda^4 + d_1\lambda^3 + d_2\lambda^2 + d_3\lambda + d_4, \quad (14)$$

$$d_1 = -c_{22} - c_{44}, d_2 = -c_{21} - c_{32}c_{23} + c_{22}c_{44} - c_{42}c_{24}, d_3 = -c_{41}c_{24} + c_{21}c_{44} - c_{31}c_{23} + c_{32}c_{23}c_{44}, d_4 = c_{31}c_{43}c_{24}$$

Дійсні частини всіх коренів характеристичного рівняння є від'ємними тоді і тільки тоді, коли $d_k > 0$ ($k=1, \dots, 4$), а також є додатними головний визначник H та всі головні діагональні мінори матриці Гурвіца

$$[H] = \begin{bmatrix} d_1 & d_3 & 0 & 0 \\ 1 & d_2 & d_4 & 0 \\ 0 & d_1 & d_3 & 0 \\ 0 & 1 & d_2 & d_4 \end{bmatrix}, H_1 = d_1, H_2 = \begin{bmatrix} d_1 & d_3 \\ 1 & d_2 \end{bmatrix}, H_3 = \begin{bmatrix} d_1 & d_3 & 0 \\ 1 & d_2 & d_4 \\ 0 & d_1 & d_3 \end{bmatrix}.$$

Зауважимо, що коефіцієнти d залежать від параметрів системи, які є відомими наперед константами, та від параметрів, обумовлених нелінійним навантаженням, про яке відомо лише те, що I_{Ld}, I_{Lq} є в загальному вигляді неперервними та обмеженими функціями, які також мають обмежені похідні. Тому можемо вважати, що апіорі відомо, що коефіцієнти d характеристичного рівняння $M(\lambda) = 0$ належать деяким відрізкам

$$d_1 \in [\zeta_{11}, \zeta_{12}], \quad d_2 \in [\zeta_{21}, \zeta_{22}], \quad d_3 \in [\zeta_{31}, \zeta_{32}], \quad d_4 \in [\zeta_{41}, \zeta_{42}], \quad (15)$$

де $\zeta_{jk}, \{j, k\} = \{1, \dots, 4, 1, \dots, 2\}$ – константи, які визначаються межами робочої області ПАФ та можуть бути обчисленими.

Отже, (14) є множиною інтервальних характеристичних поліномів. Такий поліном вважається асимптотично стійким [8], якщо його корені за будь-яких $d_k, k=1, \dots, 4$, що задовольняють умовам (15),

лежать в лівій півплощині комплексної площини. В загальному випадку за незалежних коефіцієнтах d , згідно теоремі Харитонова, перевірки би підлягали 2^4 «кутових поліномів» [9]. Проте в нашому випадку для аналізу впливу параметрів налаштування ФНЧ на керування ПАФ дослідженню підлягає залежність стійкості лише від двох невідомих c_0/c_2 та c_1/c_2 , які, в свою чергу, належать двом відрізкам $\rightarrow C_{01}=[\min c_0/c_2, \max c_0/c_2]$, $C_{02}=[\min c_1/c_2, \max c_1/c_2]$. Тому для перевірки асимптотичної стійкості достатньо застосувати критерій Рауса-Гурвіца до (14) за чотирьох комбінаціях коефіцієнтів d_k , обчисливши їх в точках: $\{\min c_0/c_2, \min c_1/c_2\}$, $\{\min c_0/c_2, \max c_1/c_2\}$, $\{\max c_0/c_2, \min c_1/c_2\}$, $\{\max c_0/c_2, \max c_1/c_2\}$ і впевнитись, що в цих точках будуть додатні всі головні діагональні мінори матриці Гурвіца. Система буде знаходитися на межі стійкості, якщо $[H]=0$, а всі діагональні мінори Гурвіца додатні.

У випадку $d_4=0$ система знаходиться на межі аперіодичної стійкості (нейтральна стійкість). Якщо в даному випадку розв'язати характеристичне рівняння, то отримаємо один корінь нульовий, а другий від'ємний. Випадок $[H_3]=0$ свідчить, що система знаходиться на коливальній межі стійкості. При розв'язанні відповідного характеристичного рівняння отримаємо два спряжених комплексних кореня.

Задля перевірки належного функціонування системи за умов, які враховують динамічні неідеальності, використано параметри з розробленої в [2] імітаційної моделі системи з ПАФ. За налаштувань ПІ-регулятора $k_i=2\omega C_{dc}$, $k_r=\omega^2 C_{dc}/8$ ($C_{dc}=3300$ uF, $L_f=1.8$ мН, $R_f=70$ мOhm та стандартній мережі) границя стійкості досягалася системою з типовим НЧ фільтром (9) при $k_0=(2.2\omega)^2$, $k_1=0$, $c_0=k_0$, $c_1=\sqrt{2}\omega$, $c_2=1$. Якщо ж прийняти $k_1=4 C_{dc}$, то границя стійкості в режимі, близького до ХХ, зміщувалася вправо по осі частот від 2.2ω до рівня 2.4ω . Моделювання також показало, що межі стійкості є досить чутливими до зміни налаштувань атенюації (коефіцієнт притлумлення c_1).

Висновки. Підтверджено теоретичне припущення, що має місце явна залежність стійкості керування ПАФ від динамічних властивостей підсистеми зв'язку, яка являє собою ФНЧ. У разі використання поліноміального фільтра другого порядку для аналізу цього впливу достатньо використати два співвідношення коефіцієнтів з налаштування ФНЧ замість усіх чотирьох. Такий підхід добре узгоджується з процесом проектування ФНЧ в підсистемі стабілізації напруги на конденсаторі накопичувача, за якого беруться до уваги частота зрізу та рівень притлумлення (атенюація) та дає змогу полегшити пошук компромісу.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка наукових основ та принципів побудови напівпровідникових перетворювачів з розширеними функціональними можливостями і методів керування ними в системах з джерелами розосередженої генерації» (шифр «АДАПТЕР»), державний реєстраційний номер 0120U002005 (КПКВК 6541030).

1. Wang Yu, Xie Yun-Xiang, Liu Xiang. Analysis and Design of DC-link Voltage Controller in Shunt Active Power Filter. *Journal of Power Electronics*. 2015. Vol. 15. No 3. Pp. 763-77. DOI: <https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.3.763>

2. Денисенко К.І., Лесик В.О., Мисак Т.В. Вплив фільтра в каналі керування контуром стабілізації напруги накопичувального конденсатора на динаміку трифазного паралельного активного фільтра. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. Вип. 58. С. 55-65. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.055>.

3. Mendalek N., Al-Haddad K., Fnaiech F., Dessaint L.A. Sliding mode control of 3-phase shunt active filter in the d-q frame. *IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Cairns, QLD, Australia, June 23-27, 2002. Vol. 1. Pp. 369-375. DOI: <https://doi.org/10.1109/PSEC.2002.1023896>.

4. Imam Amir A., Kumar R. Sreerama, Al-Turki Yusuf A. Modeling and Simulation of a PI Controlled Shunt Active Power Filter for Power Quality Enhancement Based on P-Q Theory. *Electronics*. 2020. Vol. 9. No 4: 637. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9040637>

5. Mannen T., Fujita H. A DC Capacitor Voltage Control Method for Active Power Filters Using Modified Reference Including the Theoretically Derived Voltage Ripple. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 4179-4187. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2574854>.

6. Ягуп Е.В. Силовой активный фильтр со стабилизацией напряжения на накопительном конденсаторе по дискретам с помощью поисковой оптимизации. *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт*. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность: темат. вып. 2017. Вып. 27 (1249). С. 226-229.

7. Morán L., Dixon J., Torres M. 41 – Active Power Filters. *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann. 2018. Pp. 1341-1379. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00046-5>.

8. Харитонов В.Л. Об асимптотической устойчивости положения равновесия семейства систем линейных дифференциальных уравнений. *Дифференциальные уравнения*. 1978. Т. 14. № 11. С. 2086–2088.

9. Шатирко А.В., Хусаинов Д.Я. Стийкість нелінійних систем з післядією. К.: ДП Інформаційно-аналітичне агентство, 2012. 74с.

STABILITY ANALYSIS OF THE VOLTAGE STABILIZATION SYSTEM ON THE STORAGE CAPACITOR OF THE THREE-PHASE SHUNT ACTIVE FILTER

T.V. Mysak

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: taras@igbt.com.ua

The object of the study is a three-phase shunt active power filter, which consists of a two-level voltage inverter, a capacitive storage device and a damping RL-link. Decomposition of the object of study according to the rate of motion of a dynamic system makes it possible to divide this system into two subsystems, interconnected by control. The influence of the dynamic characteristics of the low-pass filter, which acts as a subsystem of communication between the voltage stabilization circuit on the capacitor of the three-phase shunt active power filter and the circuits of compensating current, on the stability of the system is considered. The formation of the compensation current is carried out by forcing the introduction of sliding modes of the first order. The mathematical model of the voltage stabilization subsystem on the capacitor using the vector of the equivalent control under the assumption of the existence of a sliding mode in the formation of the compensation current was built. The analysis of the stability of the voltage stabilization system using a low-pass filter of the second order on the first approximation was performed. To do this, the characteristic equation of a closed system for which an interval characteristic polynomial was constructed, the Kharitonov theorem, and the Rauss-Hurwitz method for a family of these polynomials was used. To confirm the theoretical assumptions, a simulation model was built and the results of digital modeling were analyzed. References 9, figure 1.

Keywords: shunt active power filter, sliding mode, low-pass filter, stability, interval polynomial, characteristic equation.

1. Wang Yu, Xie Yun-Xiang, Liu Xiang. Analysis and Design of DC-link Voltage Controller in Shunt Active Power Filter. *Journal of Power Electronics*. 2015. Vol. 15. No 3. Pp. 763–77. DOI: <https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.3.763>

2. Denisenko K.I., Lesik V.O., Mysak T.V. Influence of the Filter in the Control Channel of the Accumulation Capacitor Voltage Stabilization Circuit on the Dynamics of the Three-Phase Parallel Active Active Filter. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Vyp. 58. Pp. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.055> (Ukr)

3. Mendalek N., Al-Haddad K., Fnaiech F., Dessaint L.A. Sliding mode control of 3-phase shunt active filter in the d-q frame. *IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Cairns, QLD, Australia, June 23-27, 2002. Vol. 1. Pp. 369–375. DOI: <https://doi.org/10.1109/PSEC.2002.1023896>.

4. Imam Amir A., Kumar R. Sreerama, Al-Turki Yusuf A. Modeling and Simulation of a PI Controlled Shunt Active Power Filter for Power Quality Enhancement Based on P-Q Theory. *Electronics*. 2020. Vol. 9. No 4: 637. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9040637>

5. Mannen T., Fujita H. A DC Capacitor Voltage Control Method for Active Power Filters Using Modified Reference Including the Theoretically Derived Voltage Ripple. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52. No 5. Pp. 4179–4187. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2574854>.

6. Yagup E.V. Power active filter with voltage stabilization on the storage capacitor by discrete with the help of search engine optimization. *Bulletin of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute*. Problems with automated electric drive. Theory and practice. Power electronics and energy efficiency: topic. issue. 2017. Vyp. 27 (1249). P. 226–229. (Rus)

7. Morán L., Dixon J., Torres M. 41 – Active Power Filters. *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2018. Pp. 1341–1379. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00046-5>.

8. Kharitonov V.L. On the asymptotic stability of the equilibrium position of a family of systems of linear differential equations. *Differentsialnie uravneniia*. 1978. Vol. 14. No 11. Pp. 2086–2088. (Rus)

9. Shatirko A.V., Khusainov D.Ya. Stability of nonlinear systems with aftereffect. Kyiv: DP Informatziino-analitychne ahenstvo, 2012. 74 p. (Ukr)

Надійшла 30.05.2022
Остаточний варіант 05.09.2022

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯ У ВИХІДНИХ КОЛАХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПОТУЖНИХ ГАЗОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК

В.В. Мартинов*, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: mart_v@ied.org.ua

Енергоємність вихідного кола імпульсного джерела високої напруги для газорозрядного навантаження визначається сукупністю енергій, що накопичуються в його реактивних елементах у робочих або перехідних режимах. Через пробой у вихідному колі високовольтних джерел електроживлення накопичена енергія може неконтрольовано вивільнятися і призводити до відмов елементів або до появи технологічних дефектів. Встановлено взаємозв'язок між величиною пульсацій вихідної напруги, опором навантаження, параметрами індуктивно-ємнісного вихідного фільтра, потужності джерела живлення та частоти його перетворення. Отримано аналітичні вирази, що дають змогу розраховувати параметри вихідного фільтра потужного високовольтного джерела електроживлення, виходячи з допустимої енергії, яка може накопичуватися у вихідному фільтрі при забезпеченні допустимих пульсацій напруги на виході перетворювача. Встановлено, що чим меншим є коефіцієнт затухання перехідних процесів, тим більшу енергію треба накопичувати у фільтруючих елементах для забезпечення необхідної якості вихідної енергії. На розрахунковому прикладі джерела живлення напругою 30 кВ, потужністю 450 кВт, частотою перетворення 20 кГц та вихідними пульсаціями менше 1 % показано, що задля реалізації без коливальних перехідних процесів за значних змін струму навантаження енергоємність вихідного фільтра може перевищувати величину 1 Дж/кВт. У разі збільшенні еквівалентної частоти перетворення ця величина може бути суттєво зменшена. Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: високовольтне джерело електроживлення, газорозрядне навантаження, напівпровідниковий перетворювач, енергоємність вихідного згладжуючого фільтра.

Вступ. Режимми електротехнологічних процесів залежать як від конструктивних особливостей технологічних систем, так і від показників електричних параметрів електроживлення та їхньої стабільності, особливо в потужних системах електронно-променевого та плазмового технологічного обладнання. Відмінною особливістю розглянутих вище електротехнологій є те, що між оброблюваним виробом і джерелом електроенергії, перетворювачем, звичайно присутнє деяке газове середовище, характеристики якого багато в чому визначають характеристики навантаження перетворювача електроенергії. Під час технологічного процесу характеристики газового середовища, яке бере участь в технологічному процесі, безперервно змінюються. Ці зміни відбуваються під впливом зростання температури, зміни тиску в технологічній камері і ін., що провокує перехід одного виду розряду в інший. В цьому випадку у разі виникнення дугового розряду у технологічних процесах, що розглядаються, задля запобігання утворення дефектів необхідне швидке відключення навантаження від живлячої мережі. А потім швидке відновлення прискорювальної напруги з метою продовження технологічного режиму без перерегулювання, яке може викликати повторний перехід одного виду газового розряду в інший.

Потужність сучасних електронно-променевих гармат перевищує сотні кіловат за напруги в декілька десятків кіловольт. Ці вимоги вступають в протиріччя з показниками якості електроенергії, зокрема за рівнем пульсацій напруги, який традиційно забезпечується застосуванням в колах електроживлення енергоємних електричних фільтрів, що складаються з індуктивностей і ємностей [1].

В останні роки досить широко застосовуються джерела живлення на основі високочастотних транзисторних перетворювачів. Завдяки малій накопиченій енергії – до 1...2 Дж/кВт [2] – суттєво ускладнений перехід іскрових розрядів у прискорювальному проміжку у дугу, що запобігає спрацьовуванню струмового захисту джерела живлення. Застосування джерел електроживлення з високо-частотною імпульсною модуляцією дає змогу суттєво зменшити енергоємність фільтрів задля досягнення необхідних параметрів якості електроенергії з одночасним зменшенням ймовірності дугоутворення у технологічному навантаженні.

© Мартинов В.В., 2023

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2184-0394>

При цьому, для побудови потужних джерел електроживлення найбільшого поширення набула стратегія, заснована на паралельному з'єднанні перетворювачів (модулів) меншої потужності [3], що працюють на загальне навантаження. Це дозволяє не тільки рівномірно розподіляти навантаження між окремими модулями і, тим самим, знизити щільність виділення енергії в одиниці об'єму, спростити конструкції перетворювачів, а й модульне виконання силової частини спільно з багатофазним керуванням, що сприяє зменшенню габаритів та параметрів вихідних фільтрів, підвищенню швидкодії імпульсного джерела електроживлення [4].

Ступінь впливу вихідних параметрів джерела електроживлення на якість технологічних процесів різна. Більшою мірою впливають стабільність і пульсації постійної напруги джерела прискорюючої напруги. Наявність пульсацій і відхилення напруги, наприклад, в зварювальних установках призводять до розфокусування електронного променя і, як наслідок, до зміни щільності теплового потоку [2]. Для установок електронно-променевого напилення нестабільність прискорюючої напруги [5] призводить до коливання товщини слою напилення. У разі виникнення коротких замикань у навантаженні в подібних установках використовують переривання струму навантаження. Для деяких технологій бездефектна пауза в навантажувальному струмі не повинна перевищувати 50 мікросекунд, а це накладає суттєві обмеження на параметри перехідних процесів, особливо в потужних джерелах електроживлення.

З позиції силової електроніки задачі електроживлення технологічних установок украй складні. Справа не тільки у великій потужності устаткування, високій напрузі і підвищених вимогах до якості електроенергії. В цих задачах іноді виникають фізичні суперечності. Наприклад, електронно-променеві зварювальні установки чутливі до рівня пульсацій анодної напруги [6, 7]. Подавити пульсації можна за рахунок застосування фільтрів, що містять реактивні елементи, але підвищення запасу енергії у вихідному ланцюзі джерела приводить до руйнування електродів електронної гармати при періодичних пробоях і є неприпустимим.

Метою роботи є визначення взаємозв'язку основних параметрів потужних джерел електроживлення для газорозрядних установок з якістю вихідної напруги та накопиченою енергією в їхніх вихідних колах.

Традиційні імпульсні перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією для отримання прийнятної рівня пульсацій у вихідній напрузі вимагають встановлення фільтрів, наприклад, індуктивно-емнісних. Проте, наявність фільтрів може привести до неможливості джерела живлення виконати одну з своїх основних функцій, наприклад, в електронно-променевих установках – здатність джерела електроживлення переривати короткі замикання у навантаженні із забезпеченням необхідних перехідних процесів. Підвищення потужності електротехнологічного навантаження вимагає знаходження структур та параметрів елементів електричних кіл імпульсних перетворювачів за яких електричний процес підпорядковуватиметься заданим закономірностям [8, 9].

Традиційну структуру високовольтного джерела електроживлення для потужних газорозрядних технологічних навантажень, наприклад, електронно-променевих гармат, наведено на рис. 1.

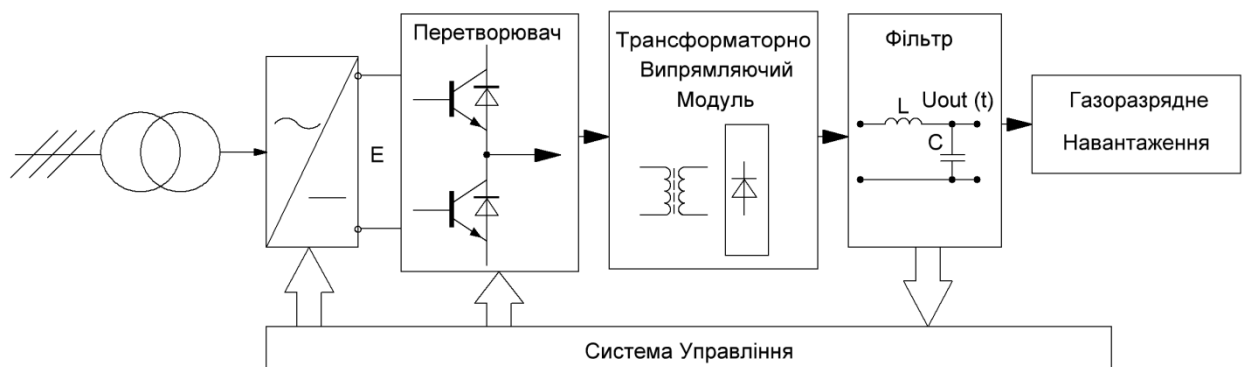


Рис. 1

Вона складається з вхідного мережевого трансформатора; силового випрямляча; перетворювача з високочастотною імпульсною модуляцією; високочастотного високовольтного трансформаторно-випрямляючого модуля; вихідного фільтра та системи управління. Причому зображений вихідний фільтр, позначений ланкою другого порядку, включає всі обчислювані накопичувальні ланки елект-

роенергії від перетворювача до газорозрядного навантаження, оскільки енергоємність вихідного кола джерела високої напруги визначається сукупністю енергій [10], що накопичуються в її реактивних елементах у робочих та перехідних режимах. Практично всі враховані накопичувачі, залежно від структури перетворювальної частини, істотно впливають на якість вихідної електроенергії, якість перехідних процесів, їхню тривалість, коливальність та перерегулювання, а також визначають кількість енергії, яка може неконтрольовано вивільнитися у навантаженні та призводити до відмов елементів або до появи технологічних дефектів.

Вважаємо, що наведена на рис. 1 еквівалентна схема фільтра визначає всі інерційні властивості джерел електроживлення технологічних навантажень, що розглядаються. Задля забезпечення необхідного перехідного процесу та відповідного технологічного режиму допустимого запасу електроенергії [2, 5, 7] необхідно визначити параметри елементів фільтра в залежності від властивостей і потужності перетворювача.

Будь-який встановлений та перехідний режим характеризується певними запасами енергії магнітного та електричного полів у кожний момент часу, наприклад, у вихідних елементах фільтра кола навантаження. Розглянемо можливість досягнення необхідних часових параметрів при перехідних процесах, які виникають в електричних колах при впливах, що призводять до переходу від одного стаціонарного стану до іншого, наприклад, під час підключенні розрядженого конденсатора C до джерела напруги U через резистор R . У цьому випадку напруга на конденсаторі U_C описується відомим виразом (1)

$$U_C = U \left(1 - e^{-t/RC} \right), \quad (1)$$

де $RC = \tau$ – стала часу кола.

З (1) визначимо час перехідного процесу. Для цього в правій частині виразу (1) експоненційний член розкладемо в ряд Тейлора, відкинемо всі члени старше першого та отримаємо

$$t = \frac{U_C}{U} R. \quad (2)$$

Напругу на конденсаторі U_C (2) позначимо через напругу джерела живлення $U_C = kU$ (де $k=0 \div 1$) і тоді

$$t = \frac{2 \cdot k \cdot Q}{P}, \quad (3)$$

де $P = UI$ – потужність джерела живлення; $Q = C \cdot U^2 / 2$ – енергія, яка накопичена в вихідному конденсаторі.

З (3) видно, що для мінімізації часу перехідного процесу необхідно або збільшити встановлену потужність джерела електроживлення, або зменшити накопичувану енергію в колі, в якому відбувається перехідний процес, або зменшити діапазон зміни енергії в цьому колі. Збільшувати встановлену потужність системи електроживлення найпростіший, але неефективний шлях. Тому основна увага при розробці потужних імпульсних джерел електроживлення для газорозрядного навантаження приділяється мінімізації накопиченої енергії у вихідних колах за рахунок оптимального вибору структур перетворювачів та розрахунку вихідних фільтрів. Розрахунок параметрів LC -фільтра присвячено багато літератури [10, 11, 12]. Розрахунок пульсацій при ШІМ ведеться по різному. Якісний аналіз кривих вихідної напруги показує, що відношення частоти перемикання перетворювача до власної частоти зрізу фільтра є фундаментальними параметрами, які визначають запас енергії в вихідних колах перетворювача. Ключове значення цього відношення полягає в тому, що воно є сполучною ланкою між якістю вихідної напруги, параметрами фільтра і частотою перемикання.

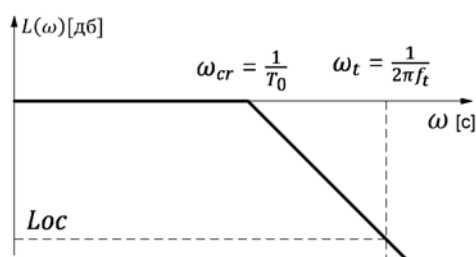


Рис. 2

На рис. 2 наведено ідеалізовану амплітудно-частотну характеристику фільтра нижніх частот другого порядку. Наведемо спрощену методику вибору параметрів фільтра, яка дозволить в кінцевому рахунку визначити схемотехніку інверторів задля досягнення необхідної якості

вихідної напруги та мінімізації енергії у вихідних колах. Введемо поняття коефіцієнт придушення, який дорівнює відношенню вихідної напруги (U_n) до змінної складової від піка до піка (U_d) в вихідній напрузі: $K_{pd} = U_n / U_d$.

Тоді коефіцієнт ослаблення змінної складової, в децибелах: $Loc = 20 * \lg K_{pd}$.

Знаючи необхідний коефіцієнт ослаблення змінної складової та частоту перетворення, можна визначити частоту зрізу фільтра другого порядку наступним чином: $f_{cr} = f_t / 10^{0.025 \cdot Loc}$, яка пов'язана з постійною часу фільтра. Тому для фільтра другого порядку маємо

$$\sqrt{LC} = \frac{10^{0.025 \cdot Loc}}{2 \cdot \pi \cdot f_t}, \quad (4)$$

Відомий вираз для коефіцієнта загасання фільтра другого порядку [14] пов'язує параметри навантаження, ємності й індуктивності

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot R_n} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5)$$

Використовуючи вирази (4, 5) визначимо енергетичні характеристики фільтра другого порядку, або який запас енергії повинен бути в фільтрі, щоб знизити амплітуду вихідних пульсацій до необхідного рівня. Перепишемо рівняння (5) у наступному вигляді:

$$C = \frac{\sqrt{LC}}{2R\xi} = \frac{\sqrt{LC}}{2 \cdot \frac{U_n \cdot \xi}{I_n}}. \quad (6)$$

Звівши в квадрат ліву і праву частину виразу (6) і зробивши необхідні перетворення, отримаємо

$$\frac{CU_n^2}{2} = \frac{LI_n^2}{2} \frac{1}{4 \cdot \xi^2}. \quad (7)$$

З аналізу (7) випливає що енергія накопичена в ємності фільтра, істотно залежить від коефіцієнта загасання. За коефіцієнта загасання рівним одиниці забезпечується не коливальний перехідний процес, якщо енергія, збережена в ємності фільтра, в чотири рази менше енергії дроселя. З (6) з урахуванням (4) отримуємо

$$\frac{C \cdot U_n^2}{2} = \frac{I_n \cdot U_n}{8 \cdot \pi \cdot f_T} \frac{10^{0.5 \left(\left(\ln \frac{U_n}{U_d} \right) / (\ln 2 + \ln 5) \right)}}{\xi}. \quad (8)$$

На рис. 3 представлені результати розрахунку необхідного запасу енергії Q в конденсаторі фі-

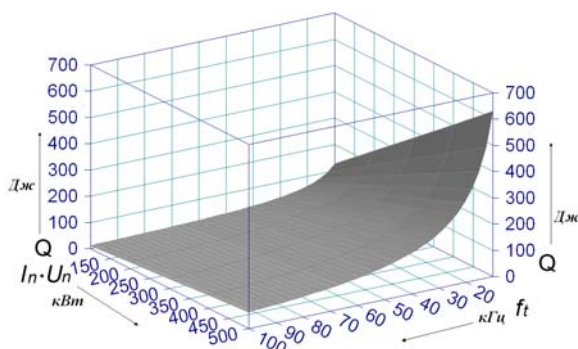


Рис. 3

льтра за виразом (8) для досягнення розрахункових пульсацій 1% за коефіцієнта загасання рівним 0,1, залежно від потужності навантаження ($I_n \cdot U_n$) і частоти перемикачів (f_t) на вході фільтра. Як впливає з рис. 3 за частоті перетворення 20 кГц і потужності джерела близько 500 кВт параметри вихідного фільтра для забезпечення необхідних пульсацій повинні бути такі, що у вихідному фільтрі повинно накопичуватися енергії більше 600 Дж. А це суттєво перевищує вимоги, що пред'являються до цих джерел елект-

роживлення щодо забезпечення бездефектної технологічної процедури.

Характерною особливістю джерел електроживлення для газорозрядного навантаження є те, що необхідну якість електроенергії треба забезпечувати у всьому діапазоні зміни струму навантаження – від холостого ходу до номінального струму. На холостому ходу показники якості електроенергії забезпечуються енергією, що накопичується

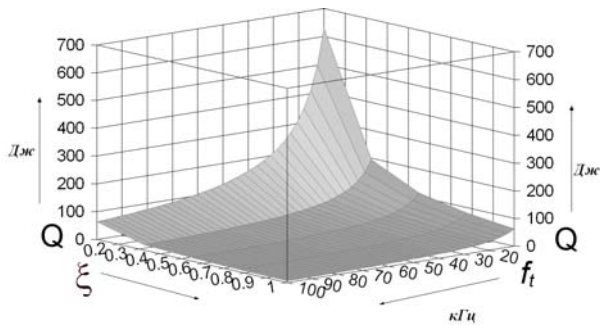


Рис. 4

в електричному полі (ємнісної складової фільтра), а під навантаженням додається енергія від індуктивної складової фільтра. Це суттєво змінює підходи до проектування джерел електроживлення та їхніх вихідних фільтрів.

На рис. 4 представлено результати розрахунку необхідного запасу енергії Q в конденсаторі фільтра за виразом (8) за розрахункових пульсаціях 1% та постійної потужності у навантаженні 500 кВт. З графіків видно, що для забезпечення коефіцієнта загасання більше одиниці, для запобігання перерегулюванню та забезпечення без коливального перехідного процесу в широкому діапазоні зміни струму навантаження та мінімізації запасу енергії у вихідних колах необхідно істотно збільшувати частоту перетворення, що для потужних систем електроживлення може бути важко.

Але навіть за коефіцієнта затушення, що дорівнює одиниці (рис. 4), і не дуже жорстким вимогам до коефіцієнту придушення (1%), як впливає з (8), за потужності навантаження 450 кВт і напрузі 30 кВ в фільтрі буде накопичуватися близько 45 джоулів енергії. Це істотно знижує динамічні характеристики високовольтних джерел електроживлення, наприклад, для електронно-променевої гармати.

Домогтися істотного зменшення накопиченої енергії у вихідних колах можна не тільки підвищуючи частоту перетворення потужного джерела електроживлення, але й використовуючи ефект, створюваний багатофазними перетворювачами [13]. За відносно невисокої частоті комутації в окремому каналі багатофазні перетворювачі забезпечують оптимальні процеси перетворення електроенергії та суттєво підвищують еквівалентну частоту пульсацій на виході джерела живлення, дозволяючи в багатьох випадках розробляти системи електроживлення взагалі без вихідних фільтрів. Такий підхід дає змогу створювати перетворювачі, які без застосування енергоємних фільтрів реалізують як вихідну напругу з малим рівнем пульсацій, так і без коливальні зміни струму в умовах стрибкоподібної зміни опору навантаження.

Отримані вирази (4)–(8) дають змогу визначати основні параметри як імпульсного перетворювача, так і модулів, які об'єднуються у багатофазну систему, з вихідним фільтром другого порядку, виходячи з допустимої енергії на виході джерела живлення.

Висновки. Отримано аналітичні залежності, що зв'язують потужність джерела електроживлення, частоти перетворення, параметри елементів їхніх еквівалентних схем та енергії в їхніх вихідних колах. Показано, що у високовольтних системах електроживлення енергетичні характеристики їхніх індуктивно-ємнісних фільтрів впливають на якість вихідної напруги. При цьому енергія цих фільтрів істотно залежить від потужності джерела, частоти перетворення і параметрів затушення їхньої еквівалентної схеми. Встановлено, що чим меншим є коефіцієнт затушення перехідних процесів в еквівалентній схемі фільтра, тим для забезпечення необхідної якості вихідної напруги треба накопичувати більшу енергію у фільтруючих елементах. При підвищенні потужності систем електроживлення для збереження необхідної якості вихідної напруги слід підвищувати еквівалентну частоту перетворення, віддаючи перевагу багатофазним перетворювачам, або збільшувати величину накопиченої енергії в вихідних колах в межах допустимих величин за умовами застосування.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Джерело-3", державний реєстраційний номер 0119U001289 (КПКВК 6541030).

1. Vasyukov I. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Zhivodernikov A. V., Batyukov A. V. and Shcherbakov A. V.. High voltage switch-mode power supply for electron-beam technology with minimum load breakdown energy. IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 1109. 2018. 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012027>.

2. Назаренко О.К., Локшин В.Е. Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки. *Автоматическая Сварка*. 2005. № 1. С. 36-38.
3. Комаров Н.С., Мартынов В.В. Развитие теории транзисторных преобразователей с высокочастотной импульсной модуляцией. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1. Ч. 2. С. 73-75.
4. Мартинов В.В., Монжеран Ю.П., Можаровский А.Г., Лебедев Б.Б., Смитюх Г.Е., Чайка Н.В., Иванов А.М. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева. *Современная электротехнология*. 2010. № 2. С. 57-60.
5. В. М. Спивак, Т. А. Терещенко, В. Д. Шелягин, Г. М. Младенов. Системы управления лучевых технологических установок. К.: Техника, 1988. 272 с.
6. Назаренко О.К., Ланбин В.С. Исследование высоковольтных цепей управления током сварочного электронного пучка. *Автоматическая сварка*. 2007. № 5 (649). С. 26-30.
7. Лубинец Г.Я., Мельник В.И., Тугай Б.А. Исследование дуговых пробоев в газоразрядных электронных пушках и его зависимости от параметров внешней цепи. Сб. тез. докл. IV Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1982. С. 119-122.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 3-11.
9. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 24 – 29.
10. Мартынов В.В., Лебедев Б.Б. Энергия выходной цепи источника ускоряющего напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 4. С. 50-55.
11. Голубев В.В. Расчет и оптимизация выходного LC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 33-37.
12. Novskiy V., Martynov V., Martynov D. Selection of the basic parameters of the grid-tied inverter with PWM in the mode of tracking the reference signal. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. С. 323-327. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250102>
13. Щерба А.А., Мартинов В.В. Высоковольтні багатofазні напівпровідникові перетворювачі зі зменшеним накопиченням енергії для газорозрядних установок. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.065>

DETERMINATION OF CONDITIONS FOR REDUCING ENERGY ACCUMULATION IN THE OUTPUT CIRCUITS OF POWER SOURCES OF POWERFUL GAS-DISCHARGE INSTALLATIONS

V.V. Martynov

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

E-mail: mart_v@ied.org.ua

The energy intensity of the output circuit of a high-voltage pulse source for a gas-discharge load is determined by the totality of energies accumulated in its reactive elements in operating or transient modes. During breakdowns in the output circuit of high-voltage power supplies, the accumulated energy can be released uncontrollably and lead to element failures or technological defects. The relationship between the magnitude of the output voltage ripple, the load resistance, the parameters of the inductive-capacitive output filter, the power of the power source and the frequency of its conversion has been established. Analytical expressions are obtained that make it possible to calculate the parameters of the output filter of a high-voltage powerful power supply based on the allowable energy that can accumulate in the output filter while providing allowable voltage ripples at the output of the converter. It has been established that the lower the attenuation coefficient of transient processes, the more energy must be accumulated in the filter elements to ensure the required quality of the output energy. On a calculated example of a power supply with a voltage of 30 kV, a power of 450 kW, a conversion frequency of 20 kHz and output ripples of less than 1%, it is shown that for implementation without oscillatory transients with significant changes in load current, the energy intensity of the output filter can exceed 1 J/kW. With an increase in the equivalent conversion frequency, this indicator can be significantly reduced. References 13, figures 4.

Keywords: high-voltage power supply, gas-discharge load, semiconductor converter, energy consumption of the output smoothing filter.

1. Vasyukov I. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Zhivodernikov A. V., Batyukov A. V. and Shcherbakov A. V.. High voltage switch-mode power supply for electron-beam technology with minimum load breakdown energy.

IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1109. 2018. 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1109/1/012027>.

2. Nazarenko O.K., Lokshin V.E. Dynamic characteristics of high-voltage power sources for electron-beam welding. *Automatic Welding*. 2005. No 1. Pp. 36-38. (Rus)
3. Komarov N.S., Martynov V.V. Development of the theory of transistor converters with high-frequency pulse modulation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2007. No 1. Ch. 2. Pp. 73-75. (Rus)
4. Martynov V.V., Monzheran Yu.P., Mozharovsky A.G., Lebedev B.B., Smityukh G.E., Chaika N.V., Ivanov A.M. High voltage power supply for electron beam heating. *Modern electrometallurgy*. 2010. No 2. Pp. 57-60. (Rus)
5. Spivak V. M., Tereshchenko T. A., Shelyagin V. D., Mladenov G. M. Control systems of beam technological installations. K.: Tekhnika, 1988. 272 p. (Rus)
6. Nazarenko O.K., Lanbin V.S. Investigation of high-voltage control circuits of the current of the welding electron beam. *Automatic welding*. 2007. No 5 (649). Pp. 26-30. (Rus)
7. Lubinets G.Ya., Melnik V.I., Tugai B.A. Investigation of arc breakdowns in gas-discharge electron guns and its dependence on the parameters of the external circuit. Sat. abstract report IV All-Union Symposium on high-current electronics. Tomsk, 1982. Pp. 119-122. (Rus)
8. Shcherba AA, Suprunovskaya N.I. Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storage in semiconductor generators of powerful discharge pulses. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 1. Pp. 3-11. (Rus)
9. Yagup V.G., Yagup E.V. Synthesis of an electrical system in the time domain by search engine optimization. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 2. Pp. 24-29. (Rus)
10. Martynov V.V., Lebedev B.B. Energy of the output circuit of the accelerating voltage source. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 4. Pp. 50-55. (Rus)
11. Golubev V.V. Calculation and optimization of the output LC filter of a switching AC voltage converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 33-37. (Rus)
12. Novskiy V., Martynov V., Martynov D. Selection of the basic parameters of the grid-tied inverter with PWM in the mode of tracking the reference signal. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. Pp. 323-327. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250102>
13. Shcherba AA, Martynov V.V. High-voltage multiphase semiconductor converters with reduced energy storage for gas discharge installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. No 4. 2018. Pp. 65-69. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.065>

Надійшла 17.04.2022
Остаточний варіант 10.11.2022

АДАПТИВНІ СПОСТЕРІГАЧІ ЧАСТОТИ ДВОФАЗНИХ
ТА ОДНОФАЗНИХ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ

С.М. Пересада^{1*}, докт. техн. наук, Є.О. Ніконенко^{1**}, С.М. Ковбаса^{1***}, докт. техн. наук,
О. Кузнєцов², докт. техн. наук

¹ НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: sergei.peresada@gmail.com

² Університет прикладних наук Міттелхессена,

Вільгельм-Лойшнер-штрассе 13 D, 61169 Фрідберг, Німеччина.

З використанням концепції керування на основі внутрішньої моделі синтезовано адаптивний спостерігач частоти та миттєвих значень складових двофазного синусоїдного симетричного сигналу. Спостерігач гарантує глобальне експоненційне оцінювання та високу швидкодію. За умови відсутності інформації про один з сигналів двофазної системи, що еквівалентно вимірюванню однофазного сигналу, запропоновано модифіковану структуру спостерігача однофазного синусоїдного сигналу, властивості локальної експоненційної стійкості якого доведено за допомогою теореми конверсії Ляпунова для збуреної системи. Робастність спостерігача двофазного сигналу відносно адитивних збурень (високочастотних завад, змінної частоти) підтверджено результатами математичного моделювання. Показано, що швидкодія спостерігача може бути доволіно збільшена за рахунок підвищення коефіцієнтів зворотного зв'язку. Розроблено методіку налаштування спостерігача однофазного сигналу, яка забезпечує розширення області стійкості. Бібл. 14, рис. 7.

Ключові слова: адаптивний спостерігач, оцінювання частоти однофазного сигналу, асимптотична стійкість.

Вступ. Визначення частоти гармонічних сигналів є необхідним в ряді систем перетворення енергії, наприклад, для синхронізації алгоритмів векторного керування з вектором напруги живлення. Типовими застосуваннями такої синхронізації є системи керування силовими активними фільтрами [1], керованими вхідними випрямлячами перетворювачів частоти [2], асинхронними машинами подвійного живлення [3] та інші. Оскільки інформація про вектор напруги живлення використовується для здійснення перетворень координат, результати вимірювань вимагають додаткової цифрової обробки з метою фільтрації вищих гармонік, імпульсних завад та інших неідеальностей. Типове рішення, яке є промисловим стандартом, базується на використанні систем фазової синхронізації (phase locked loops) [4], які є складними нелінійними фільтрами.

У [5] розроблено адаптивний спостерігач 10-порядку для оцінювання частоти сигналу довільної форми. Рішення базується на розкладі сигналу в ряд Фур'є і складається з двох складових. Перша забезпечує глобальні властивості стійкості процесу оцінювання частоти у регіоні, близькому до реальної частоти, розмір якого залежить від складу вищих гармонік в сигналі. Друга складова забезпечує локальні властивості стійкості оцінювання частоти сигналу. Точність оцінювання може бути збільшена за рахунок підвищення порядку спостерігача (використання фільтра сигналу більш високого порядку). Налаштування спостерігача є складним. Глобально стійкий спостерігач частоти гармонічного сигналу [6], який має 4-ий порядок, базується на адаптивному резонансному фільтрі, для роботи якого необхідно мати інформацію про дві похідні вимірюваного сигналу, що реалізується за допомогою додаткових фільтрів. Застосовано нормалізацію коефіцієнтів алгоритму оцінювання частоти для підвищення робастності алгоритму до завад у вимірюваному сигналі. У [7] представлено глобально стійкий спостерігач амплітуди і частоти гармонічного сигналу з постійною складовою, який має 4-ий порядок. Якщо постійна складова в сигналі відсутня, спостерігач спрощується до системи 2-го порядку. Спостерігач синтезовано на основі розгляду моделі сигналу з двома похідними. Змінною стану в спостерігачі обрано не реальний вимірюваний сигнал, а результат множення сигналу на його похідну. Відповідно, оцінюється не власне частота сигналу, а квадрат частоти. Задля забезпечення фільтрації завад вимірюваного сигналу спостерігач розширюється до системи 7-го порядку за рахунок додаткових

© Пересада С.М., Ніконенко Є.О., Ковбаса С.М., Кузнєцов О., 2023

ORCID ID: [*https://orcid.org/0000-0001-8948-722X](https://orcid.org/0000-0001-8948-722X); [**https://orcid.org/0000-0003-2379-5566](https://orcid.org/0000-0003-2379-5566);

[*** https://orcid.org/0000-0002-2954-455X](https://orcid.org/0000-0002-2954-455X)

фільтрів. Спостерігач частоти «ідеального» синусоїдного сигналу 1-го порядку [8] базується на розгляді та онлайн-розрахунку 2-х додаткових рівнянь операторів затримки для вимірюваного сигналу. Спостерігач потребує інформацію про нижню і верхню границі частоти сигналу, щоб уникнути виродження функції арккосинуса; має 3 коефіцієнти налаштування, один з яких має бути обмеженим верхньою границею частоти. За наявності завад оцінена частота також має додаткові складові. Спостерігачі частоти однофазної та трифазної мережі 3-го порядку [9] побудовано для моделі сигналу з двома похідними; рішення базується на підході фазової синхронізації з нормалізацією коефіцієнтів.

Рішення [5] – [9] потребують складного налаштування великої кількості коефіцієнтів і вимагають застосування додаткових фільтрів.

У роботі [10] запропоновано новий підхід до вимірювання вектора напруги мережі живлення, який базується на поєднанні теорії адаптивних спостерігачів з концепцією внутрішньої моделі (Internal Model Approach) [11]. Деякі результати експериментальних досліджень надано в [12].

В даній роботі розвинуто рішення авторів [10] для оцінювання частоти симетричного двофазного синусоїдного сигналу. Представлено результати дослідження його робастності до адитивних збурень. За умови відсутності інформації про одну з компонент двофазного сигналу запропоновано модифікований спостерігач однофазного сигналу.

Метою роботи є синтез та розробка методики налаштування спостерігачів миттєвих значень і частоти двофазних та однофазних гармонічних сигналів, які є простішими у порівнянні з існуючими аналогами.

Постановка задачі оцінювання. Після перетворення симетричного трифазного сигналу до двофазного отримуємо сигнал у вигляді

$$\begin{aligned} x_a &= X_m \cos \omega_0 t, \\ x_b &= X_m \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (1)$$

де x_a, x_b – компоненти вектора вимірюваного сигналу; X_m та $\omega_0 t$ визначають амплітуду та кутове положення довільного вектора, який обертається з постійною кутовою швидкістю ω_0 , як показано на рис. 1, у відносному часі $\bar{t} = t/\omega_0$ для $X_m = 1$.

Нехай для (1) виконуються наступні припущення:

A.1 Координати x_a, x_b є вимірюваними.

A.2 Частота сигналу ω_0 є невідомою, обмеженою.

За умови виконання цих припущень необхідно синтезувати спостерігач сигналу, який гарантує:

O.1. Асимптотичне оцінювання координат x_a, x_b та частоти ω_0 , тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{x}_a, \tilde{x}_b, \tilde{\omega}_0) = \mathbf{0}, \quad (2)$$

де $\tilde{x}_a = x_a - \hat{x}_a$, $\tilde{x}_b = x_b - \hat{x}_b$, $\tilde{\omega}_0 = \omega_0 - \hat{\omega}_0$ – похибки оцінювання; \hat{x}_a , \hat{x}_b та $\hat{\omega}_0$ – оцінки координат x_a, x_b та частоти ω_0 відповідно.

Синтез адаптивного спостерігача частоти двофазних сигналів. Для синтезу спостерігача використано підхід, який базується на внутрішній моделі сигналу (Internal Model Approach [11]). Без втрати загальності приймемо, що $X_m = 1$, тоді динамічна модель гармонійного сигналу (1) має вигляд

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= -\omega_0 x_b, \quad x_a(0) = 1, \\ \dot{x}_b &= \omega_0 x_a. \end{aligned} \quad (3)$$

З (3) рівняння динаміки адаптивного спостерігача для оцінювання компонент двофазного сигналу запишуться

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_a &= -\hat{\omega}_0 x_b + k \tilde{x}_a, \\ \dot{\hat{x}}_b &= \hat{\omega}_0 x_a + k \tilde{x}_b, \end{aligned} \quad (4)$$

де $k > 0$ – коефіцієнт зворотного зв'язку спостерігача.

З (3) та (4) динамічна поведінка похибок оцінювання описується наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k \tilde{x}_a - \tilde{\omega}_0 x_b, \\ \dot{\tilde{x}}_b &= -k \tilde{x}_b + \tilde{\omega}_0 x_a. \end{aligned} \quad (5)$$

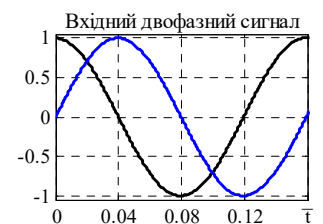


Рис. 1

Для синтезу алгоритму оцінювання частоти ω_0 розглянемо наступну кандидатуру функції

$$\text{Ляпунова: } V = \frac{1}{2}(\tilde{x}_a^2 + \tilde{x}_b^2 + \gamma\tilde{\omega}_0^2) > 0, \quad (6)$$

де $\gamma > 0$ – коефіцієнт налаштування спостерігача.

Похідна від (6) вздовж траєкторій (5) дорівнює

$$\dot{V} = -k(\tilde{x}_a^2 + \tilde{x}_b^2) + \tilde{\omega}_0(-x_b\tilde{x}_a + x_a\tilde{x}_b) + \gamma\tilde{\omega}_0\dot{\tilde{\omega}}_0 = -k(\tilde{x}_a^2 + \tilde{x}_b^2) \leq 0, \quad (7)$$

якщо динаміка похибки оцінювання частоти має вигляд

$$\dot{\tilde{\omega}}_0 = -\hat{\omega}_0 = \gamma^{-1}(x_b\tilde{x}_a - x_a\tilde{x}_b). \quad (8)$$

З (6) і (7) слідує, що $(\tilde{x}_a, \tilde{x}_b, \tilde{\omega}_0) \in \mathcal{D}$ обмеженими $\forall t \geq 0$, відповідно $(\hat{x}_a, \hat{x}_b, \hat{\omega}_0)$ також обмежені, як і $(\dot{\hat{x}}_a, \dot{\hat{x}}_b)$. З (7) випливає, що $\int_0^t (\tilde{x}_a^2(\tau) + \tilde{x}_b^2(\tau))d\tau = -k^{-1}[V(t) - V(0)] \leq k^{-1}V(0)$, а тому сигнали $\tilde{x}_a(t), \tilde{x}_b(t) \in \mathcal{L}_2$ квадратично інтегрованими, і у відповідності з лемою Барбалат [13] з цього слідує, що $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{x}_a, \tilde{x}_b) = \mathbf{0}$.

Система (5), (8) може бути записана в векторній формі як

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\tilde{x}}_a \\ \dot{\tilde{x}}_b \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & -k \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_a \\ \tilde{x}_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -x_b \\ x_a \end{pmatrix} \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 &= -\gamma^{-1}(-x_b, x_a) \begin{pmatrix} \tilde{x}_a \\ \tilde{x}_b \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

або у компактній формі

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{W}^T(t)\mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}} &= -\mathbf{\Gamma}\mathbf{W}(t)\tilde{\mathbf{x}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_a, \tilde{x}_b)^T$, $\mathbf{z} = \tilde{\omega}_0$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & -k \end{bmatrix}$, $\mathbf{W}^T(t) = (-x_b, x_a)$, $\mathbf{\Gamma} = \gamma^{-1} > 0$.

Система (10) має стандартну форму леми про персистність збудження [14]. Оскільки \mathbf{A} є Гурвіцевою матрицею, матриця регресії $\mathbf{W}(t)$ обмежена і має обмежену похідну, а також якщо існує додатна константа T така, що матриця 2×2

$$\int_t^{t+T} \mathbf{W}(\tau)\mathbf{W}^T(\tau)d\tau > 0 \quad (11)$$

додатньо визначена $\forall t \geq 0$ (умови персистності збудження), то $(\tilde{x}_a, \tilde{x}_b, \tilde{\omega}_0) = \mathbf{0}$ є глобально експоненційно стійким положенням рівноваги системи (10).

Для сигналів x_a, x_b , що розглядаються, умова (11) має вигляд

$$(x_a^2 + x_b^2) > 0, \quad (12)$$

тобто модуль двофазного гармонійного сигналу не має бути нульовим.

З (4), (8) рівняння динаміки адаптивного спостерігача мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_a &= -\hat{\omega}_0 x_b + k\tilde{x}_a, \\ \dot{\hat{x}}_b &= \hat{\omega}_0 x_a + k\tilde{x}_b, \\ \dot{\hat{\omega}}_0 &= -\gamma^{-1}(x_b\tilde{x}_a - x_a\tilde{x}_b). \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки динамічна система (13) може розглядатися також як адаптивний фільтр, то для оцінених значень (\hat{x}_a, \hat{x}_b) буде забезпечуватися фільтрація вищих гармонік в сигналах x_a, x_b .

Синтез адаптивного спостерігача (13) базується на вимірюванні повного вектору стану системи (3), що обумовлює “сильні” властивості персистності збудження і, як слідує з властивостей експоненційно стійких нелінійних систем, гарантує системі робастність відносно адитивних збурень.

Синтез адаптивного спостерігача частоти однофазних сигналів. Розглянемо випадок, коли в (1), (3) вимірюється тільки один сигнал x_a . Це еквівалентно встановленню тільки одного давача

двофазного сигналу або вимірюванню однофазного сигналу. При цьому компонента x_b не є вимірюваною, однак її оцінку можна використати для оцінювання частоти сигналу.

Модифікований спостерігач (13) для оцінювання частоти однофазного сигналу сформуємо у

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_a &= -\hat{\omega}_0 \hat{x}_b + k \tilde{x}_a, \quad \hat{x}_a(0) = x_{a0}, \\ \text{вигляді} \quad \dot{\hat{x}}_b &= \hat{\omega}_0 \hat{x}_a - k_1 \tilde{x}_a, \quad \hat{x}_b(0) = 0, \\ \dot{\hat{\omega}}_0 &= -\gamma^{-1} \hat{x}_b \tilde{x}_a, \quad \hat{\omega}_0(0) = \omega_{00}, \end{aligned} \quad (14)$$

де $k_1 > 0$ – коефіцієнт зворотного зв'язку спостерігача; x_{a0}, ω_{00} – початкові умови змінних $\hat{x}_a, \hat{\omega}_0$.

Зауважимо, що різниця між спостерігачами (13) і (14) полягає в тому, що через відсутність вимірювання x_b в (14) замість зворотного зв'язку за цією змінною використовується зворотний зв'язок за вимірюваною змінною x_a .

З (3) і (14) рівняння динаміки похибок оцінювання запишуться у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k \tilde{x}_a - \omega_0 \tilde{x}_b - \hat{x}_b \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{x}}_b &= (k_1 + \omega_0) \tilde{x}_a + \hat{x}_a \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 &= \gamma^{-1} \hat{x}_b \tilde{x}_a. \end{aligned} \quad (15)$$

Відзначимо, що в (15) складова $\hat{x}_a \tilde{\omega}_0$ розглядається як адитивне збурення.

Для подальшого аналізу стійкості розглянемо наступне перетворення координат:

$$\eta = -\omega_0 \tilde{x}_b. \quad (16)$$

Система (15) в нових координатах переписеться як

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k \tilde{x}_a + \eta - \hat{x}_b \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\eta} &= -\omega_0 (k_1 + \omega_0) \eta + \nu, \quad \nu = -\omega_0 \hat{x}_a \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 &= \gamma^{-1} \hat{x}_b \tilde{x}_a. \end{aligned} \quad (17)$$

Для моделі (17) розглянемо наступну кандидатуру функції Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} \left(\tilde{x}_a^2 + \omega_0^{-1} (k_1 + \omega_0)^{-1} \eta^2 + \gamma \tilde{\omega}_0^2 \right) > 0. \quad (18)$$

Похідна від (18) вздовж траєкторій (17) дорівнює

$$\dot{V} = \tilde{x}_a \dot{\tilde{x}}_a + \omega_0^{-1} (k_1 + \omega_0)^{-1} \eta \dot{\eta} + \gamma \tilde{\omega}_0 \dot{\tilde{\omega}}_0 \triangleq -k \tilde{x}_a^2 - (k_1 + \omega_0)^{-1} \hat{x}_a \eta \tilde{\omega}_0. \quad (19)$$

За умови $k_1 \gg 1$, остання компонента в (19) стає нехтувано малою (що еквівалентно $\nu = 0$ в (17)), тому $\dot{V} \leq 0$. З цього слідує, що $(\tilde{x}_a, \eta, \tilde{\omega}_0) \in$ обмеженими $\forall t \geq 0$, з (16) \tilde{x}_b також обмежена, відповідно $(\hat{x}_a, \hat{x}_b, \hat{\omega}_0)$ також обмежені, як і $(\dot{\tilde{x}}_a, \dot{\tilde{x}}_b, \dot{\eta})$. Використання леми Барбалат [13] дає $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}_a = 0$.

Для дослідження збіжності змінних $\tilde{x}_b, \tilde{\omega}_0$ до нуля представимо (15) у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k \tilde{x}_a - \omega_0 \tilde{x}_b - x_b \tilde{\omega}_0 + \tilde{x}_b \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{x}}_b &= (k_1 + \omega_0) \tilde{x}_a + x_a \tilde{\omega}_0 - \tilde{x}_a \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 &= \gamma^{-1} x_b \tilde{x}_a - \gamma^{-1} \tilde{x}_a \tilde{x}_b. \end{aligned} \quad (20)$$

Для лінеаризації системи в околі положення рівноваги $\mathbf{y} = \mathbf{0}$, $\mathbf{y} = (\tilde{x}_a, \tilde{x}_b, \tilde{\omega}_0)^T$ знехтуємо квадратичними складовими $(\tilde{x}_b \tilde{\omega}_0, \tilde{x}_a \tilde{\omega}_0, \gamma^{-1} \tilde{x}_a \tilde{x}_b)$ в правій частині. Рівняння лінеаризованої системи запишуться як

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k \tilde{x}_a - \omega_0 \tilde{x}_b - x_b \tilde{\omega}_0, \\ \dot{\tilde{x}}_b &= (k_1 + \omega_0) \tilde{x}_a + x_a \tilde{\omega}_0 \triangleq \mathbf{A}(t) \mathbf{y} + \mathbf{E}(t) \mathbf{y}, \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 &= \gamma^{-1} x_b \tilde{x}_a, \end{aligned} \quad (21)$$

де $\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -k & -\omega_0 & -x_b \\ k_1 + \omega_0 & 0 & 0 \\ \gamma^{-1}x_b & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{E}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ x_a \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{E}(t)\mathbf{y}$ – адитивне збурення.

З іншого боку, номінальна динаміка системи (21) ($\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{y}$) може бути записана в наступній стандартній формі:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_a &= -k\tilde{x}_a + (-\omega_0, x_b) \begin{pmatrix} \tilde{x}_b \\ \tilde{\omega}_0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} \dot{\tilde{x}}_b \\ \dot{\tilde{\omega}}_0 \end{pmatrix} &= - \begin{bmatrix} k_1 + \omega_0 & 0 \\ \omega_0 & 0 \\ 0 & \gamma^{-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\omega_0 \\ x_b \end{pmatrix} \tilde{x}_a. \end{aligned} \quad (22)$$

Система (22) має стандартну форму (10) з $\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{x}_a$, $\mathbf{z} = (\tilde{x}_b \quad \tilde{\omega}_0)^T$, $\mathbf{A} = -k$, $\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} k_1 + \omega_0 & 0 \\ \omega_0 & 0 \\ 0 & \gamma^{-1} \end{bmatrix}$ і

матрицею регресії $\mathbf{W}^T(t) = (-\omega_0, x_b)$, яка є обмеженою з обмеженою похідною, тому для системи (22) виконуються вимоги леми про персистність збудження [14]. Якщо матриця регресії $\mathbf{W}^T(t)$ така, що забезпечує умови персистності збудження (11), то положення рівноваги $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ номінальної системи в (22) буде глобально експоненційно стійким. Відзначимо, що, відповідно до схематизації згідно внутрішньої моделі (3), сигнал x_b є гармонійним виду $x_b = B\cos(\omega_0 t + \Psi)$ з постійними $B > 0$, $\omega_0 > 0$.

В (21) $\mathbf{E}(t)$ визначається сигналом x_a , тому $\|\mathbf{E}(t)\|_2 \leq \delta_0$, де $\delta_0 = x_{a\max}$. Оскільки за умов персистності збудження положення рівноваги $\mathbf{y} = \mathbf{0}$ номінальної системи (22) є глобально експоненційно стійким, то, відповідно до теореми конверсії (Теорема 3.12 в [14]) для системи $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{y}$ існує функція Ляпунова $V(t, \mathbf{y})$, яка задовольняє нерівності

$$\begin{aligned} c_1 \|\mathbf{y}\|_2^2 &\leq V(t, \mathbf{y}) \leq c_2 \|\mathbf{y}\|_2^2, \\ \frac{\partial V(t, \mathbf{y})}{\partial t} + \frac{\partial V(t, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}} \mathbf{A}(t)\mathbf{y} &\leq c_3 \|\mathbf{y}\|_2^2, \\ \left\| \frac{\partial V(t, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}} \right\|_2 &\leq c_4 \|\mathbf{y}\|_2 \end{aligned} \quad (23)$$

для $\|\mathbf{y}\|_2 < r$ та додатних констант $c_1 - c_4$. Виходячи з цього, похідна від функції Ляпунова буде

$$\dot{V} \leq -c_3 \|\mathbf{y}\|_2^2 + \delta_0 \|\mathbf{y}\|_2^2. \quad (24)$$

Таким чином за умови $\delta_0 < c_3$ маємо $\dot{V} < 0$, тобто положення рівноваги збуреної системи є локально експоненційно стійким для $\|\mathbf{y}(t_0)\|_2 < r$, яке визначається значенням δ_0 . Таким чином адаптивний спостерігач (14) забезпечує оцінювання частоти однофазного сигналу з властивістю локальної асимптотичної стійкості.

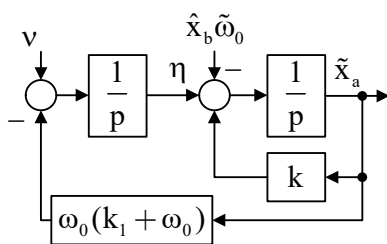


Рис. 2

Для розробки методики налаштування спостерігача розглянемо структурну схему системи (17), яку показано на рис. 2. Передатна функція за збуренням $v = -\omega_0 \tilde{x}_a \tilde{\omega}_0$ має вигляд

$$W(p) = \frac{x_a(p)}{v(p)} = \frac{(\omega_0(k_1 + \omega_0))^{-1}}{(\omega_0(k_1 + \omega_0))^{-1} p^2 + k(\omega_0(k_1 + \omega_0))^{-1} p + 1}. \quad (25)$$

Передатна функція (25) свідчить, що вплив збурення v на вихідну координату може бути зменшено за рахунок збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку k_1 , як це було показано раніше в (18). Таким чином підвищення k_1 сприяє розширенню області стійкості. Виходячи з

передатної функції (25), розрахунок коефіцієнтів налаштування спостерігача k, k_1 може виконуватися так, щоб вона набувала стандартної форми системи другого порядку з

$$\tau = \sqrt{(\omega_0(k_1 + \omega_0))^{-1}}, k = 2\zeta\tau^{-1}, \quad (26)$$

де ζ – коефіцієнт демпфування власних коливань; τ – стала часу.

Таким чином, налаштування спостерігача (14) спрощується до вибору «достатньо великого» k_1 та налаштування γ для формування перехідного процесу ($\zeta=1$ або $\zeta=0.707$).

Дослідження динаміки спостерігача частоти двофазних сигналів. Дослідження динамічних режимів адаптивного спостерігача (13) проведено методом математичного моделювання. Перехідні процеси оцінювання гармонійного сигналу з амплітудою $X_m=1$ і частотою $\omega_0=6.28$ рад/с (початкові умови $\hat{\omega}_0(0)=\hat{x}_a(0)=\hat{x}_b(0)=0$) представлено на рис. 3 у відносному часі для трьох налаштувань спостерігача з постійним $k=100$: 1) $\gamma^{-1}=1 \cdot 10^3$; 2) $\gamma^{-1}=2 \cdot 10^3$; 3) $\gamma^{-1}=3 \cdot 10^3$.

З рис. 3 слідує, що спостерігач забезпечує асимптотичне оцінювання частоти і компонент вектора двофазного сигналу зі швидкістю, пропорційною коефіцієнту γ^{-1} .

На другому етапі дослідження розглядається випадок з $\omega_0 \neq \text{const}$. Умовами тестування передбачено, що на початковому етапі $t=0 \dots 1$ с частота дорівнює $\omega_0(0)=6.28$ рад/с; в момент часу $t=1$ с частота збільшується лінійно з першою похідною рівною 3.14 рад/с² і в момент часу $t=3$ с досягає усталеного значення $\omega_0(t)=2\omega_0(0)=12.56$ рад/с. Налаштування спостерігача: $k=100$; 1) $\gamma^{-1}=1 \cdot 10^3$, 2) $\gamma^{-1}=2 \cdot 10^3$, початкові умови спостерігача нульові. З графіків перехідних процесів, які зображено на рис. 4, слідує, що асимптотичність оцінювання частоти і компонент вектора сигналу порушується за умови змінної частоти, проте статичну похибку оцінювання частоти можна зменшити за рахунок збільшення γ^{-1} .

На третьому етапі дослідження розглянуто випадок, коли в основному сигналі наявна вища гармоніка. В такому випадку гармонійний сигнал представляється у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x_a &= X_m \cos \omega_0 t + A_h \cos(\omega_{oh} t), \\ x_b &= X_m \sin \omega_0 t + A_h \sin(\omega_{oh} t), \end{aligned} \quad (27)$$

де A_h, ω_{oh} – амплітуда і частота вищої гармоніки.

Графіки перехідних процесів для оцінювання частоти сигналу (27) з $X_m=1, A_h=0.1$ і $\omega_{oh}=50\omega_0$ наведено на рис. 5 для наступного налаштування спостерігача: $\gamma^{-1}=200, k=25$. З рис. 5

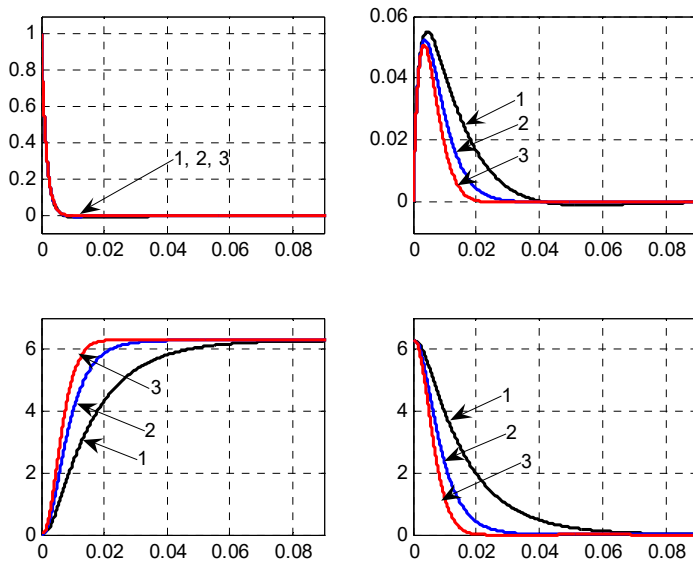


Рис. 3

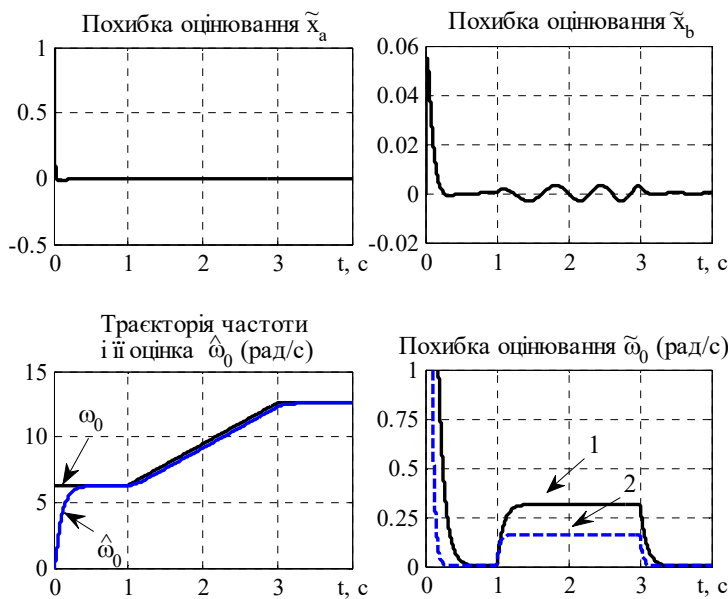


Рис. 4

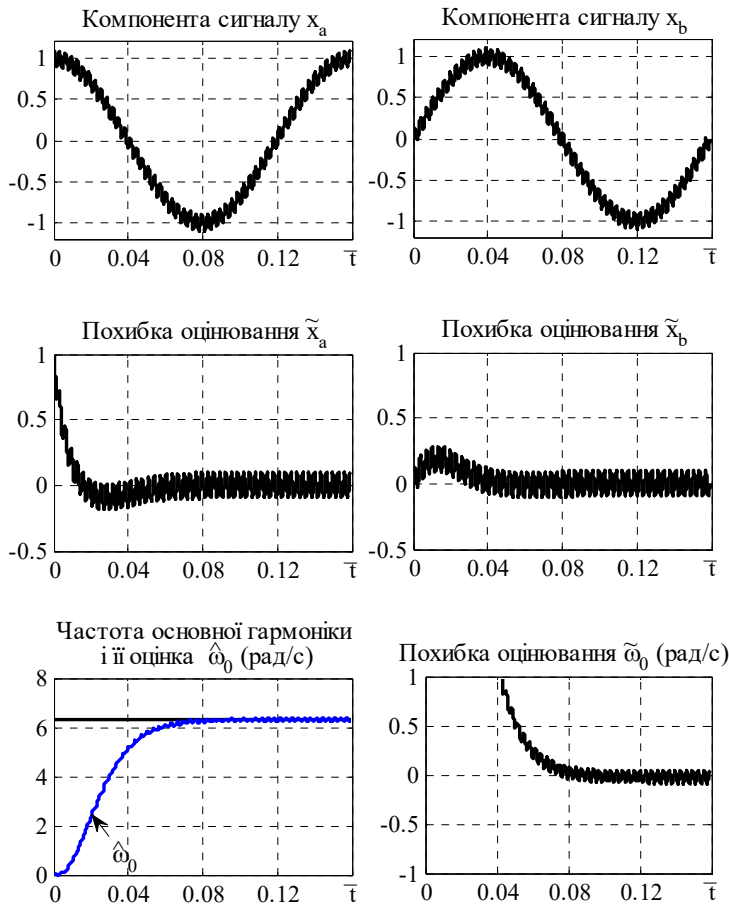


Рис. 5

ти \hat{x}_b в складовій $\hat{\omega}_0 \hat{x}_a$ замість оціненої частоти використовується реальна частота $(\omega_0 \hat{x}_a)$. Це відповідає умові $\nu = 0$, тому похідна від функції Ляпунова (19) є негативною. З порівняння графіків на рис. 6, а і б можна зробити висновок, що вплив збурення $\nu \neq 0$ є нехтувано малим за умови $k_1 \gg 1$.

встановлюємо, що у разі введення в оцінюваний сигнал збурення у вигляді вищої гармоніки, асимптотичність оцінювання координат x_a, x_b та частоти основної гармоніки ω_0 порушується. При цьому, після відпрацювання спостерігачем початкових умов траєкторії похибок оцінювання приймають вигляд гармонійних коливань з частотою вищої гармоніки.

Дослідження динаміки спостерігача частоти однофазного сигналу. Графіки динамічних режимів адаптивного спостерігача (14) під час оцінювання сигналу з амплітудою $X_m = 1$ і частотою $\omega_0 = 6.28$ рад/с представлено на рис. 6, а для налаштування спостерігача $k_1 = 10^3$; $\gamma^{-1} = 5.5 \cdot 10^4$; $\zeta = 1$ ($k = 159$) з початковими умовами $\hat{x}_a(0) = 0.9$; $\hat{x}_b(0) = 0$; $\hat{\omega}_0(0) = 1$ рад/с. З рис. 6, а слідує, що спостерігач забезпечує асимптотичне оцінювання миттєвих значень компонент сигналу і його частоти.

Для дослідження впливу збурення $\nu = -\omega_0 \hat{x}_a \tilde{\omega}_0$ в функції Ляпунова (19) на рис. 6, б показано графіки перехідних процесів для зміненої структури спостерігача, в якій в динаміці оціненої компоненти

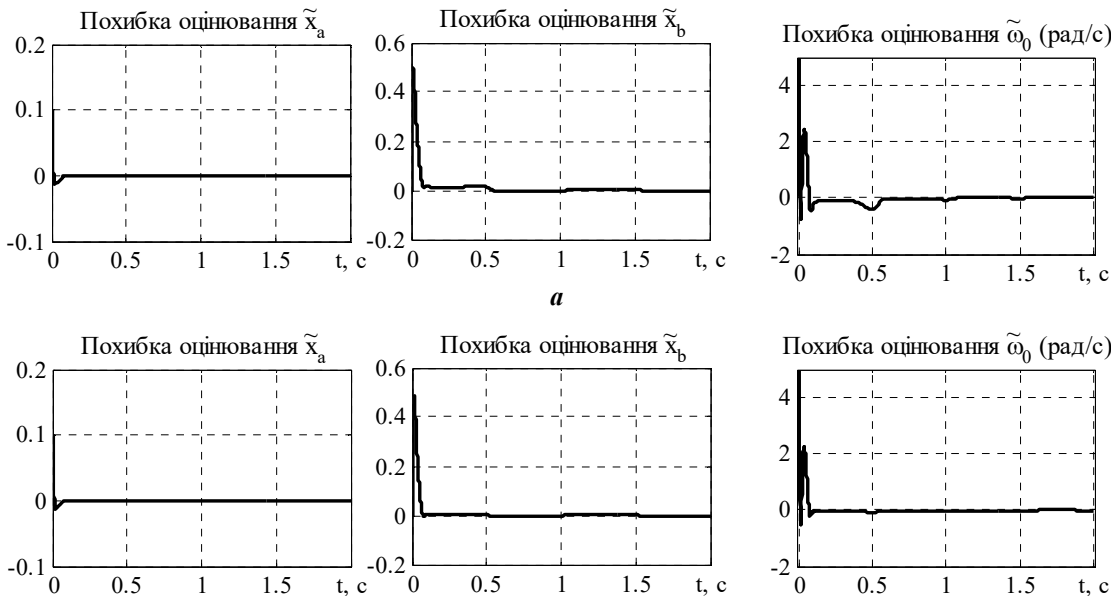


Рис. 6

На останньому етапі тестування досліджувався вплив $\omega_0 \neq \text{const}$. Умови тестування аналогічні до розглянутих на рис. 6 для спостерігача двофазного сигналу, проте з меншим кінцевим значенням частоти $\omega_0(t) = 7.54$ рад/с. Результати дослідження показано на рис. 7. З аналізу рис. 7 слідує, що асимптотичність оцінювання частоти і компонент вектора сигналу порушується за умови змінної частоти, проте поновлюється в усталеному режимі.

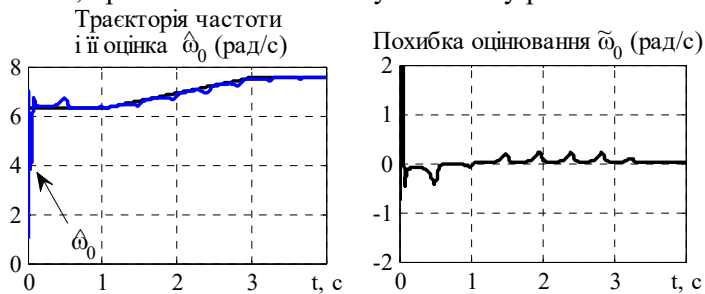


Рис. 7

Виникають внаслідок дії збурень, можуть бути доволіно зменшені за рахунок вибору коефіцієнтів налаштування. Спостерігач двофазного сигналу додатково забезпечує фільтрацію вимірюваних компонент вектора сигналу без фазового зсуву, завдяки чому оцінені значення частоти і амплітуди його вектора можуть використовуватися в системах керування, зокрема в координатних перетвореннях векторних алгоритмів керування.

Вперше синтезовано локально асимптотично стійкий спостерігач однофазного гармонічного сигналу. Спостерігач може бути використаний також для оцінювання частоти двофазного сигналу за умови вимірювання тільки однієї компоненти його вектору. Стійкість спостерігача однофазного сигналу доведено шляхом лінеаризації і використання теореми конверсії Ляпунова для збуреної системи. На основі розробленої методики налаштування коефіцієнтів зворотного зв'язку забезпечується розширення області стійкості спостерігача.

В порівнянні з існуючими аналогами розроблені спостерігачі мають менший порядок (3-й, в порівнянні з 10-м [5], 7-м [7] та 4-м [6]), не вимагають попередньої інформації про сигнал і його похідні, мають просту процедуру налаштування.

1. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999. Vol. 46. No 5. Pp. 960-971. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.793345>
2. Пересада С.М., Король С.В. Новая концепция управления входным преобразователем: формирование полнотной энергии преобразования. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність"*. 2002. № 1. С. 66-70.
3. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of a doubly fed induction machine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2003. Vol. 11. No 6. Pp. 875-888. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2003.819590>.
4. Hsieh G.-C., Hung J.C. Phase-locked loop techniques – a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43. No 6. Pp. 609-615. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.544547>
5. Marino R., Tomei P. Online frequency estimation of periodic signals. In: *Mathematical Control Theory*. Springer, 2015. Vol. 461. Pp 257-276. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-20988-3_14
6. Hsu L., Ortega R., Damm G. A globally convergent frequency estimator *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1999. Vol. 44. No 4. Pp. 698-713. DOI: <https://doi.org/10.1109/9.754808>
7. Hou M. Amplitude and frequency estimator of a sinusoid. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50. No 6. Pp. 855-858. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.849244>
8. Vedyakov A.A., VEDIKOVA A.O., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Aranovskiy S.V. A globally convergent frequency estimator of a sinusoidal signal with a time-varying amplitude. *European Journal of Control*. 2020. Vol. 38. Pp. 32-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2017.08.001>
9. Ahmed H., Pay M.L., Benbouzid M., Amirat Y., Elbouchikhi E. Gain normalized adaptive observer for three-phase system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 118. Pp. 1-14 (105821). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105821>
10. Пересада С.М., Диннік Т.В. Адаптивний спостерігач параметрів мережі живлення. *Оптическоелектронні інформаційно-енергетичні технології*. Вінниця: ВНТУ. 2013. № 2(26). С. 122-125.

11. Isidori A., Marconi L., Serrani A. *Robust autonomous guidance: an internal model-based approach*. Springer Verlag: London, 2003. 293 p.
12. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Благодир В.О., Дынник Т.В. Экспериментальное тестирование адаптивного наблюдателя параметров сети питания. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2014. № 37. С. 91-93.
13. Narendra K.S., Annaswamy A.M. *Stable adaptive systems*. New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 480 p.
14. Khalil H.K. *Nonlinear systems*. New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 734 p.

ADAPTIVE FREQUENCY OBSERVERS FOR TWO-PHASE AND SINGLE-PHASE HARMONIC SIGNALS

S.M. Peresada¹, Y.O. Nikonenko¹, S.M. Kovbasa¹, A. Kuznetsov²

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremohy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: sergei.peresada@gmail.com

²Technische Hochschule Mittelhessen,
Wilhelm-Leuschner-Straße 13 D, 61169 Friedberg, Germany.

An adaptive observer for frequency and magnitude of two-phase symmetrical sinusoidal signal is presented. It is designed based on control concept of internal model approach. The observer guarantees global exponential estimation and high performance. If the information about one of the two-phase signal components is missing, a modified structure of the observer is proposed. This case is equivalent to the measurement of a single-phase sinusoidal signal. The properties of local exponential stability of single-phase signal observer are proved using Lyapunov's conversion theorem for disturbed systems. The robustness of the two-phase signal observer with respect to additive disturbances (high-frequency noise, varying frequency) is confirmed by simulation results. It is shown that the observer estimation speed can be arbitrarily increased by increasing the feedback gains. A method for single-phase harmonic signal frequency observer tuning is developed, which ensures the expansion of the stability region. References 14, figures 7.

Keywords: adaptive observer, single-phase frequency estimation, asymptotic stability.

1. Singh B., Al-Haddad K., Chandra A. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. October 1999. Vol. 46. No 5. Pp. 960-971. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.793345>
2. Peresada S.M., Korol S.V. New control concept of AC-DC converter: total conversion energy formation. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue: Power electronics and energy efficiency*. 2002. No 1. Pp. 66-70. (Rus.)
3. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of a doubly fed induction machine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2003. Vol. 11. No 6. Pp. 875-888. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2003.819590>.
4. Hsieh G.-C., Hung J.C. Phase-locked loop techniques – a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43. No 6. Pp. 609-615. DOI: <https://doi.org/10.1109/41.544547>
5. Marino R., Tomei P. Online frequency estimation of periodic signals. In: *Mathematical Control Theory*. Springer, 2015. Vol. 461. Pp 257-276. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-20988-3_14
6. Hsu L., Ortega R., Damm G. A globally convergent frequency estimator. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1999. Vol. 44. No 4. Pp. 698-713. DOI: <https://doi.org/10.1109/9.754808>
7. Hou M. Amplitude and frequency estimator of a sinusoid. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2005. Vol. 50. No 6. Pp. 855-858. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.849244>
8. Vedyakov A.A., Vediakova A.O., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Aranovskiy S.V. A globally convergent frequency estimator of a sinusoidal signal with a time-varying amplitude. *European Journal of Control*. 2020. Vol. 38. Pp. 32-38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2017.08.001>
9. Ahmed H., Pay M.L., Benbouzid M., Amirat Y., Elbouchikhi E. Gain normalized adaptive observer for three-phase system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 118. Pp. 1-14 (105821). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105821>
10. Peresada S.M., Dynn timer T.V. Adaptive observer of parameters of power network. *Optoelectronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*. Vinnitsya: VNTU. 2013. Vol. 26. No 2. Pp. 122-125. (Ukr.)
11. Isidori A., Marconi L., Serrani A. *Robust autonomous guidance: an internal model-based approach*. Springer Verlag: London, 2003. 293 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0011-9>
12. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Blagodir V.O., Dynn timer T.V. Experimental study of mains supply parameters adaptive observer. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. Vol. 37. Pp. 91-93. (Rus.)
13. Narendra K.S., Annaswamy A.M. *Stable adaptive systems*. New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 480 p.
14. Khalil H.K. *Nonlinear systems*. New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 734 p.

Надійшла 28.07.2022

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТИПОВИХ ЦИФРОВИХ СТАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Ю.В. Шуруб*, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: yvshur@ukr.net

Статтю присвячено розробці та дослідженню підходів до визначення параметрів налаштування типових цифрових статичних регуляторів промислових електроприводів, що можуть бути подані у вигляді дискретних передатних функцій у Z-перетворенні. Пропонується визначати параметри налаштування статичних регуляторів, виходячи із заданої статичної похибки (статизму). Обґрунтовується можливість технічної реалізації цифрового пропорційно-диференціального регулятора з ідеальним цифровим диференціатором. Показано значне покращення показників якості системи у разі використання диференціальної складової цифрового статичного регулятора. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: регульований електропривод, цифровий регулятор, статичні закони керування, показники якості.

Вступ. Сучасні регулятори промислових електроприводів будуються на основі мікропроцесорних приладів та є цифровими. Найпростіші закони керування реалізуються типовими регуляторами, в яких керуюча дія лінійно залежить від відхилення регульованого сигналу від заданого (пропорційна складова – П), його інтеграла (інтегральна складова – І) та першої похідної за часом (диференціальна складова – Д). Системи автоматичного регулювання (САР) з типовими регуляторами поділяються на астатичні, в яких завдяки наявності у регуляторі інтегральної складової статична похибка дорівнює нулю, та статичні, в яких інтегральна складова у регуляторі відсутня, внаслідок чого САР має кінцеву статичну похибку. Наявність інтегральної складової у складі астатичних регуляторів зменшує запаси стійкості системи автоматичного регулювання, що може призвести до значної коливальності системи у разі змінних у часі збурюючих діях. У деяких випадках через значні діапазони зміни навантаження протягом технологічного циклу є доцільним використання статичних регуляторів для таких механізмів як компресори, змішувачі, зернодробарки, що працюють за динамічних навантажень, що змінюються за періодичними [1] та стохастичними [2] законами. При цьому найбільш поширеним методом аналізу роботи цифрових регуляторів є метод Z-перетворення, але методи їхнього синтезу саме у разі подання цифрової системи у Z-перетворенні є не настільки розвиненими як методи синтезу неперервних типових регуляторів через застосування диференціальних рівнянь динаміки електроприводу та перетворення Лапласа [3-8], в яких не враховується дискретність регулятора. Для астатичних цифрових регуляторів існує методика синтезу за заданою добротністю за швидкістю [9], що базується на компенсації полюсів дискретної передатної функції об'єкта керування. Для статичних регуляторів можливість застосування цієї методики залишається невизначеною.

Метою роботи є визначення процедури синтезу цифрових регуляторів промислових електроприводів, що реалізують типові статичні закони керування, яка дає змогу врахувати дискретний характер проходження сигналів через ці регулятори.

Об'єкт керування. В роботі розглядається система стабілізації швидкості обертання валу двигуна. САР має статичний об'єкт керування, що не містить інтегруючої ланки. Датчик кутової швидкості двигуна вважається безінерційним з одиничним коефіцієнтом передачі, неперервним або дискретним з періодом квантування, що дорівнює періоду квантування цифрового регулятора.

Для універсальності підходу до синтезу типових регуляторів пошук оптимальних параметрів їхнього налаштування здійснюватимемо за визначенням показників якості перехідної характеристики за сталого одиничного сигналу завдання та неврахуванні сигналу збурення, а потім проаналізуємо вплив дії навантаження на точність системи з вже визначеними параметрами налаштування регулятора. Розрахунки будемо проводити у відносних одиницях, приймаючи за базові значення швидкості обертання ω швидкість холостого ходу ω_0 , для моменту навантаження M – номінальний момент двигуна M_n .

Для визначення етапів процедури синтезу цифрових типових регуляторів розглянемо узагальнену передатну функцію регульованих електроприводів за керуючою дією [8]

$$W_{ок}(s) = (T_e T_M s^2 + T_M s + 1)^{-1}, \quad (1)$$

де T_e – електромагнітна стала часу; T_M – електромеханічна стала часу.

До такої передатної функції можуть бути зведені з деякими припущеннями регульовані за напругою електроприводи постійного струму з незалежним збудженням, вентильні електроприводи та асинхронні електроприводи з частотним скалярним керуванням. Вхідним керуючим сигналом у даному випадку є кутова швидкість холостого ходу ω_0 , що визначається напругою живлення електроприводів постійного струму та вентильних, частотою живлення асинхронних електроприводів. У роботі розрахунки проводяться для частотно регульованого двигуна 4A112M2 потужністю 7,5 кВт за $T_e = 0,09$ сек, $T_M = 0,68$ сек. Тоді передатна функція об'єкту керування матиме вигляд

$$W_{ок}(s) = (0,0612s^2 + 0,68s + 1)^{-1}. \quad (2)$$

Для проведення синтезу цифрової системи регулювання у Z-перетворенні знайдемо за допомогою таблиці Z-перетворень [10] дискретну передатну функцію об'єкту, що вміщує також фіксатор нульового порядку, при періоді квантування $T = 0,001$ сек

$$W_{ок}(z) = \frac{0,00000814z + 0,00000811}{z^2 - 1,988954z + 0,98897}. \quad (3)$$

Синтез систем із статичними регуляторами. Під статичними будемо розуміти регулятори, що не мають інтегральної складової та реалізують пропорційний (П-регулятори) і пропорційно-диференціальний (ПД-регулятори) закони керування.

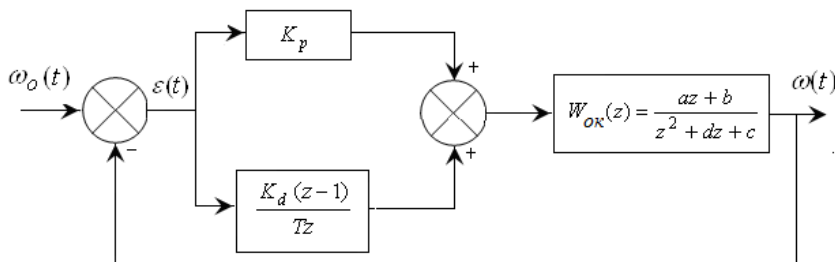


Рис. 1

Цифрова система автоматичного регулювання складається з регулятора та об'єкта керування. Структурну схему такої системи [9] з найбільш універсальним типовим статичним цифровим ПД-регулятором наведено на рис. 1.

Задля можливості застосування методу компенсації полюсів дискретної передатної

функції об'єкта керування (3) вона повинна подаватися у такому вигляді

$$W_{ок}(z) = \frac{az + b}{(z - z_1)(z - z_2)} = \frac{0,00000814z + 0,00000811}{(z - 0,9982563)(z - 0,9906977)}, \quad (4)$$

де $z_1 = \frac{-2c}{d + \sqrt{d^2 - 4c}} = 0,9982563$, $z_2 = -\frac{d + \sqrt{d^2 - 4c}}{2} = 0,9906977$ – полюси дискретної передатної функції об'єкта керування.

Згідно з виразом для передатної функції розімкненої системи $W_{роз}(z) = W_{рег}(z) \cdot W_{ок}(z)$ коефіцієнти налаштування можуть бути визначені таким чином, щоб нулі передатної функції регулятора компенсували полюси передатної функції об'єкта.

Розглянемо окремо синтез двох згаданих типів статичних цифрових регуляторів.

1) П-регулятор. Дискретна передатна функція П-регулятора збігається з передатною функцією неперервного П-регулятора

$$W_{рег}(z) = K_p. \quad (5)$$

Передатна функція регулятора не має нулів, відповідно компенсація полюсів передатної функції об'єкта у разі використання П-регулятора є неможливою.

П-регулятор має один параметр налаштування – K_p . З'ясуємо, чи можливо для його визначення використовувати поняття добротності за швидкістю K_v , що рекомендується як заданий

показник якості у [9], та яка визначається як відношення швидкості зміни вхідного сигналу $\frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} = \dot{x}_{\text{вх}}$ до усталеної похибки $\Delta x_{\text{уст}}$

$$K_V = \dot{x}_{\text{вх}} / \Delta x_{\text{уст}} . \quad (6)$$

За лінійної зміни вхідного сигналу $x_{\text{вх}}(t) = kt$. Тоді швидкість $\dot{x}_{\text{вх}} = \text{const} = k$.

За методикою [9] можна показати, що добротність за швидкістю систем з П- та ПД-регуляторами буде дорівнювати

$$K_V = \frac{\dot{x}_{\text{вх}}}{\Delta x_{\text{уст}}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1)K_p W_{\text{ок}}(z)] = 0. \quad (7)$$

Отже, за лінійної зміни вхідного сигналу $x_{\text{вх}}(t) = kt$ усталена похибка прямуватиме до нескінченності: $\Delta x_{\text{уст}} = k / K_V \rightarrow \infty$.

У разі східчастої вхідної дії $x_{\text{вх}}(t) = k \cdot 1(t)$ швидкість зміни вхідного сигналу $\frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} = \dot{x}_{\text{вх}} = k \cdot \delta(t)$, де $\delta(t)$ – одинична імпульсна функція Дірака та за $t > 0$ дорівнює нулю.

Виразивши з (6) усталену похибку, що визначається добротністю за швидкістю, отримаємо невизначеність 0/0. Отже для синтезу статичних регуляторів використання такого показника як добротність за швидкістю не має сенсу.

Відзначимо, що добротність за швидкістю визначається як величина, обернена коефіцієнту похибки за швидкістю C_1 у разі подання динамічної похибки $\Delta x(t)$ у вигляді нескінченного ряду [10]

$$\Delta x(t) = C_0 \cdot x_{\text{вх}}(t) + C_1 \cdot \frac{dx_{\text{вх}}(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \cdot \frac{d^2 x_{\text{вх}}(t)}{dt^2} + \dots \quad (8)$$

Через нульове значення K_V коефіцієнт похибки за швидкістю C_1 , що присутній у формулі (8), прямуватиме до нескінченності як і усі коефіцієнти похибки вищого порядку C_2, C_3, C_4, \dots . Це підтверджує, що усталена похибка у системі з П-регулятором матиме кінцеве значення тільки у разі східчастої вхідної дії $x_{\text{вх}}(t) = k \cdot 1(t)$, усі похідні від якої за $t \rightarrow \infty$ дорівнюватимуть нулю. Відповідно, дорівнюватимуть нулю усі члени першого та вищого порядку ряду (8). У цьому випадку усталена похибка дорівнюватиме

$$\Delta x_{\text{уст}}(t) = C_0 \cdot x_{\text{вх}}(t). \quad (9)$$

Коефіцієнт C_0 має назву статизм [10] та у разі одиничної східчастої дії $x_{\text{вх}}(t) = 1(t)$ за $t \rightarrow \infty$ дорівнює статичній похибці, що у загальному випадку відрізняється від усталеної похибки $\Delta x_{\text{уст}}$, яка визначається в усталеному режимі за будь-якого виду вхідної дії. Знайдемо статизм (статичну похибку) системи з П-регулятором за допомогою Z-зображення динамічної похибки та теореми про кінцеве значення Z-перетворення [10].

Згідно з (9) статизм визначається як відношення усталеної похибки $\Delta x_{\text{уст}}$ до східчастого вхідного сигналу $x_{\text{вх}}(t) = k \cdot 1(t)$

$$C_0 = \Delta x_{\text{уст}} / x_{\text{вх}}(t). \quad (10)$$

Z-зображення вхідного сигналу згідно з [10] $X_{\text{вх}}(z) = kz / (z-1)$. Z-зображення динамічної похибки від сигналу завдання має вигляд

$$\Delta X(z) = \frac{X_{\text{вх}}(z)}{1 + W_{\text{роз}}(z)} = \frac{X_{\text{вх}}(z)}{1 + W_{\text{рег}}(z)W_{\text{ок}}(z)}. \quad (11)$$

Усталена похибка від сигналу завдання згідно з теоремою про кінцеве значення Z-перетворення буде дорівнювати

$$\Delta x_{\text{уст}} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \Delta X(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{X_{\text{вх}}(z)}{1 + W_{\text{рег}}(z)W_{\text{ок}}(z)} = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{\frac{kz}{z-1}}{1 + W_{\text{рег}}(z)W_{\text{ок}}(z)} = \frac{k}{1 + \lim_{z \rightarrow 1} W_{\text{рег}}(z)W_{\text{ок}}(z)}. \quad (12)$$

Враховуючи, що за $t \rightarrow \infty$ $x_{\text{вх}}(t) = k$, а $W_{\text{рег}}(z) = K_p$ отримаємо значення статизму

$$C_0 = \frac{\Delta x_{уст}}{x_{вх}(t)} = \frac{1}{1 + K_p \lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)}. \quad (13)$$

Отже, коефіцієнт налаштування П-регулятора однозначно пов'язаний із заданим статизмом. Для спрощення можна ввести коефіцієнт $K_x = K_p \lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)$, що у [9] названо коефіцієнтом похибки за положенням. Коефіцієнт похибки за положенням та статизм пов'язані між собою як

$$K_x = C_0^{-1} - 1. \quad (14)$$

Коефіцієнт П-регулятора визначається за формулою

$$K_p = \frac{C_0^{-1} - 1}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)} \quad \text{або} \quad K_p = \frac{K_x}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)}. \quad (15)$$

Отже, коефіцієнт налаштування П-регулятора можна визначити за заданою статичною похибкою. Якщо необхідно забезпечити статичну похибку (статизм) 0,01 або 1%, що є розповсюдженою вимогою до багатьох статичних систем регулювання, то коефіцієнт похибки за положенням повинен бути $K_x = 99$. Для заданих у даній роботі параметрів електроприводу

$$K_p = \frac{K_x}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)} = \frac{99}{1,0018236} = 98,82. \quad (16)$$

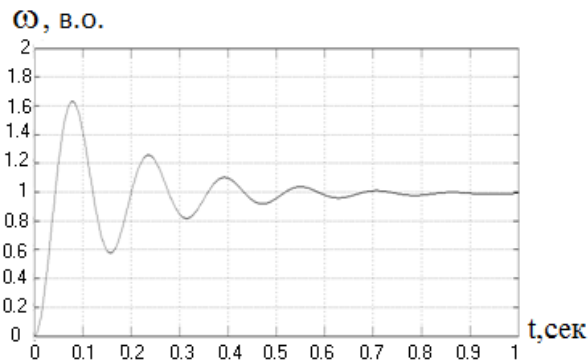


Рис. 2

Перехідну характеристику системи з П-регулятором наведено на рис. 2. При цьому динамічні показники якості, такі як перерегулювання та час регулювання, за умови забезпечення заданої статичної похибки $C_0 = 0,01$ не є оптимальними, проте в деяких випадках такі динамічні показники задовольняють вимогам під час налаштування САР. На рис. 3 наведено залежності перерегулювання σ (а), часу регулювання t_p (б) та коефіцієнту K_p (в) від заданого значення статичної похибки C_0 .

Але саме під час використання цифрового статичного регулятора ці показники можна значно покращити без погіршення точності за рахунок введення до закону керування диференціальної складової, що реалізується цифровим диференціатором. Таким чином ми отримаємо пропорційно-диференціальний (ПД) регулятор.

2) ПД-регулятор. Для систем з неперервними регуляторами існує проблема технічної реалізації пропорційно-диференціального закону керування. Передатна функція неперервного ПД-регулятора має наступний вигляд:

$$W_{рег}(s) = K_d s + K_p. \quad (17)$$

Згідно з положеннями теорії автоматичного керування умовою технічної реалізації будь-якої динамічної ланки є неперевикнення порядком поліному чисельника передатної функції ланки порядку

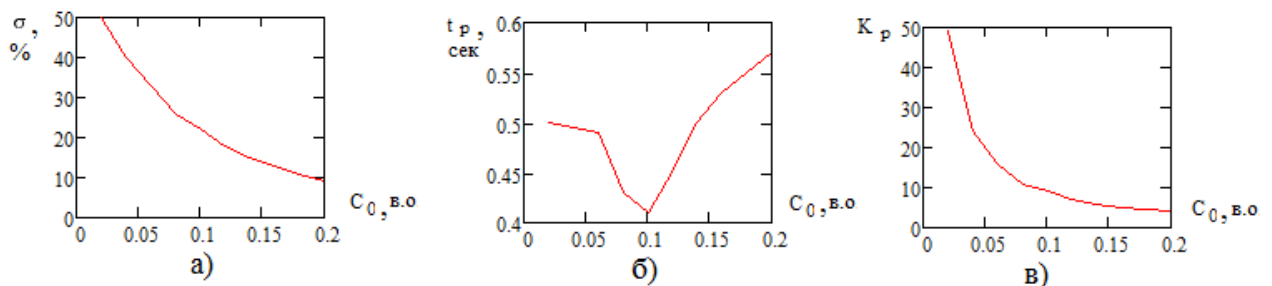


Рис. 3

поліному знаменника. У передатній функції неперервного ПД-регулятора порядок поліному чисельника дорівнює одиниці та перевищує порядок поліному знаменника, що дорівнює нулю. Отже, ідеальний неперервний ПД-регулятор не може бути технічно реалізований. Зазвичай ідеальну диференціюючу ланку доповнюють інерційною ланкою з малою постійною часу T_d , отримуючи так званий реальний диференціатор

$$W_{\text{пер}}(s) = K_d s / (T_d s + 1), \quad (18)$$

що однак спотворює закон керування та обмежує застосування неперервних ПД-регуляторів.

Дискретна передатна функція цифрового ПД-регулятора згідно з рис. 1

$$W_{\text{пер}}(z) = K_p + \frac{K_d(z-1)}{Tz} = \frac{K_p T + K_d}{Tz} \times \left(z - \frac{K_d}{K_p T + K_d} \right). \quad (19)$$

З (19) видно, що порядок поліному чисельника дорівнює порядку поліному знаменника (одиниці). Отже, ідеальний цифровий диференціатор може бути реалізований без спотворення.

Статична похибка, як і для систем з П-регулятором, визначається формулою (13). Відповідно, коефіцієнт пропорційної складової регулятора K_p визначається за формулами (15), виходячи із заданої статичної похибки. Коефіцієнт K_d визначаємо таким чином, щоб нуль передатної функції ПД-регулятора компенсував би один з полюсів (більший за модулем) дискретної передатної функції об'єкта керування

$$K_d / (K_p T + K_d) = z_1. \quad (20)$$

Звідси
$$K_d = \frac{K_p T z_1}{1 - z_1} = \frac{98,82 \cdot 0,001 \cdot 0,9982563}{1 - 0,9982563} = 56,57377. \quad (21)$$

Перехідну характеристику системи з ПД-регулятором подано на рис. 4.

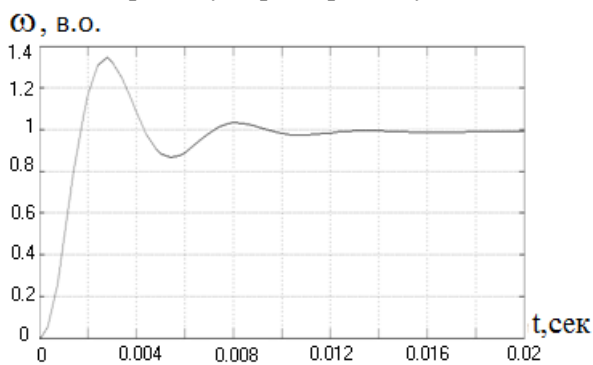


Рис. 4

Порівнюючи її з графіком на рис. 2, можна відзначити покращення динамічних показників якості системи з ПД-регулятором відносно системи з П-регулятором. Зокрема, за умови забезпечення однакової статичної похибки $C_0 = 0,01$ час регулювання зменшився з 0,5 сек до 0,015 сек, перерегулювання зменшилося з 62 % при П-регуляторі до 31 % при ПД-регуляторі.

На рис. 5 показано залежності перерегулювання σ (а), часу регулювання t_p (б) та коефіцієнту K_d (в) від заданого значення статичної похибки C_0 системи з ПД-регулятором. Залежність коефіцієнту K_p така ж, як у системи з П-регулятором

(рис. 3, в).

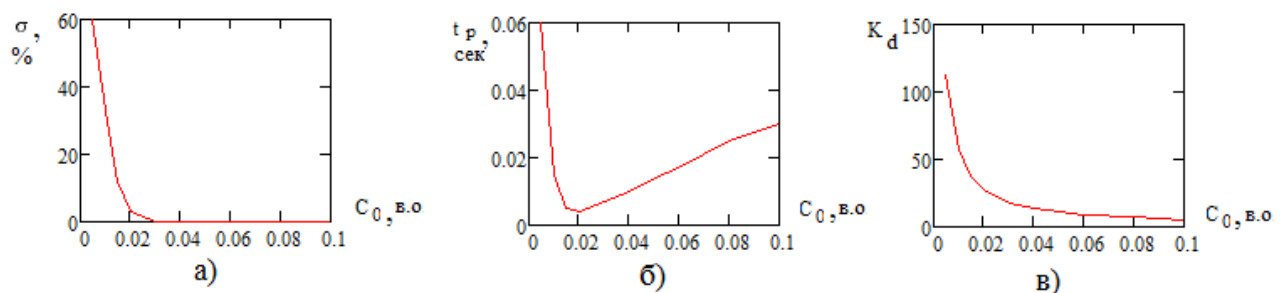


Рис. 5

З рис. 5, б видно, що мінімальне значення часу регулювання досягається за значно меншою статичною похибкою ($C_0 = 0,02$), ніж у системі з П-регулятором ($C_0 = 0,1$) (рис. 3, б) за кращих оптимальних значень динамічних показників якості.

Загалом слід зазначити, що в статичних САР існують протиріччя між вимогами до статичної похибки та динамічних показників якості, що у кожному конкретному випадку вимагає шукати компромісні з технологічними умовами роботи електроприводу налаштування регуляторів.

Вплив збурення на похибку регулювання. Точність стабілізації кутової швидкості двигуна за динамічних навантажень визначається похибкою, що має дві складові, одна з яких обумовлена дією сигналу завдання швидкості, а друга – дією змінного сигналу збурення. Друга складова похибки за таких навантажень є змінною у часі величиною та може бути оцінена для кожного конкретного виду навантаження за допомогою додаткових показників якості, наприклад, середньоквадратичного або максимального відхилень вихідного сигналу від заданого [2]. Для найпростішого випадку ступеневого накиду механічного навантаження є можливість чисельно оцінити сталі значення похибки, яка з'являється через дію збурення.

Оскільки розглядається цифрова система керування, аналіз впливу збурення будемо проводити за допомогою Z-перетворення. Z-зображення складової динамічної похибки від сигналу збурення має вигляд

$$\Delta(z) = \frac{W_{ок}^f(z)}{1 + W_{роз}(z)} \cdot f(z) = \frac{W_{ок}^f(z)}{1 + W_{рег}(z)W_{ок}(z)} \cdot f(z). \quad (22)$$

У (22) $W_{ок}^f(z)$ – дискретна передатна функція об'єкту керування за збуренням. Передатна функція об'єкту керування за збуренням у перетворенні Лапласа вказаних вище типів електроприводів з лінеаризованою механічною характеристикою визначається наступною формулою [8]:

$$W_{ок}^f(s) = \frac{K_f(T_e s + 1)}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (23)$$

де K_f – коефіцієнт передачі електродвигуна за збуренням, що є обернено пропорційною величиною до жорсткості механічної характеристики.

Для обраного двигуна $K_f = 0,025$ у разі лінеаризації його механічної характеристики біля точки номінального навантаження. Тоді передатна функція об'єкту керування матиме вигляд

$$W_{ок}^f(s) = \frac{0,025 \cdot (0,09s + 1)}{0,0612s^2 + 0,68s + 1}. \quad (24)$$

За допомогою таблиці Z-перетворень [10] знайдемо дискретну передатну функцію об'єкту керування за збуренням

$$W_{ок}^f(z) = \frac{0,025 \cdot (0,001471z - 0,001454)}{z^2 - 1,988954z + 0,98897}. \quad (25)$$

Z-зображення ступеневого сигналу збурення згідно з [10] $f(z) = \frac{Mz}{z-1}$, де M – сталий момент навантаження. Усталена похибка від сигналу збурення згідно з теоремою про кінцеве значення Z-перетворення буде дорівнювати

$$\Delta = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \Delta(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{W_{ок}^f(z)}{1 + W_{рег}(z)W_{ок}(z)} \cdot f(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{W_{ок}^f(z)}{1 + \left(K_p + \frac{K_d(z-1)}{Tz} \right) W_{ок}(z)} \cdot \frac{Mz}{z-1} = \frac{M \cdot \lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}^f(z)}{1 + K_p \cdot \lim_{z \rightarrow 1} W_{ок}(z)}. \quad (26)$$

Для заданих у даній роботі параметрів електроприводу

$$\Delta = \frac{M \cdot 0,0265625}{1 + K_p \cdot 1,0018236}. \quad (27)$$

Таким чином, з (27) видно, що статична похибка, викликана збуренням, залежить від моменту навантаження та коефіцієнту передачі П-складової регулятора. На рис. 6, а подано розраховану за (27) залежність цієї статичної похибки від моменту навантаження $\Delta(M)$ за коефіцієнта $K_p = 98,82$, що згідно з (16) забезпечує статизм 0,01. На рис. 6, б наведено також розраховану за (27) залежність статичної похибки, викликаної збуренням, від коефіцієнта передачі П-складової $\Delta(K_p)$ за номінального навантаження у відносних одиницях $M=1$.

Аналогічні результати було отримано під час моделювання у MATLAB за допомогою структурної схеми, поданої на рис. 7. На даній моделі об'єкт керування представлений неперервними елементами *Transfer Fcn* та *Gain2* у перетворенні Лапласа, пропорційна складова регулятора – елементом *Gain* та фіксатором нульового порядку *Zero-Order Hold*, а диференціальна складова

цифрового ПД-регулятора – елементом *Gain1* та дискретним елементом *Discrete Transfer Fcn* у Z-перетворенні.

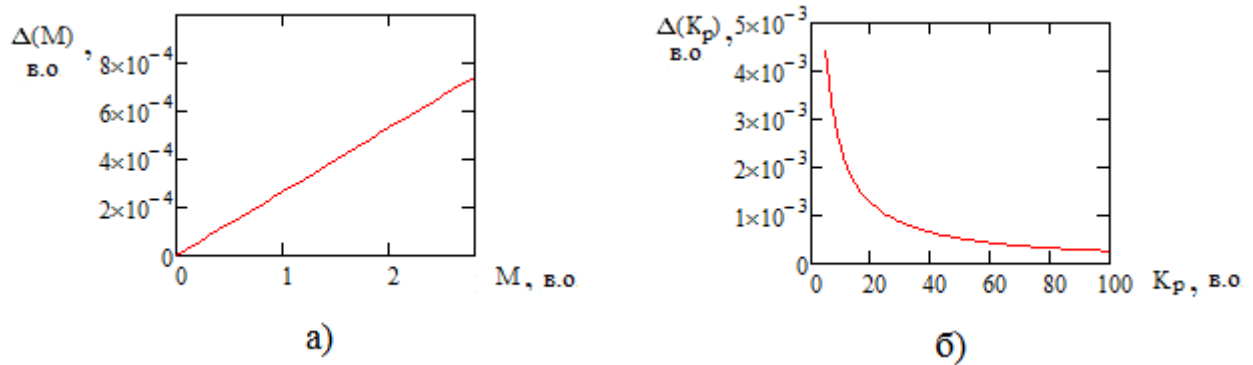


Рис. 6

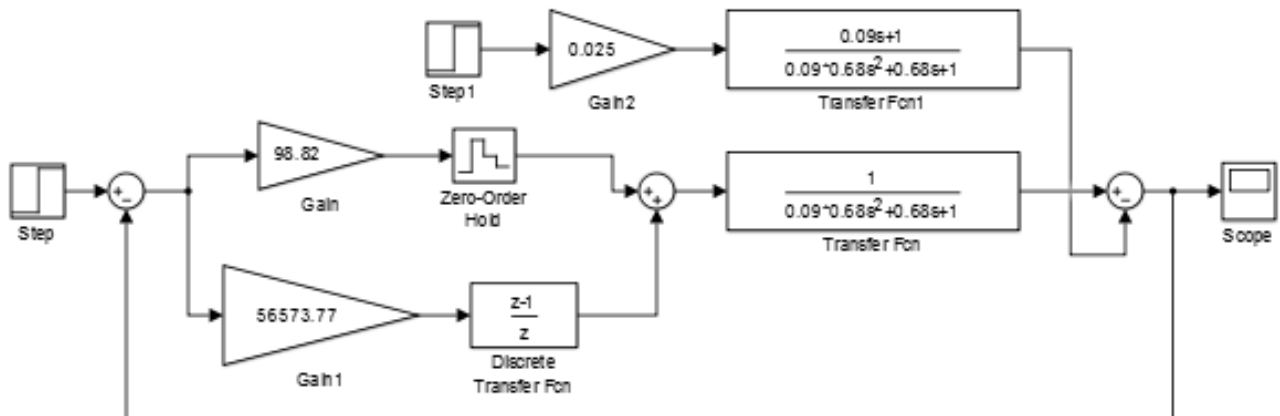


Рис. 7

З рис. 6 видно, що за номінального моменту навантаження за $K_p=98,82$ статична похибка, викликана збуренням, дорівнюватиме $\Delta=0,00025$, що складає 2,5% від статичної похибки, обумовленої дією сигналу завдання, $C_0 = 0,01$. Сумарна статична похибка для даного електроприводу за номінального навантаження дорівнюватиме 0,01025 або 1,025%.

Висновки.

Розглянуто методику синтезу типових цифрових статичних регуляторів промислових електроприводів. Запропоновано визначати коефіцієнт пропорційної складової статичних (П-, ПД-) регуляторів за заданою статичною похибкою, а коефіцієнт диференціальної складової ПД-регуляторів визначати таким чином, щоб компенсувати один полюс дискретної передатної функції об'єкта керування. Показано можливість технічної реалізації цифрового пропорційно-диференціального регулятора з ідеальним цифровим диференціатором на відміну від неперервного ПД-регулятора, у якому ідеальне диференціювання не може бути технічно реалізовано. Відповідно обґрунтовано доцільність застосування саме цифрового ПД-регулятора, що покращує показники якості електроприводу порівняно з застосуванням П-регулятора.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем” (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U007715, КПКВК 6541030.

1. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
2. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Lavinskiy D. Application of a Kalman filter in scalar form for discrete control of electromechanical systems. *IEEE International Conference on Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, September 21-25, 2020. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>.
3. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.

4. Dymko S., Peresada S., Leidhold R. Torque control of saturated induction motors with torque per Ampere ratio maximization. IEEE International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, June 02-06, 2014. Pp. 251-256. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874189>.
5. Jakovljević B.B., Rapačić M.R., Jelčić Z.D., Šekara T.B. Optimization of fractional PID controller by maximization of the criterion that combines the integral gain and closed-loop system bandwidth. 18th International Conference on *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. Sinaia, Romania, October 17-19, 2014. Pp. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2014.6982392>.
6. Zigirkas G., Kalomiros J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. 5th International Conference on *Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*. Thessaloniki, Greece, May 12-14, 2016. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MOCASST.2016.7495119>.
7. Romasevych Y., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. *Cybernetics And Information Technologies*. 2018. No 18(3). Pp. 62-74. DOI: <https://doi.org/10.2478/cait-2018-0039>.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
9. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.
10. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теория автоматического керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF TYPICAL DIGITAL STATIC REGULATORS OF INDUSTRIAL ELECTRIC DRIVES

Yu.V. Shurub

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: yvshur@ukr.net**

The paper is devoted to the development of an analytical method for determining the settings of typical digital static regulators of industrial electric drives, which can be represented as discrete transfer functions in the Z-transform. It is offered to define parameters of adjustment of static regulators, proceeding from the set static error (statism). The possibility of technical realization of the digital proportional-differential regulator with an ideal digital differentiator is substantiated. Significant improvement of system performance indexes when using the differential component of a digital static controller is shown. References 10, figures 7.

Keywords: regulated electric drive, digital regulator, static control laws, quality indicators.

1. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33-39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
2. Shurub Y., Dudnyk A., Vasilenkov V., Lavinskiy D. Application of a Kalman filter in scalar form for discrete control of electromechanical systems. IEEE International Conference on *Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, September 21-25, 2020. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>.
3. Leonard W. Control of electric drives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001. 460 p.
4. Dymko S., Peresada S., Leidhold R. Torque control of saturated induction motors with torque per Ampere ratio maximization. IEEE International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, June 02-06, 2014. Pp. 251-256. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874189>.
5. Jakovljević B.B., Rapačić M.R., Jelčić Z.D., Šekara T.B. Optimization of fractional PID controller by maximization of the criterion that combines the integral gain and closed-loop system bandwidth. 18th International Conference on *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. Sinaia, Romania, October 17-19, 2014. Pp. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2014.6982392>.
6. Zigirkas G., Kalomiros J. Voltage control of single-phase induction motors using asymmetrical PWM and fuzzy logic. 5th International Conference on *Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*. Thessaloniki, Greece, May 12-14, 2016. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MOCASST.2016.7495119>.
7. Romasevych Y., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. *Cybernetics And Information Technologies*. 2018. No 18(3). Pp. 62-74. DOI: <https://doi.org/10.2478/cait-2018-0039>.
8. Klichev V.I. Theory of electric drive: textbook for universities. Moskva: Energoatomizdat, 2001. 704 p. (Rus)
9. Kuo B. Digital control systems. New York: Oxford University Press, 1995. 751 p.
10. Popovych M.G., Kovalchuk O.V. Theory of automatic control: textbook. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)

Надійшла 01.06.2022
Остаточний варіант 21.07.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ ІЗ ДВОРІВНЕВИМИ СТОЯКАМИ

О.М. Попович^{1*}, докт. техн. наук, Р.В. Яшин^{2**}

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

E-mail: popovich1955@ukr.net.

² НТУ України «КПІ ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Досліджено вплив структури електромеханічної системи водопостачання багатоповерхового будинку на її енергетичну ефективність. Надано кількісну оцінку зменшення корисної дії системи порівняно із подачею води на останній поверх в залежності від кількості поверхів. Розроблено комплексну математичну модель системи з одним та двома стояками (асинхронний двигун – насос – розгалужена гідравлічна мережа) із визначенням параметрів робочих режимів з урахуванням взаємного впливу складових системи. Кількісно оцінено величину критерію ефективності системи як відношення потенційної енергії води у споживача до спожитої енергії. Електромеханічна система водопостачання багатоповерхового будинку із двома рівнями стояків споживає енергії на 30 % менше, ніж система з одним стояком, завдяки зменшенню величини надлишкових напорів у споживачів нижніх поверхів і втрат у двигуні. Бібл. 12, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, паралельне зонування системи водопостачання, енергоефективність.

Мережі водопостачання є потужними споживачами енергії у великих містах, а 40% витраченої на водопостачання енергії використовується на споживання насосами у будівлях [1], при цьому частка споживання енергії збільшується із збільшенням висоти будівлі. У Гонконзі, де середня висота будівлі більша за двадцять поверхів, для зменшення енергозатрат на підйом води поширені системи водопостачання з баками для акумулювання води: є системи з баками для збору води тільки на даху і є системи із баками на проміжних поверхах – каскадні системи водопостачання [1]. Такі системи вимагають окремих, спеціально облаштованих, технічних приміщень. За таких систем витрати енергії зменшуються завдяки забезпеченню високого ККД насосного агрегату у дискретному режимі наповнення баку. Аналогічну мету досягають й іншим підходом до зменшення енерговитрат на постачання води – за постачання змінною кількістю насосів. Ідея такого дискретного регулювання полягає у тому, щоб вмикати і вимикати насоси в залежності від потреб реального споживання: в пікові години збільшувати кількість працюючих насосів, а у разі зменшення навантаження – відключати. Як зазначено в [2], економія енергії за такого підходу складала 33,1%. Також високу енергоефективність насосного агрегату в умовах зміни водоспоживання забезпечує застосування систем регульованого приводу насосів із зміною напору насоса через зміну подачі [3].

Наведені приклади заходів з підвищення енергоефективності забезпечують високу енергоефективність насосного агрегату, але при цьому залишається проблема надлишковості гідравлічного напору у деяких споживачів розгалуженої системи водопостачання багатоповерхового будинку. Розгалужені системи водопостачання знаходять широке застосування у промисловості, житлово-комунальному та сільському господарствах. Характерним прикладом є електромеханічна система (ЕМС) водопостачання багатоповерхового будинку. Режими роботи таких систем пов'язані із надлишковістю гідравлічного напору у деяких споживачів внаслідок різної величини втрат у ділянках гідравлічної мережі насос – споживач, а також із вимогами до насосного агрегату стосовно забезпечення мінімально допустимим напором найбільш віддаленого споживача. Зниження надлишковості напорів досягають зонуванням (у випадку будинку – за висотою) водопровідних мереж: послідовним, коли насос кожної зони пропускає воду всіх споживачів, вищих рівнів за нього; паралельним, якщо вода до кожної зони потрапляє окремим стояком [4]. Перший випадок ускладнюється потребою у додаткових насосних приміщеннях, другий – у додаткових стояках.

Внаслідок надлишковості напорів, як показано у роботі [5], має місце низька ефективність перетворення споживаної електричної енергії до корисної потенційної енергії доставленої води. У випадку семиповерхового будинку [5] коефіцієнт енергетичної ефективності знаходився на рівні 20%. Його низька величина обумовлена великими гідравлічними втратами у вентилях споживачів нижніх поверхів. Проблеми надлишковості гідравлічного напору у деяких споживачів можна повністю позбутися у разі застосування індивідуальної насосної установки для кожного поверху, але при цьому треба враховувати зростання витрат на обслуговування і капітальні вкладення. Протиріччя між підвищенням енергоефективності та збільшенням капітальних витрат обумовлює потребу у порівняльних оптимізаційних дослідженнях конкуруючих варіантів системи водопостачання будинку задля визначення оптимальних величин її конструктивних параметрів [6]. На даному етапі виконаємо порівняльне дослідження енергетичної доцільності застосування дворівневої системи водопостачання житлового будинку за паралельного зонування.

Метою роботи є розробка і порівняльне дослідження енергоефективності ЕМС водопостачання розгалуженої структури, типу житлового багатоповерхового будинку, за дворівневого розподілу стояків за висотою водопідйому. Задля досягнення даної мети треба: проаналізувати кількарівневу структуру ЕМС водопостачання багатоповерхових будівель, розробити рекомендації з структур їхніх насосних агрегатів; обрати критерії порівняння систем водопостачання багатоповерхових будівель; розробити математичні моделі та програмні засоби порівняльного дослідження параметрів робочих режимів і величини інтегральних показників енергоефективності ЕМС напірного переміщення рідини із дворівневими стояками; сформулювати методологію чисельного експерименту (з наступною її реалізацією) для цілей дослідження ЕМС водопостачання розгалуженої структури за дворівневим розподілом стояків за висотою водопідйому у порівнянні з системою з єдиним стояком.

Математична модель для комплексного дослідження ЕМС водопостачання розгалуженої структури за дворівневим розподілом стояків за висотою водопідйому призначена для порівняльного дослідження систем з одним та двома стояками. Задля коректності порівняльного дослідження в основу аналізу покладено однакові умови стосовно властивостей насосів, двигунів, опорів гідравлічної мережі поверхів, ділянок стояків.

Витратна характеристика гідравлічної мережі системи водопостачання (на першому етапі аналізу розглядається система з одним стояком) залежить від ступеня відкриття вентилів у споживачів. Вираз даної характеристики можна отримати з урахуванням однакового водоспоживання за поверхами. При цьому, за заданої подачі насоса задля максимальної енергоефективності повинен бути забезпечений мінімально достатній напір для надійного водопостачання останнього поверху. Він визначається за мінімізації гідравлічних опорів вентилів споживачів. Споживачі забезпечують їхнє максимальне відкриття для отримання потрібних витрат води, а мінімально достатня величина напору стимулює даний процес. Таким чином, витратна характеристика мережі, яка відповідає максимальній енергоефективності режиму роботи, будується за мінімальними величинами гідравлічних опорів, а оптимальний напір насоса дорівнює мінімальним втратам напору у мережі [5, 7]. Для порівняльного дослідження системи з багаторівневими стояками вираз еквівалентної витратної характеристики гідравлічної мережі [5] доповнено коефіцієнтами збільшення гідравлічних опорів крайніх поверхів

$$H_m = h_1 + h_k + k_{R1} R_1 Q^2 + k_{Rk} \frac{R_k Q^2}{k^2} + \sum_{i=2}^{k-1} \left[h_i + R_i \left(Q - Q \frac{i-1}{k} \right)^2 \right], \quad (1)$$

де k – кількість поверхів; h_i – перепад висоти між горизонтальними трубопроводами i -го поверху і попереднього; Q – подача насоса; R_i – гідравлічний опір ділянки стояку i -го поверху; k_{R1}, k_{Rk} – коефіцієнти збільшення гідравлічного опору поверху у загальній схемі гідравлічної мережі у відносних одиницях опору стояку даного поверху з урахуванням: для останнього поверху – трубопроводу його горизонтальної розводки, для першого – трубопроводу від стояку до насоса. У припущенні сталості гідравлічних опорів ділянок стояку за поверхами R вираз (1) набуває виду

$$H_m = H_{st} + Q^2 \frac{R}{k^2} \left[k^2 k_{R1} + k_{Rk} + \sum_{i=2}^{k-1} (k+1-i)^2 \right], \quad (2)$$

де $H_{st} = \sum_{i=1}^k h_i$ – статичний напір води на останньому поверсі.

Вираз (2) дає змогу визначити величину гідравлічних опорів ділянок стояку за поверхами R , спираючись на координати робочої точки насосу H_p, Q_p з урахуванням, що у сталому режимі $H_m = H_p; Q = Q_p$. При цьому, з урахуванням, що напір є мінімально достатній, величина гідравлічних опорів відповідає максимальній енергоефективності режиму роботи із заданою робочою точкою. Виконаємо цю задачу на прикладі варіанта системи водопостачання семиповерхового будинку [5] з використанням насосу типу К-20/30. Апроксимацію характеристик напору насосу (H) і ККД (η) від подачі (Q) і швидкості (n) здійснено [5] за допомогою виразів

$$H = H_0(n/n_n)^2 + A Q n / n_n - B Q^2; \eta = \eta_m \left(1 - \left| \frac{Q \cdot n_n}{Q_n \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right), \begin{cases} \eta_m = \eta_n \left[1 - \left(\frac{n}{n_n} - 1 \right)^{2m} \right], n \leq n_n \\ \eta_m = \eta_n \left[1 - \frac{\eta_n - \eta''}{(n'' - n_n)^2} (n - n_n)^2 \right], n \geq n_n \end{cases}, \quad (3)$$

де константи: $A = \frac{(H' - H_0)Q''^2 - (H'' - H_0)Q'^2}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $B = \frac{(H' - H_0)Q'' - (H'' - H_0)Q'}{Q'Q''(Q'' - Q')}$; $m = \frac{\ln(1 - \eta'/\eta_n)}{\ln(n'/n_n - 1)^2}$

інформація з каталогових характеристик (напір у м, подача у $m^3/год$, швидкість обертання у *обертах за хвилину*): $H_0 = 21.1$ – величина напору за нульової подачі; $Q_n = 19$; $\eta_n = 0,625$; $n_n = 2900$ – номінальні подача, ККД, швидкість обертання; ($Q' = 10,3$; $H' = 27,2$), ($Q'' = 23,3$; $H'' = 23,2$) – координати початку та кінця робочої ділянки напірної характеристики за рівнем ККД ($\eta \geq (0.9...0.95)\eta_n$); $\eta' = 0,615$; $\eta'' = 0,62$ – величини максимумів ККД насоса при швидкостях $n' = 2000$; $n'' = 4000$, меншій та більшій за номінальну відповідно.

Для точки максимальної подачі у робочому діапазоні насосу К-20/30 ($Q'' = 23,3 m^3/год$) системи водопостачання семиповерхового будинку, відповідно до (2) та (3), у припущенні тут і далі незмінної висоти поверхів $h_i = 2,8m$ і $k_{Rk} = 250$ (у коефіцієнті $k_{Rk} = 250$ враховано: гідравлічний опір труб розводки квартирою до найвіддаленішої точки в мережі, місцеві опори запірних вентилів, кутників, трійників тощо) і, що $k = 7$; $k_{R1} = 1$, визначено гідравлічний опір ділянок стояку за поверхами: $R = 0,000835 год^2/m^5$. Повний еквівалентний опір мережі (множник при Q^2) за виразом (2) більший у 7,939 разів.

Комплексним критерієм енергоефективності ЕМС водопостачання [5] є співвідношення потенційної енергії доставленої споживачам води до спожитої електроприводом електричної енергії. Комплексні підходи до визначення критерію проектування є продуктивними для різних систем [8, 9] завдяки оцінці ефективності за кінцевим результатом. Для розгалуженої системи з одним стояком, яка розглядається, за рівномірності споживання води за поверхами, збільшення її потенційної енергії за одиницю часу (корисна потужність системи) визначається наступним чином:

$$P_u = \rho g \frac{Q}{k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st}}{k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} \frac{1 + \frac{1}{k}}{2}, \quad (4)$$

де $\rho = 998,23 \text{ кг/м}^3$ – густина водопровідної води; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; $h_{sti} = i h_i$ – статичний напір i -го поверху. Відповідно до (4) корисна дія розгалуженої системи зменшується у 1,33...2 рази (в залежності від кількості поверхів) порівняно із одноадресною подачею води на останній поверх.

Програмну реалізацію математичної моделі ЕМС наведено на рис. 1. Це дослідження виконано за номінальної величини електромагнітних параметрів АД. Бібліотечний блок АД (з параметрами АД 4А90L2У3, потужністю 3 кВт) підключено до джерела живлення через вимірювач. Параметри заступної схеми визначено за [10], механічні втрати – за [11]. У паралель до АД підключено блок еквівалентних опорів задля врахування втрат у сталі (визначено за [10, 12] для

номінального режиму) і додаткових. За вихідними сигналами вимірювача визначається величина споживаної АД потужності P_1 . Сигнал кутової швидкості з виходу блока АД подається на вхід блоку *Pump* разом з сигналом заданої подачі насосу, де за виразами (3) розраховується напір та ККД насосу. Ці величини разом із подачею та швидкістю забезпечують визначення моменту навантаження на вході АД. При цьому враховано, що робоча точка системи насос – мережа знаходиться на характеристиці насоса за заданої подачі. Тобто, еквівалентна характеристика мережі змінюється із зміною подачі. Це обумовлено зміною гідравлічних опорів кінцевих вентилів споживачів.

Корисна потужність ЕМС водопостачання визначається за виразом (4), а споживана потужність – за результатами моделювання (рис. 1) на вході АД. З урахуванням цих величин за задану циклограмою витрат протягом доби забезпечується визначення **інтегральної величини коефіцієнту енергоефективності**

$$Keef = \frac{\sum_{j=1}^J P_{uj} T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}, \quad (5)$$

де J – кількість етапів заданої циклограми добових витрат води із тривалістю T_j .

Комплексний аналіз ЕМС розгалуженої системи водопостачання багатопверхового будинку потребує наявності інформації щодо ефективності роботи різних ланок системи. З цією метою визначено співвідношення енергій на входах та виходах насосного агрегату та АД. Подібно до (5) визначено величини коефіцієнтів енергоефективності насосного агрегату ($Keef_{PU}$) і АД ($Keef_M$)

$$Keef_{PU} = \rho g \frac{\sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}; \quad (6)$$

$$Keef_M = \rho g \frac{\sum_{j=1}^J \frac{Q_j H_j}{\eta_j} T_j}{\sum_{j=1}^J P_{1j} T_j}. \quad (7)$$

Енергоефективність системи водопостачання (5), насосного агрегату (6), АД (7) визначено у випадку нерегульованого асинхронного приводу за умови, коли напір насосу перевищує величину мінімально достатньої величини напору за даної подачі (2). Різниця цих напорів дає змогу оцінити резерви енергозбереження із застосуванням регульованого електроприводу. Відносна економія енергоспоживання за застосування ідеальної системи регулювання із зведенням напору насосу до мінімально допустимих втрат напору у мережі може бути оцінена за виразом

$$\Delta W'_{\Delta H} = \sum_{j=1}^J Q_j (H_j - H_{mj}) T_j / \sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j. \quad (8)$$

Чисельний експеримент. Під час розрахунків енергоефективності ЕМС водопостачання семипверхового будинку за моделлю рис. 1 (із добовим графіком водоспоживання, представленого узгодженими масивами витрат води $[Q_j] = [2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20] \text{ м}^3/\text{год}$ та відповідним часом споживання $[T_j] = [4; 2; 3; 2; 2; 3; 3; 5] \text{ год}$, [5]) величина коефіцієнту енергоефективності (5) становить: $Keef = 0,1761$. Покази дисплеїв на рис. 1 відповідають першому елементу масиву витрат заданої циклограми.

За визначеними параметрами ЕМС водопостачання семипверхового будинку оцінимо такі ж параметри для 12 поверхів у випадку сталості водоспоживання одного поверху і з єдиним стояком. Залишаємо незмінними величини: h_i, k_{R1}, k_{Rk}, R . Для $k=12$ повний еквівалентний опір мережі за

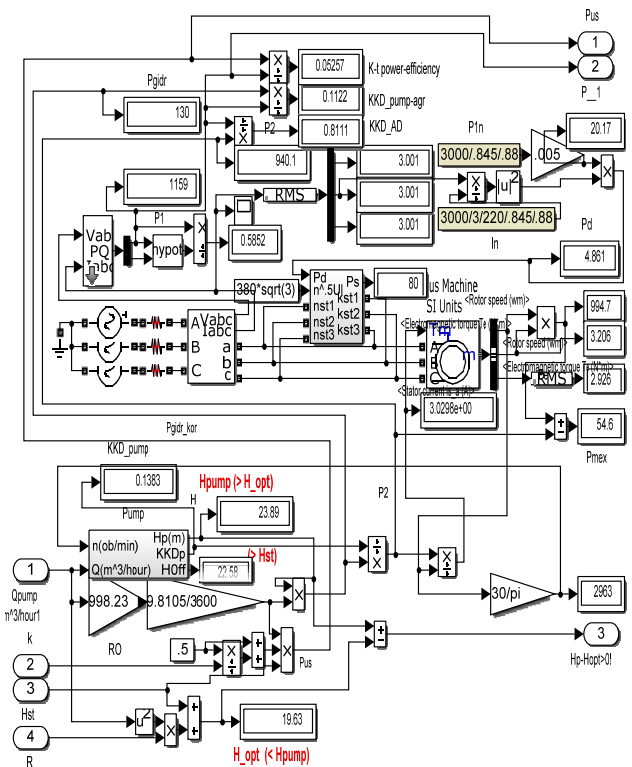


Рис. 1

виразом (2) більший за R у 6,243 рази. Відповідно до збільшення кількості поверхів треба змінити експлуатаційні характеристики насосу.

Задля коректності порівняльного дослідження аналіз виконується за однакових енерго-ефективних властивостей насосів різних варіантів системи. Це досягається трансформацією напірних характеристик насосу К-20/30 відповідно до потреб варіанту системи без зміни властивостей енергоефективності. Таким чином, для випадку 12 поверхів ($k=12$) застосуємо модельний насос, характеристики якого отримуємо після збільшення величин напорів і подач у вихідних даних (3) насосу К-20/30 з коефіцієнтом 12/7. На рис. 2 показано отримані напірні характеристики насосів (H_{7-1c} , H_{12-1c}), залежності їхніх ККД (η_{7-1c} , η_{12-1c}), еквівалентні витратні характеристики мережі (H_{m7-1c} , H_{m12-1c}) для варіантів 7-ми та 12-ти поверхових будинків відповідно з

єдиним стояком для всіх поверхів. Характеристики мережі відповідають стану вентилів споживачів за мінімально достатньої величини напору за даної подачі (1), (2). Відповідно до зміни характеристик насосу, потужність його двигуна для 12-ти поверхового будинку треба збільшити у $144/49=2,94$ рази. Це досягається застосуванням АД 4A112M2У3 із номінальною потужністю 7,5 кВт. За таких умов за використання моделі рис. 1 розрахунок інтегральної величини коефіцієнту енергоефективності за виразом (5), із збільшеною подачею у 12/7 разів порівняно із попереднім варіантом показав, що $Keef=0,1697$. Тобто, збільшення кількості поверхів з 7 до 12 зменшило енергоефективність на 3%.

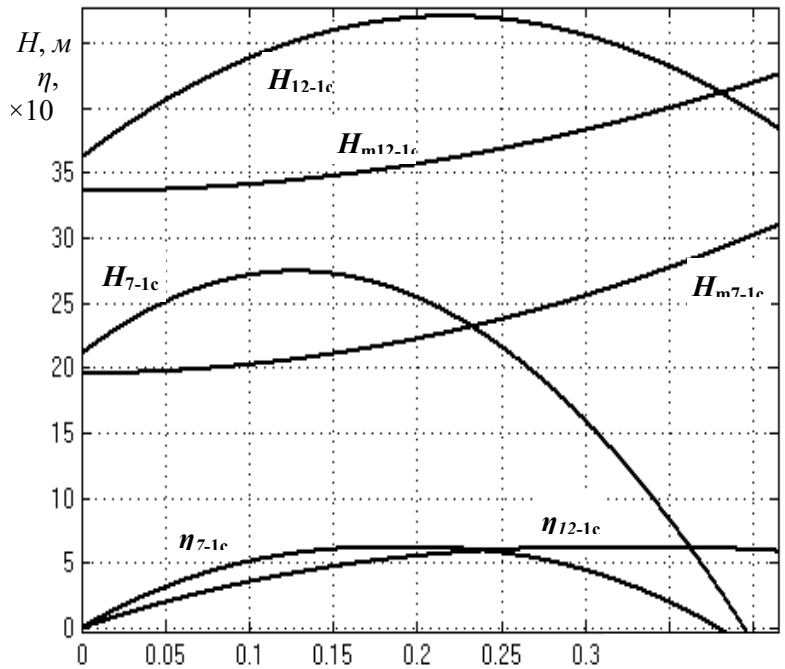


Рис. 2

Дослідження ефективності

ЕМС водопостачання 12 поверхового будинку із двома стояками, відповідно для 1...6 і 7...12 поверхів, виконаємо із скорегованою математичною моделлю. Модельний насос, застосований для дослідження 12 поверхового будинку з єдиним стояком, замінимо еквівалентним, який обладнаний двома парами з чотирьох однакових робочих коліс: колеса кожної пари гідравлічно з'єднано послідовно, пари з'єднано у паралель. У такому випадку, характеристики даних коліс можна отримати після зміни величин напорів і подач у вихідних даних (3) насосу К-20/30 з коефіцієнтом $12/7/2=6/7$. За вказаного з'єднання коліс їхня результуюча характеристика є еквівалентною попередній характеристиці.

Вираз еквівалентної витратної характеристики гідравлічної мережі меншого стояку можна отримати з (2) за умови: $k = 6$; $H_{st6} = \sum_{i=1}^k h_i$; $k_{R1} = 1$, а для більшого: $k = 6$; $k_{R1} = 7$; $H_{st12} = 2 \sum_{i=1}^k h_i$.

Потрібний робочий режим нагнітання води до більшого стояку забезпечить пара послідовно з'єднаних вказаних коліс насосу. Для роботи меншого стояку достатньо одного колеса. Таким чином, для забезпечення системи з двома стояками достатньо лише трьох вказаних коліс. При цьому гідравлічна схема насосу, який обслуговує обидва стояки, складається з двох паралельних потоків: перший – з двох коліс з їхнім послідовним з'єднанням, другий – з одного колеса. Насос має один вхід і два виходи. Вихід першого потоку з'єднано із більшим стояком, другого – із меншим. Всі колеса розміщено на одному валу. Для приводу насосу застосуємо такий же двигун – 4A112M2У3. Розрахункові напірні характеристики потоків насосу, залежності їхніх ККД, еквівалентні витратні характеристики мереж стояків для обох варіантів водопостачання 12 поверхового будинку наведено на рис. 3.

Вираз потужності збільшення потенційної енергії води, доставленої споживачам меншим стояком за $k=6$, наступний:

$$P_{u.s} = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k h_{sti} = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k i = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k), \quad (9)$$

де $H_{st6} = 0,5H_{st12} = 0,5H_{st}$ – співвідношення статичних напорів за зміни етажності.

Вираз потужності збільшення потенційної енергії води, доставленої споживачам більшим стояком за $k=6$, наступний:

$$P_{u.b} = \rho g \frac{Q}{2k} \sum_{i=1}^k (h_{sti} + kh_i) = \frac{\rho g Q H_{st6}}{2k^2} \sum_{i=1}^k (i + k) = \rho g Q H_{st} 0,25(0,5 + 0,5/k + 1). \quad (10)$$

Сумарна потужність збільшення потенційної енергії води обома стояками

$$P_{u.b} + P_{u.s} = \rho g Q H_{st} 0,25(1 + 1/k + 1) = \rho g Q H_{st} 0,5(1 + 0,5/k). \quad (11)$$

Співставлення потужності корисної дії ЕМС водопостачання у разі єдиного стояка (4) і при двох стояках (11) показує, що ці величини є рівними, враховуючи, що у (4) $k=12$, а у (11) $k=6$.

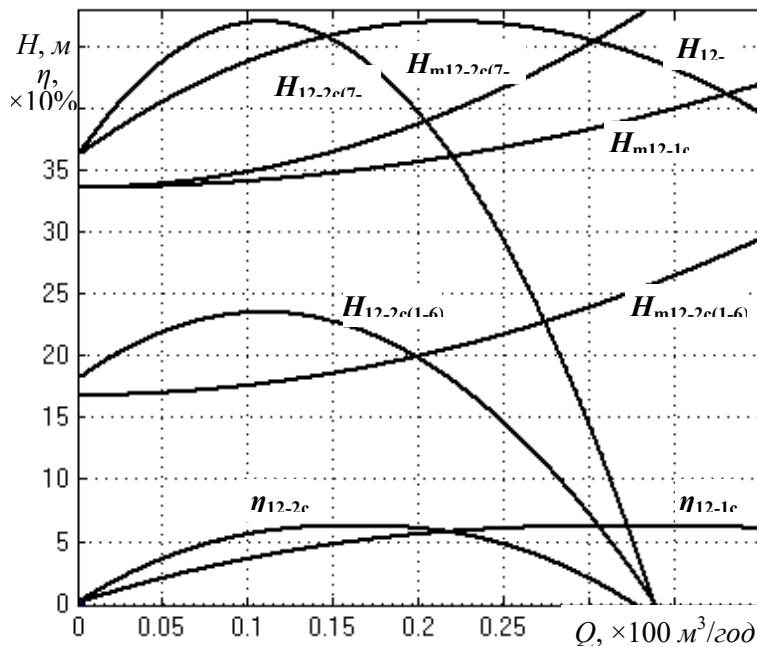


Рис. 3

Математична модель дослідження енергоефективності процесів водопостачання 12-ти поверхового будинку відрізняється від моделі рис. 1 параметрами моделі АД, гідравлічної мережі і насоса. Під час дослідження системи з єдиним стояком, як сказано раніше, характеристики насоса відповідають (3) із збільшенням величин напорів і подач у вихідних даних з коефіцієнтом 12/7. Для випадку двох стояків даний коефіцієнт дорівнює 6/7, на вхід блоку насоса подається сигнал про половину подачі, визначення потужності на валу АД здійснюється за цією половинною подачею і потроєним значенням напору з виходу блоку насоса (оскільки працює три колеса з половинною подачею). Коефіцієнт енергоефективності визначається за виразом (5) з урахуванням параметрів заданої циклограми водоспоживання. У разі двох стояків його величина

становить $Keef = 0,2206$. Тобто, відповідно до виконаного дослідження, застосування системи водопостачання із двома стояками за їхньої диференціації за висотою підйому **збільшує енергоефективність на 30 %**.

Визначення величини коефіцієнту енергоефективності насосного агрегату здійснено з урахуванням вказаної адаптації моделі рис. 1 до системи з дворівневими стояками. При цьому враховано, що насос складається з двох потоків з однаковою подачею і трьох однакових коліс з однаковим напором (внаслідок рівності подачі). За даних умов (за заданою інформацією про подачу, розрахованими даними про робочий напір колеса насоса) для системи з двома стояками величини коефіцієнтів енергоефективності насосного агрегату і АД можна визначити подібно до (6) та (7)

$$Keef_{PU} = 1,5 \rho g \frac{\sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j}{\sum_{j=1}^J P_j T_j}; \quad (12)$$

$$Keef_M = 1,5 \rho g \frac{\sum_{j=1}^J \frac{Q_j H_j}{\eta_j} T_j}{\sum_{j=1}^J P_j T_j}. \quad (13)$$

Відносна економія енергоспоживання у разі застосування ідеальної системи регулювання із зведенням напорів потоків насосу до мінімально допустимих втрат напорів у мережах стояків може бути оцінена, з урахуванням співвідношення потужностей потоків, за виразом

$$\Delta W'_{\Delta H} = \sum_{j=1}^J Q_j (3H_j - H_{msj} - H_{mbj}) T_j / 3 \sum_{j=1}^J Q_j H_j T_j, \quad (14)$$

де H_{ms}, H_{mb} – втрати напору у мережі меншого і більшого стояків відповідно до (2) за половинної подачі з урахуванням, що $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$; $k = 6$; $H_{st.s} = 6h_i$; $H_{st.b} = 12h_i$; $k_{R1.s} = 1$; $k_{R1.b} = 7$.

Результати порівняльного дослідження ЕМС водопостачання будинків зведено до таблиці. Перша строчка відноситься до 7, а друга – 12 поверхового будинків з єдиним стояком. Третя – до 12 поверхового будинку з двома стояками. Параметри поверхів однакові, $R = 0,000835 \text{ год}^2/\text{м}^5$. Шостий стовпчик вказує на величину зведеного гідравлічного опору мережі за (2) у відносних одиницях до опору ділянки стояку одного поверху R . Сьомий – оцінює корисну дію системи за виразами (4), (10), (11) порівняно з одноадресною подачею води на останній поверх.

Кількість поверхів, стояків	k	H_{st}	$\frac{Q}{Q_{\Sigma}}$	k_{R1}	$k_{Rk} + \frac{\sum_{i=2}^{k-1} (k+1-i)^2}{k^2}$	$\frac{P_u}{\rho g Q H_{st}}$	$K_{\text{еefPU}}$	$K_{\text{еefM}}$	$\Delta W'_{\Delta H}$	$K_{\text{еef}}$	%
7	7	$7 h_i$	1	1	7,939	0,571	0,418	0,844	0,203	0,1761	103,8
12-1с	12	$12 h_i$	1	1	6,243	0,542	0,432	0,872	0,195	0,1697	100
12-2с	1-6	$6 h_i$	0,5	1	8,333	0,146	0,425	0,859	0,23	0,2206	130
	7-12	$12 h_i$	0,5	7	14,333	0,396					

У передостанньому стовпчику таблиці наведено величини коефіцієнтів енергетичної ефективності системи. Ця ж інформація у останньому стовпчику надана у відсотках до показника 12 поверхового будинку із одним стояком. Результати показують, що у разі застосування нерегульованого електроприводу насосу для системи із двома стояками витрати електроенергії можна знизити на 30 %. Регульований електропривод може знизити витрати енергії ще на рівні 20 %. Збільшення енергетичної ефективності системи із двома стояками досягається завдяки зменшенню як надлишкових напорів у споживачів нижніх поверхів (реалізується зміною структури системи водопостачання), так і величини втрат у двигуні (обумовлено зміною навантаження АД за зменшення надлишкових напорів). При цьому, як видно з таблиці, енергоефективність насосного агрегату навіть дещо знижується відповідно до зміни ККД АД із зменшенням його завантаження.

Рекомендації з вдосконалення структур насосних агрегатів. Зміну структури системи водопостачання із застосуванням паралельного зонування часто здійснюють із збільшенням кількості насосів і АД меншої потужності [4], що супроводжується зменшенням їхніх ККД. Виконаний аналіз показав, що даного недоліку для багатоповерхових будинків можна позбутися застосуванням спеціалізованої структури насосного агрегату. В цьому випадку гідравлічна схема насосу, який обслуговує два стояки, складається з двох паралельних потоків. Насос має один вхід і окремі виходи для стояків. Всі колеса розміщено на одному валу. Для приводу насосу застосовується двигун на повну потужність системи. Перевагою такої структури, окрім збільшення ККД АД, є збільшення ККД насосу у випадку зустрічного розміщення робочих коліс потоків для компенсації осьового зусилля, зменшення втрат у підшипниках і об'ємних втрат.

Висновки. За результатами комплексного порівняльного дослідження ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку визначено, що застосування дворівневих стояків замість одного стояку дає можливість підвищити енергетичну ефективність на 30 % завдяки зменшенню надлишкових напорів у системі і втрат у двигуні. Крім того, застосування регульованого електроприводу може підвищити енергетичну ефективність ЕМС ще на 20 %. Застосування спеціалізованого насосного агрегату системи з дворівневими стояками забезпечує підвищення енергоефективності внаслідок зниження втрат як у двигуні, так і насосі. Розроблена комплексна математична модель ЕМС водопостачання багатоповерхового будинку із дворівневими стояками забезпечує потреби порівняльних оптимізаційних досліджень різних структур системи за варіювання кількістю поверхів і режиму водоспоживання.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу асинхронних машин енергоефективних і ресурсозберігаючих електромеханічних систем” (шифр «АСЕЛМА-К»). Державний реєстраційний номер 0117U007715, КПКВК 6541030.

1 Yang Zhou, Eric Wai Ming Lee, Ling-Tim Wong, Kwok-Wai Mui. Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*. 2019. Vol. 11(12). 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122580>.

2 Alexandre Magno Ferreira Diniz, Cristiano Horade Oliveira Fontes, Caiuby Alves Da Costa, Gloria Meyberg Nunes Costa. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Energy Efficiency*. 2015. No 8. Pp. 417-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9292-4>

3 Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.

4 Huong N., Anh N., Huyen D., Son T., Cuong D. Optimization to water supply system design and operation scheme in high rise buildings. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2018. Vol. 12. No 3. Pp. 123-131. DOI: [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(3\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(3)-12)

5 Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>

6 Попович О.М., Головань І.В. Засоби комплексного проектування для вдосконалення електромеханічних систем з асинхронними двигунами. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.052>

7 Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 38-45.

8 Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. О.: Наука и техника, 2006. 320 с.

9 Лисенко В.П. Економічний критерій вибору стратегії керування біотехнологічними об'єктами. *Біоресурси і природокористування*. 2014. Т. 6. № 3/4. С. 174-179.

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

11 Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К., Морозкин В.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. 496 с.

12 Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д., Сорокер Т.Г., Сливински Т., Кашински Л., Овчарова М., Гиншт Р., Пальян Т., Каплин А.И., Леман Х., Муштер Ф., Вольф Ю., Бабетич З., Шевчик Л., Ковнацки К., Кравчик А.Э., Малыхин Е.И., Алиханян К.А., Спасов В., Загорский А.Е., Кребер Д., Шельмеци Д., Гусельников Э.М., Макаров Ф.К. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRO-MECHANICAL WATER SUPPLY SYSTEM OF A MULTI-STOREY BUILDING WITH TWO-LEVEL RISERS

O.M. Popovych¹, R.V. Yashyn²

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

E-mail: popovich1955@ukr.net.

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

The influence of the structure of the electromechanical water supply system of a multi - storey building on its energy efficiency is investigated. A quantitative estimate of the reduction in the efficiency of the system compared to the supply of water to the top floor, depending on the number of floors. A complex mathematical model of the system with one and two risers (asynchronous motor - pump - branched hydraulic network) with determination of parameters of operating modes taking into account the mutual influence of system components is developed. The value of the system efficiency criterion as the ratio of the potential energy of water at the consumer to the consumed energy is substantiated and quantified. The electromechanical water supply system of a multi-storey building with two levels of risers consumes 30% less energy than the system with a single riser, due to the reduction of the amount of excess pressure in consumers of lower floors. References 12, figures 3, table 1.

Keywords: asynchronous motor, water supply system, multi-storey building, energy efficiency.

- 1 Yang Zhou, Eric Wai Ming Lee, Ling-Tim Wong, Kwok-Wai Mui. Modeling Study of Design Flow Rates for Cascade Water Supply Systems in Residential Skyscrapers. *Water*. 2019. Vol. 11(12). 2580. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122580>
- 2 Alexandre Magno Ferreira Diniz, Cristiano Horade Oliveira Fontes, Caiuby Alves Da Costa, Gloria Meyberg Nunes Costa. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Energy Efficiency*. 2015. No 8. Pp. 417-432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9292-4>
- 3 Leznov B.S. Frequency-controlled electric drive of pumping units. Moskva: Mashinostroenie, 2013. 176 p. (Rus)
- 4 Huong N., Anh N., Huyen D., Son T., Cuong D. Optimization to water supply system design and operation scheme in high rise buildings. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2018. Vol. 12. No 3. Pp. 123-131. DOI: [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(3\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(3)-12)
- 5 Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Power effective modes electromechanical system of pump installation of the multi-storey building. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38-45. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.038>
- 6 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>
- 7 Bibik O.V. Switched-reluctance drive of pump installation of the multi-storey building. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2016. Vyp. 45. Pp. 38-45. (Ukr).
- 8 Petrushin V.S. Asynchronous motors in an adjustable electric drive. Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. 320 p. (Rus)
- 9 Lisenko V.P. Economic criterion for the choice of strategy for supporting biotechnological objects. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia*. 2014. Vol. 6. No 3/4. Pp. 174-179. (Ukr).
- 10 Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Asynchronous motors series 4A. Moskva: Energoizdat, 1982. 504 p. (Rus)
- 11 Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K., Morozkin V.P. Design of electrical machines. Moskva: Energiia, 1980. 496 p. (Rus)
- 12 Radin V.I., Londin J., Rosenknop V.D., Soroker T.G., Slivinski T., Kashinski L., Ovcharova M., Ginsht R., Palyan T., Kaplin A.I., Leman H., Mushter F., Wolf Y., Babetich Z., Shevchik L., Kovnacki K., Kravchik A.E., Malykhin E.I., Alikhanyan K.A., Spasov V., Zagorsky A.E., Kreber D., Shelmeti D., Guselnikov E.M., Makarov F.K. Interelectro unified series of asynchronous motors. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 416 p. (Rus)

Надійшла 13.06.2022
Остаточний варіант 12.09.2022

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.051>

АНАЛІЗ ЗМІНИ ЧАСТОТИ В ОЕС УКРАЇНИ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЇЇ РОБОТИ

О.В. Кириленко^{1*}, академік НАН України, В.В. Павловський^{1**}, докт.техн.наук,
А.О. Стелюк^{1***}, канд.техн.наук, О.В. Леньга^{1****}, В.Б. Зайченко^{2*****},
Ю.Г. Лиховид^{2*****}, канд.техн.наук
¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: astelvuk@gmail.com.
²НЕК «Укренерго»,
вул. С. Петлюри, 25, Київ, 01032, Україна.

В статті наведено основні результати аналізу зміни частоти в ОЕС України за умов її ізолюваної роботи, а також синхронної роботи з енергооб'єднаннями ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E. Розглянуто причини зміни максимальних і мінімальних значень, а також подано гістограми частоти для вищенаведених режимів роботи ОЕС України. Бібл. 5, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: частота, якість регулювання, об'єднана енергосистема, статистичний аналіз, гістограма.

Відповідно до планів інтеграції у 2023 р. передбачалося підключення об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України на синхронну роботу з енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E. З метою визначення можливості роботи вітчизняної ОЕС як в ізолюваному режимі, так і за умов синхронної роботи з ENTSO-E консорціумом системних операторів магістральних мереж європейських країн за участю Національної енергетичної компанії (НЕК) «Укренерго», Енергетичної Асоціації США та міжнародної консалтингової компанії DMCC проведено комплекс досліджень режимів ОЕС України. Результати досліджень підтвердили готовність переходу вітчизняної ОЕС як до ізолюваного режиму, так і до подальшої її синхронізації з об'єднанням ENTSO-E. Крім того, з метою оцінки якості регулювання частоти проведено відповідні натурні випробування за умов ізолюваної роботи ОЕС України. Проте, віроломний напад РФ на Україну, що й досі супроводжується знищенням інфраструктури України, у т.ч. об'єктів електроенергетики, призвів до дострокової синхронізації ОЕС України з енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E, яка відбулася 16 березня 2022 р. Зазначимо, що до цього часу протягом майже місяця ОЕС України вимушено працювала в ізолюваному режимі (з 24 лютого 2022 р.), який, в умовах проведення інтенсивних бойових дій вищенаведеного, у 2022 році ОЕС України «охопила» наступні режими: паралельну роботу з ЄЕС/ОЕС (до 24 лютого 2022 р.), тривалу вимушену ізолювану роботу (з 24 лютого по 16 березня 2022 р.), а також синхронну роботу з ENTSO-E (з 16 березня 2022 р.). З урахуванням зазначеного, набуває особливої актуальності оцінка зміни частоти в ОЕС України у зазначених режимах її роботи.

Метою роботи є аналіз якості регулювання частоти за різних режимів роботи ОЕС України (ізолюваний, а також синхронна робота з ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E). Для цього проведено аналіз даних реєстрації частоти (сумарно біля 7 млн. значень з дискретністю 1 с) для трьох зазначених режимів ОЕС України. Як приклад на рис. 1 наведено зміну частоти за умов ізолюваної роботи ОЕС України, де спостерігаються значні відхилення частоти, але які знаходяться у межах допустимих значень [1].

Для статистичного аналізу даних реєстрації частоти сформовано відповідні вибірки, які відповідають певному режиму роботи ОЕС України (таблиця). Так, перша та друга вибірки відповідають паралельній роботі ОЕС України з ЄЕС/ОЕС, вибірки № 3 та 4 – ізолюваному режиму ОЕС України у складі блоку регулювання Україна-Молдова, а вибірка № 5 – режиму синхронної роботи з ENTSO-E.

Як видно з таблиці, для усіх вибірок середнє значення частоти (математичне очікування μ) знаходиться близько до номінального значення частоти. Так є цікавими значення мінімальних та

© Кириленко О.В., Павловський В.В., Стелюк А.О., Леньга О.В., Зайченко В.Б., Лиховид Ю.Г., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-3610-7670>, ** <https://orcid.org/0000-0002-9158-8377>,
*** <https://orcid.org/0000-0001-7548-4757>, **** <https://orcid.org/0000-0001-6812-258X>,
***** <https://orcid.org/0000-0002-6459-5125>, ***** <https://orcid.org/0000-0003-3548-9566>

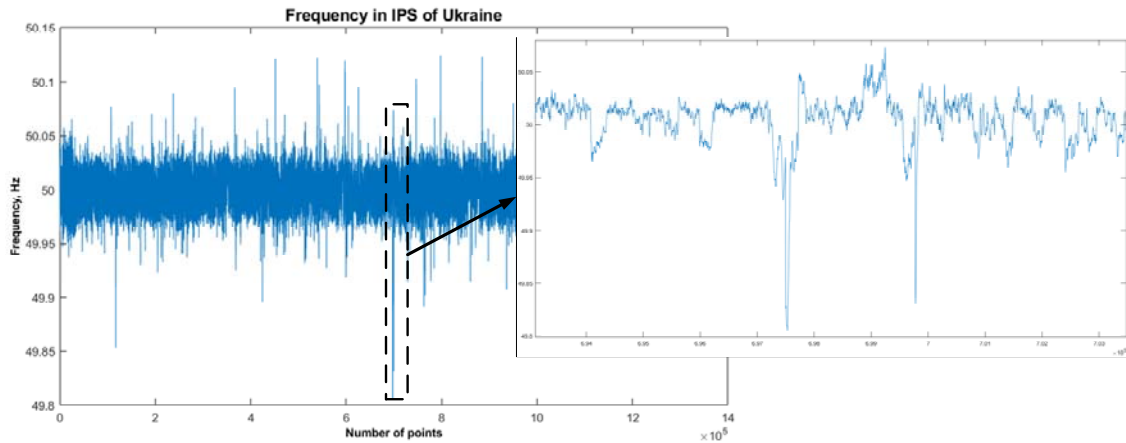


Рис. 1

максимальних значень частоти для трьох режимів ОЕС України, що розглядаються. Перш за все слід зазначити, що всі значення зміни частоти знаходяться у допустимому діапазоні (49,8-50,2) Гц, хоча за умов ізольованої роботи ОЕС України (вибірка №3) частота «наближається» до мінімального допустимого значення 49,8 Гц (49,806 Гц), як це видно на рис. 1.

№ п/п	Режим ОЕС України	Вибірка	Показники зміни частоти, Гц			
			Максимальне значення f_{max}	Мінімальне значення f_{min}	Середнє значення μ	Середньоквадратичне відхилення σ
1	Паралельна робота з ЄЕС/ОЕС	Вибірка №1	50,0629	49,927	49,9994	0,0149
		Вибірка №2	50,065	49,938	49,9992	0,0151
2	Ізольована робота	Вибірка №3	50,125	49,806	49,9988	0,0157
		Вибірка №4	50,145	49,865	50,0016	0,0204
3	Синхронна робота з ENTSO-E	Вибірка №5	50,111	49,842	50	0,0214

Також звертає на себе увагу і діапазон зміни частоти (максимальне і мінімальне значення) за різних режимів роботи ОЕС України. Найменший діапазон зміни частоти спостерігається за умов паралельної роботи ОЕС України з ЄЕС/ОЕС. З одного боку це обумовлено великим значенням коефіцієнта сумарної крутизни статичної частотної характеристики (с.ч.х.) усього енергооб'єднання (за результатами попередніх досліджень [2] встановлено, що значення цього коефіцієнту змінюється у діапазоні 18000-21000 МВт/Гц). В результаті цього спостерігається незначне відхилення частоти в масштабах енергооб'єднання навіть у разі виникнення розрахункового небалансу активної потужності (в ОЕС України – це відключення найбільш потужного енергоблоку). Через відключення енергоблоку атомної електростанції потужністю 1000 МВт частота по завершенню первинного регулювання становить 49,95 Гц [3]. Іншим чинником, який обумовлює високу стабілізацію частоти, є організація вторинного регулювання частоти. Центральна координуюча система автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧП) працює в режимі автоматичного регулювання частоти (здійснює покриття небалансу активної потужності в масштабах всього енергооб'єднання [4]), при цьому САРЧП інших ОЕС працюють у режимі автоматичного регулювання перетікання з або без коригування за частотою, тобто за своєю природою така організація регулювання частоти є централізованою.

За умов роботи ОЕС України в ізольованому режимі (таблиця) спостерігається збільшення діапазону зміни частоти порівняно з попереднім випадком. Це обумовлено тим, що в умовах переходу ОЕС України на ізольовану роботу значно зменшується значення коефіцієнта сумарної крутизни с.ч.х. ОЕС України, який змінюється в діапазоні (1800-2000) МВт/Гц залежно від поточного режиму вітчизняної ОЕС [3]. Відповідно зменшення сумарної крутизни с.ч.х. призводить до збільшення відхилення частоти в ОЕС України (вибірки № 4 і 5). Як видно з таблиці, порівняно з паралельною роботою ОЕС України з ЄЕС/ОЕС, за умов ізольованої роботи вітчизняної ОЕС, також спостерігається

деяке збільшення середньоквадратичного відхилення (СКВ) частоти, яке відповідно становить 0,0204 Гц (вибірка №4) проти 0,0151 Гц (вибірка №2).

Як видно з таблиці, також є цікавою зміна частоти за умов синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E (вибірка №5). Частота змінюється майже в таких же межах, як і за умов ізольованої роботи ОЕС України, при цьому СКВ частоти (0,0214 Гц) навіть дещо перевищує СКВ (0,0204 Гц) за умов ізольованої роботи вітчизняної ОЕС (вибірка №4). Такий значний діапазон зміни частоти обумовлений відмінностями організації регулювання частоти та активної потужності в ЄЕС/ОЕС та ENTSO-E. Як зазначено вище, в ЄЕС/ОЕС використовуються централізований підхід. В той же час в ENTSO-E діє плюралістичний підхід, який полягає у децентралізації регулювання частоти та активної потужності в масштабах енергооб'єднання. В таких умовах першочерговою задачею є забезпечення заданих міжсистемних перетікань потужності між учасниками ринку з дотриманням встановлених цільових параметрів якості частоти енергооб'єднання. Це також підтверджується графіком зміни частоти в ОЕС України (за умов її синхронної роботи з ENTSO-E), який наведено на рис. 2.

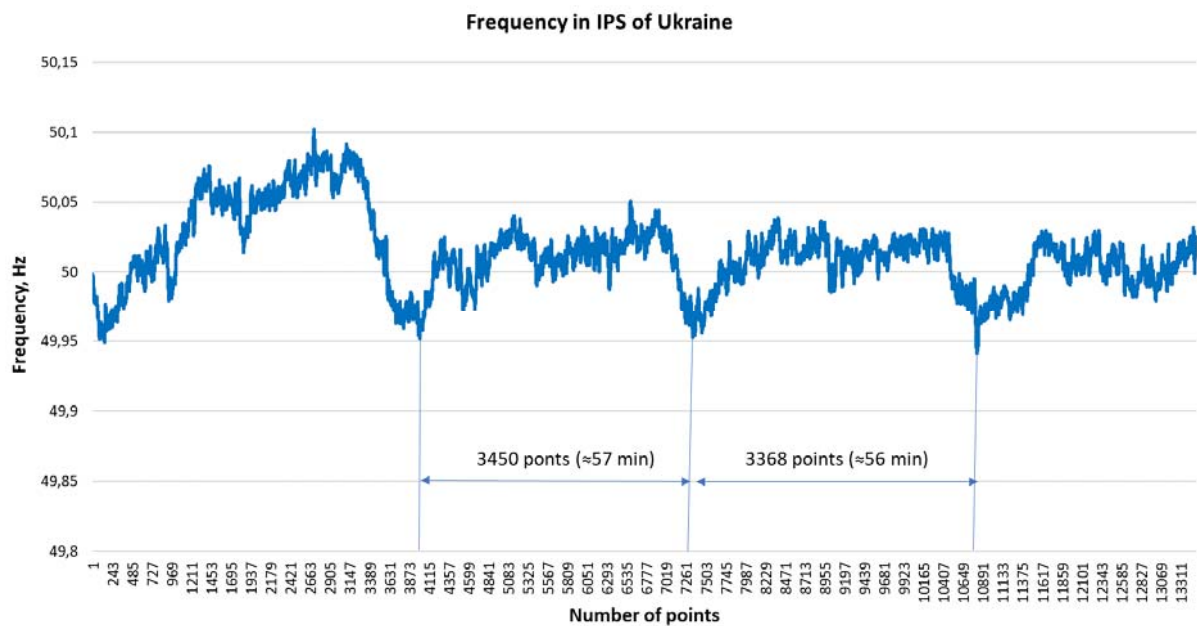


Рис. 2

Як видно з рис. 2, для кожної години протягом декількох хвилин спостерігається систематичне відхилення частоти від номінального значення. Така особливість поведінки частоти в ENTSO-E називається детермінованими відхиленнями частоти (Deterministic Frequency Deviations) [5]. Їхня поява пов'язана з переходом від централізованого формування графіку покриття навантаження до ринкових механізмів торгівлі електроенергією. Ринки електроенергії в ENTSO-E в основному функціонують на погодинних інтервалах. В таких умовах генерація працює за правилами ринку та забезпечує відпуск законтракованого значення електричної енергії в заданому діапазоні часу. В той же час значення потужності споживання в реальному часі не враховується. Таким чином під час переходу від однієї години до іншої відбувається перерозподіл генерації, що супроводжується завантаженням одних та розвантаженням інших генеруючих потужностей. При цьому ринком не враховуються особливості різних типів генерації, такі як швидкість набору та зміна потужності. Під час переходів від однієї години до іншої можуть виникати значні небаланси потужності внаслідок несинхронізованого розкладу ринку та реального значення споживання потужності, що і викликають детерміновані відхилення частоти в енергосистемі ENTSO-E (рис. 2). З метою зменшення таких небалансів потужності можуть бути використані маневрені потужності генерації або установки зберігання енергії BESS. Але це потребує певного розвитку ринку допоміжних послуг в Європі.

З метою визначення розподілу частоти для трьох режимів роботи ОЕС України в роботі побудовані гістограми для відповідної вибірки (sample), які наведено на рис. 3-7. В кожній гістограмі визначено кількість «знаходження» частоти у відповідному діапазоні (з кроком 0,01 Гц) в межах мінімальних і максимальних значень. Як свідчать отримані результати статистичного аналізу, розподіл частоти для усіх вибірок відповідає нормальному закону розподілу. Про це також свідчить коефіцієнт детермінації (*R-square*), значення якого наближується до одиниці. За умов паралельної роботи ОЕС

Україні з ЄЕС/ОЕС найбільша кількість знаходження частоти спостерігається в діапазоні (49,99-50,01) Гц, як це видно з рис. 3 та 4.

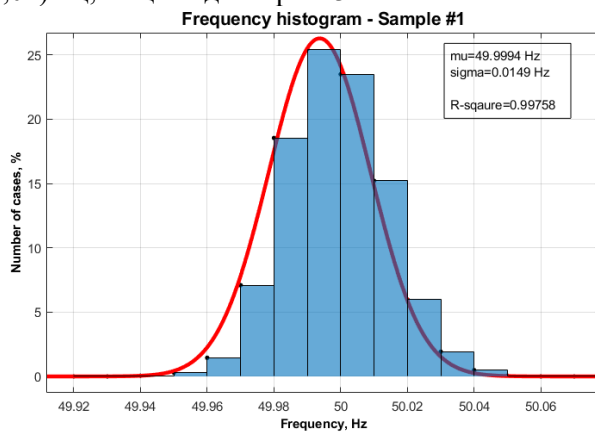


Рис. 3

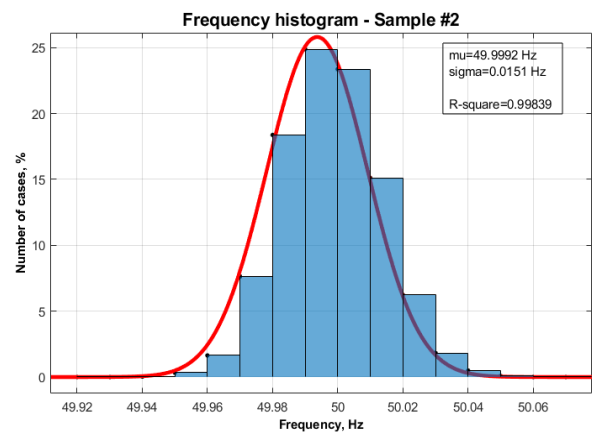


Рис. 4

У разі переходу ОЕС України до ізолюваного режиму роботи гістограма частоти дещо «сповторюється», як це видно з рис. 5 та 6. Особливо це спостерігається для вибірки №3 (рис. 5), для якої найбільша кількість зміни частоти припадає на діапазони (49,98-49,99) Гц та (50,01-50,02) Гц, при цьому значення коефіцієнта детермінації зменшується до 0,93043. Така ж сама ситуація спостерігається і для вибірки №4 (рис. 6).

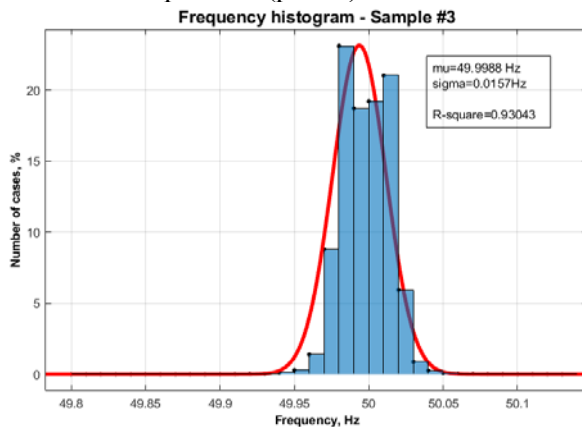


Рис. 5

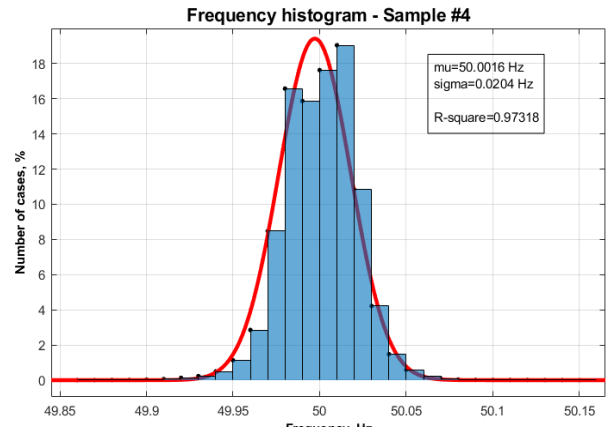


Рис. 6

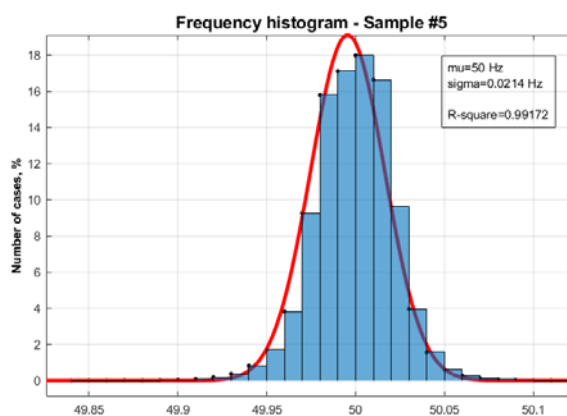


Рис. 7

За умов синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E зміна частоти також визначається нормальним законом розподілу, при цьому для більшості випадків частота змінюється близько до номінального значення (рис. 7).

Порівнюючи гістограми, які наведено на рис. 3 і 4, а також на рис. 7, що відповідає синхронній роботі ОЕС України з ENTSO-E, видно, що в останньому випадку спостерігається зменшення кількості випадків знаходження частоти близько до 50 Гц, а також розширення діапазону зміни частоти, що обумовлено, як зазначено вище, детермінованими відхиленнями частоти в енергосистемі ENTSO-E [5].

Таким чином, як свідчать отримані результати аналізу зміни частоти, для трьох режимів роботи ОЕС України, що розглядаються, якість регулювання частоти є задовільною відповідно до вимог [1]. В той же час, з метою дослідження процесів регулювання частоти та активної потужності, в умовах синхронної роботи ОЕС України з ENTSO-E, які можуть бути проведені у майбутньому, потребує удосконалення розрахункова модель ОЕС України, її валідація за даними натурних випробу-

вань в ізольованому режимі, а також моделі САРЧП з урахуванням існуючого стану електростанцій, які беруть участь у первинному та вторинному регулюванні частоти та контрольованого перетину між блоком Україна-Молдова та ENTSO-E.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E” (шифр «Режим-2»), КПКБК 6541230.

ANALYSIS OF FREQUENCY CHANGE IN THE IPS OF UKRAINE UNDER DIFFERENT REGIMES OF ITS OPERATION

O.V. Kyrylenko¹, V.V. Pavlovskiy¹, A.O. Steliuk¹, O.V. Lenga¹, V.B. Zaychenko², Yu.G. Lykhovyd²

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

²National power company “Ukrenergo”,
S. Petlyury str., 25, Kyiv, 01032, Ukraine.

The article presents the main analysis results of the frequency change in the interconnected power system (IPS) of Ukraine under the conditions of its isolated operation, as well as synchronous operation with the UPS/IPS and ENTSO-E. The reasons for the change in the maximum and minimum values are considered, as well as the frequency histograms for the above modes of operation of the IPS of Ukraine are presented. References 5, tables 1, figures 7.

Keywords: frequency, control quality, interconnected power system, statistical analysis, histogram.

1. ENTSO-E Operation Handbook. Policy 1. Load-Frequency Control and Performance. 28 p. URL: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_Appendix%20final.pdf (access date 01.08.2022).
2. Kyrylenko O.V., Pavlovsky V.V., Steliuk A.O. AGC Software Model Validation for Identification of Renewables Impact on Frequency Control in the IPS of Ukraine. International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kyiv, Ukraine, June 2-6, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874166>
3. Pavlovskiy V.V., Steliuk A.O., Lukianenko L.M. Analysis of the frequency change in IPS of Ukraine in case of the generating unit disconnection of the nuclear power plant. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 4. Pp. 89-94. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.089>.
4. Berkovich M.A., Komarov A.N., Semenov V.A. Background of the power system automation. Moskva: Energoatomizdat, 1981. 352 p. (Rus)
5. Deterministic frequency deviations – root causes and proposals for potential solutions. A joint EURELECTRIC – ENTSO-E response paper. 2011. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/120222_Deterministic_Frequency_Deviations_joint_ENTSOE_Eurelectric_Report_Final_.pdf (access date 01.08.2022).

Надійшла 30.08.2022

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ПЕРВИННОГО ПАЛИВА НА ЛОКАЛЬНИХ РИНКАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ З ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ

С.П. Денисюк *, докт.техн.наук, **Г.С. Белоха** **, канд.техн.наук, **Д.Г. Дерев'янку** ***, канд.техн.наук
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: pointage13@gmail.com

Локальні енергоринки є окремою системою розподілу з декількома джерелами розосередженої генерації та з власним оператором, який не залежить від мережі. Вартість електроенергії в локальних системах залежить від багатьох критеріїв, серед яких витрати первинного палива дизель-генераторів, що залежать від його потужності. Рівномірний розподіл потужностей між паралельно ввімкненими генераторами призводить до збільшення витрат первинного палива. Розроблено алгоритм оптимізації витрат палива, який виконує розрахунок розподілу потужностей паралельно з'єднаних генераторів. Ці потужності відповідають мінімальному значенню витрат палива. Розглянуто систему з трьома дизель-генераторами та варіант з заміною одного генератора на сонячну електричну установку. У порівнянні з рівномірним розподілом використання оптимального алгоритму дає змогу знизити ціну в середньому від 9 до 20 %. Введення сонячної установки з акумуляторною батареєю дало змогу підвищити енергоефективність та зменшити ціну за рахунок менших поточних витратах сонячної установки. Бібл. 10, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: локальні ринки електроенергії, дизель-генератори, витрати первинного палива, сонячні електричні установки.

Вступ. Перехід від традиційних енергосистем до систем, які мають в своєму складі розосереджені та відновлювані джерела енергії, вимагає розробки нових ринкових рішень. Локальні ринки електроенергії є одним із вирішень цієї проблеми. Локальні ринки надають платформу для торгівлі електроенергією, виробленої невеликими електроенергосистемами, дають змогу дрібним споживачам електроенергії та виробникам брати активну участь у ринку та у формуванні ціни [1–7].

Економічні вигоди локальних ринків визначаються зниженням поточних витрат та збільшенням прибутку для їх учасників. З технологічної точки зору це призведе до скорочення витрат під час передачі та перерозподілу, а в довгостроковій перспективі – до розширення таких мереж та можливостей для покращення електропостачання [1]. Локальні енергоринки можуть бути представлені невеликими окремими системами розподілу з декількома генераторами з власним оператором, незалежним від мережі. Директиви ЄС [3] містять положення, що стосуються функціонування дрібних виробників електроенергії, які мають власну розосереджену генерацією. В локальних ринках встановлюються свої тарифи, які можуть змінюватися з часом. Такі тарифи стимулюють регулювання навантаження як вручну, так і автоматично, що дає змогу споживачам заощаджувати на електроенергії, користуючися перевагами системи. Використання таких тарифів можливе лише за наявності у споживача Smart-лічильника електроенергії [2]. Локальні енергоринки вивчають динамічне ціноутворення локальних електроенергетичних систем (Microgrid). На сьогодні актуальним завданням є оптимізація роботи Microgrid як за технічними, так і економічними показниками, розглядаючи їхнє власне функціонування на системному рівні. Використання динамічних мережевих тарифів сприяє більш розумному керуванню ціною та ситуацією в мережі [6].

Джерела живлення Microgrid забезпечують балансуювання електропостачання споживачів. Вони складаються з одного або декількох типів джерел: дизель-генератори (ДГ), сонячні електричні установки (СЕУ), вітроенергетичні установки (ВЕУ) з резервним акумулятором або без нього. Широке застосування ДГ у локальних системах обумовлено можливістю їхньої реалізації в будь-яких кліматичних умовах, невеликою вартістю, простотою керування. Можливість електрифікації локальних об'єктів лише від відновлюваних джерел у більшості випадків суттєво обмежена тимчасовою нестабільністю їхнього потенціалу.

Одним з головних недоліків використання ДГ є витрати первинного палива. В [7] проведено порівняння з гібридними системами. За додаткового введення систем відновлюваної електроенергії

© Денисюк С.П., Белоха Г.С., Дерев'янку Д.Г., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>; ** <https://orcid.org/0000-0003-4277-367X>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-4877-5601>

відмічається зменшення вартості електроенергії. У [8] проведено огляд різних гібридних систем з різними типами джерел, вказано, що найбільш широко використовувані системи ВЕУ-СЕУ з накопичувачем електроенергії та без нього складає 28% з усіх гібридних систем, ВЕУ-СЕУ-ДГ – 22% і СЕУ-ДГ – 21%.

Аналіз публікацій [7–9] показує, що керування ДГ у складі локальних систем у більшості випадків відбувається рівномірним розподілом потужностей по кожному. Зазвичай основні витрати пов'язано із закупівлею дизельного палива. Основними причинами збільшення витрат палива є низькі температури та неефективне завантаження. Навантаження вважається оптимальним для дизель-генератора, якщо лежить в межах від 40% до 75% від номіналу. Якщо навантаження менше 40% або більше 75% номінальної потужності, ДГ працює з підвищеною питомою витратою палива, відповідно рівномірний розподіл між паралельно ввімкненими генераторами може призвести до збільшення витрат палива. Тому актуальним є оптимізація витрат первинного палива.

Мета роботи – розробити алгоритм оптимального розподілу потужностей генераторів в локальних системах в динамічному режимі роботи, які містять дизель-генератори та відновлювані джерела, задля отримання мінімальної вартості електроенергії за рахунок зменшення витрат первинного палива дизель-генераторів.

Розглянемо складові вартості електроенергії, які залежать від багатьох критеріїв [5]. Ціна за 1 кВт·год енергії дизель-генератора $C_{ДГ}(t)$ складається з поточних витрат, які є постійними витратами на обслуговування, процента від ціни за дизельну установку та змінних витрат, які пов'язано з витратами первинного палива та нелінійно залежать від генеруємої потужності. Також на витрати палива впливають перехідні процеси, що виникають через зміну потужності навантаження

$$C_{ДГ}(t) = C_{зм}(B(P_{ДГ}(t))) + \Delta C + C_{пот}, \quad (1)$$

де $C_{пот}$ – поточні витрати; $C_{зм}(B(P_{ДГ}(t)))$ – функція змінних витрат первинного палива від генерованої потужності; ΔC – функція витрат палива у перехідних режимах роботи.

Графік залежності витрат первинного палива ДГ $B(P_{ДГ})$ має нелінійний характер. У загальному випадку такий графік може бути побудований шляхом використання нормативних (усереднених) значень або експериментально та представлений поліномом третього порядку. Графік витрат палива $C(P_{ДГ})$ має подібний вид як і витрати первинного палива $B(P_{ДГ})$, оскільки ціна за паливо є найбільш впливовою складовою на загальну вартість, ніж інші складові ціни.

Вартість сонячної генерації складається з витрат на експлуатацію та технічне обслуговування ($C_{обс}$), процента від ціни за сонячну установку (C_{IPV}), а також змінних витрат, які залежать від генерованої потужності ($C(P_{PV}(t))$)

$$C_{PV}(t) = C_{IPV} + C_{обс} + C(P_{PV}(t)), \quad (2)$$

За паралельної роботи кількох генераторів зі своїми залежностями потужності від часу вартість генерації 1 кВт·год визначається як сума вартості генерації кожного

$$C_{Г\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n C_{ДГ_i}(t) + \sum_{i=1}^m C_{PV_i}(t), \quad (3)$$

де n – кількість дизель-генераторів; m – кількість сонячних генераторів.

Середньозважена вартість 1 кВт·год електроенергії в гібридній системі визначається із співвідношення

$$C_{Г,сп}(t) = \sum_{i=1}^N P_{Г_i}(t) C_{Г_i}(t) / \sum_{i=1}^N P_{Г_i}(t), \quad (4)$$

де $P_{Г_i}(t)$ – потужність i -го генератора; $C_{Г_i}(t)$ – вартість споживання потужності i -го генератора; N – кількість генераторів.

Оскільки постійні витрати не залежать від навантаження, то ціну необхідно регулювати зменшуючи витрати палива, які вимірюються в \$/кВт·год. Це можливо за оптимального розподілу потужності навантаження між декількома паралельно включеними генераторам. Пошук оптимального розподілу потужностей з мінімальними витратами є задачею нелінійного програмування. На кожному інтервалі з урахуванням попередніх значень потужностей генераторів задля забезпечення поточного значення потужності навантаження P_n розраховуються необхідні величини потужностей ДГ, що відповідають мінімальним витратам палива, та на які треба змінити потужності кожного генератора. Такий алгоритм дає змогу мінімально змінювати потужності

генераторів відносно попереднього значення, не призводячи до частих пусків і зупинок дизеля та тривалих перехідних процесів.

Алгоритм розрахунку на прикладі трьох генераторів містить наступні кроки:

1. Завдання початкових умов: криві $C_1(P)$, $C_2(P)$ та $C_3(P)$ у вигляді неперервних функцій; P_{10} , P_{20} , P_{30} початкові значення потужності навантаження.

2. Завдання поточного значення потужності навантаження P_{Hi} .

3. Розрахунок необхідного значення зміни потужності $\Delta P_i = P_{Hi} - (P_{1(i-1)} + P_{2(i-1)} + P_{3(i-1)})$.

4. Знаходження мінімуму функції

$$C_{\min}(P_i) = C_1(P_{1(i-1)} + \Delta p_{1i}) + C_2(P_{2(i-1)} + \Delta p_{2i}) + C_3(P_{3(i-1)} + \Delta p_{3i})$$

за допомогою функції *fmincon* (обмежена нелінійна багатовимірна функція мінімуму)

$$\min_{\Delta p} C_{\min}(\Delta p) \text{ such that } \begin{cases} \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 = \Delta P \\ -\Delta P \leq \Delta p_i \leq \Delta P \end{cases}, \quad (5)$$

та визначення Δp_{1i} , Δp_{2i} , Δp_{3i} – величин потужності, на які треба змінити (збільшити або зменшити) потужність кожного джерела живлення.

5. Розрахунок потужностей, які необхідно встановити для отримання мінімальних витрат

$$P_{1i} = P_{1(i-1)} + \Delta p_{1i}, \quad P_{2i} = P_{2(i-1)} + \Delta p_{2i}, \quad P_{3i} = P_{3(i-1)} + \Delta p_{3i}. \quad (6)$$

Отримані значення потужностей є початковими умовами для наступного розрахунку.

6. Розрахунок повторюється з п. 2, якщо P_{Hi} змінило своє значення.

Аналогічний алгоритм можна використовувати і для більшої кількості генераторів.

Розглянемо приклад розрахунку мінімальних витрат палива за паралельного з'єднання трьох дизель-генераторів (рис. 1, а). Потужність споживача (навантаження) представлено у вигляді ступінчатого добового графіку електричних навантажень (рис. 1, б) для 48 інтервалів часу.

Дизель-генератори ДГ1, ДГ2, ДГ3 обрано на різну потужність: $P_1=65$ кВт, $P_2=75$ кВт, $P_3=100$ кВт. Вони мають індивідуальні графіки $C_1(P)$, $C_2(P)$, $C_3(P)$, наближені до реальних (рис. 1, в) згідно (1) при $C_{\text{пот}} = \text{const}$, $\Delta C = 0$ у відносних одиницях від максимально значення C_{max} .

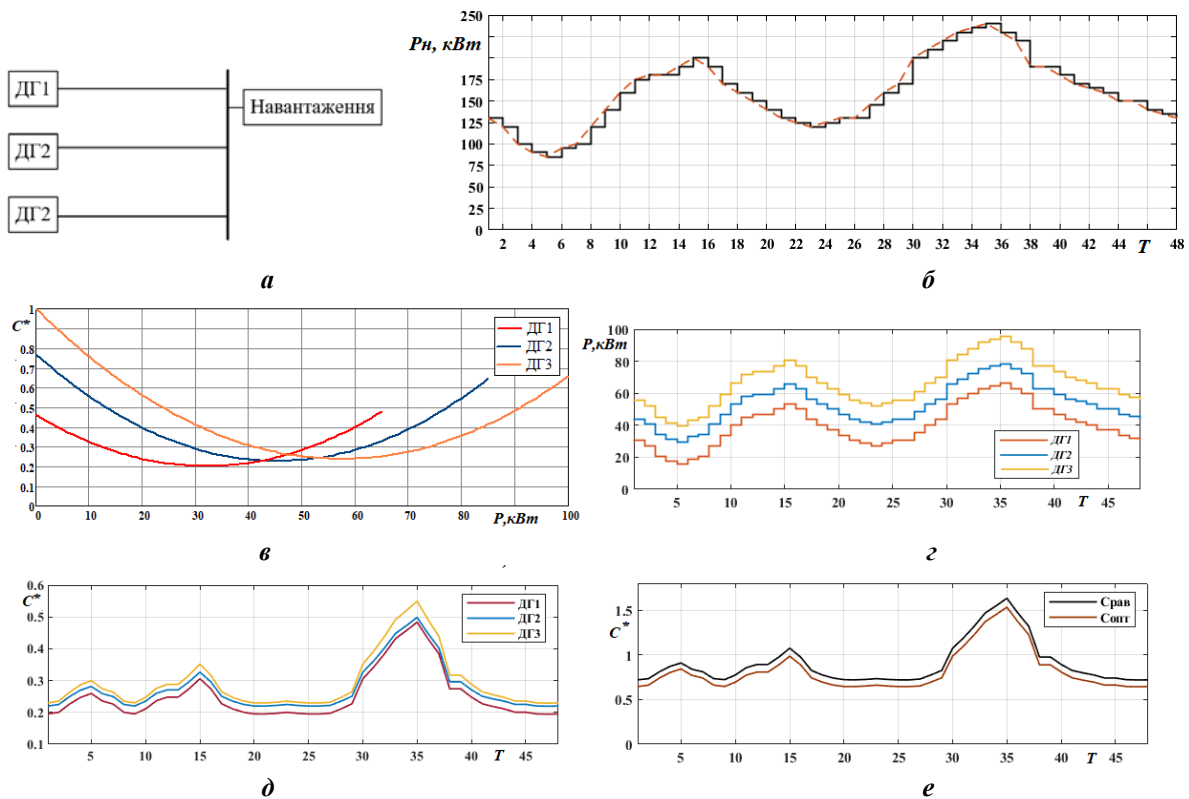


Рис. 1

Для наведеного графіка (рис. 1, б) електричних навантажень програмно проведено пошук оптимального розподілу потужностей між трьома генераторами (рис. 1, д) та розрахунок мінімального значення сумарних витрат $C_{\text{опт}}$ (рис. 1, е). Для порівняння зображено графік сумарних

витрат $C_{\text{равн}}$ за рівномірного розподілу потужності по генераторам, як це роблять за відсутності інформації про індивідуальні залежності палива від потужності, який розраховується за виразом для кожного інтервалу

$$C_{\text{равн},i} = C_{1i} \left(\frac{P_{ni}}{3} \right) + C_{2i} \left(\frac{P_{ni}}{3} \right) + C_{3i} \left(\frac{P_{ni}}{3} \right). \quad (7)$$

Для аналізу кривих розраховано середнє значення ціни $C_{\text{сер}}$, $C_{\text{сер,равн}}$ на всьому інтервалі, процент зміни ціни відносно рівномірного розподілу потужностей $C_{\text{пр}}$ та $C_{\text{Г,ср}}$ (таблиця). В середньому за оптимального розподілення зменшення витрат складо 9,7%. Витрати палива для

Склад системи	$C_{\text{сер}}$	$C_{\text{равн,сер}}$	$C_{\text{пр}} \%$	$C_{\text{пр,баз}} \%$	$C_{\text{Г,ср}}$
ДГ1, ДГ2, ДГ3 (базова)	0,84	0,94	9,7	-	0,89
PV, ДГ2, ДГ3	0,707	0,78	10	19,5	0,718
ДГ1, PV, ДГ3	0,705	0,85	20,6	19,95	0,724
ДГ1, ДГ2, PV	0,702	0,86	23	20,6	0,726

кожного генератора окремо наведено на рис. 1, д.

Незважаючи на низьку вартість ДГ, простоту резервування та експлуатації, використання ДГ в локальних мобільних системах має низку недоліків: високу собівартість

електроенергії, негативний вплив на екологію, доставка палива. Введення в локальну систему відновлювальних джерел енергії призводить до економії дизельного палива, проте збільшує встановлену потужність та вартість енергетичного обладнання гібридної системи, а також впливає на надійність та режими роботи складових енергетичного комплексу.

В системі, яку представлено вище, задля зниження вартості енергії та зменшення викидів парникових газів було замінено один з генераторів сонячною енергетичною установкою PV з

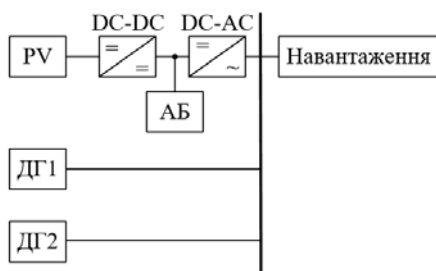


Рис.2

перетворювачем постійної напруги DC-DC, інвертором DC-AC та акумуляторною батареєю АБ (рис. 2).

Під час аналізу криву залежності витрат на постачання енергії та обслуговування сонячної системи представлено у вигляді лінійної функції. Прийнято припущення, що потужність сонячної панелі постійна у час. Таке припущення справедливе за наявності акумуляторної батареї. За базову ціну сонячної електроенергії за 1 кВт взято середню ціну у 2020 році 0,04 \$/кВт·год [10].

На рис. 3 наведено графіки роботи гібридної системи у разі заміни ДГ3 з максимальною потужністю 100 кВт на СЕУ. Графік навантаження при цьому залишився незмінним (рис. 1, б). У порівнянні з базовою системою з трьома ДГ ціна за кВт·год зменшилася на 20,6%. Також проведено аналіз заміни ДГ2 на СЕУ з потужністю 75 кВт та заміни ДГ1 на СЕУ з потужністю 65 кВт (див. табл.).

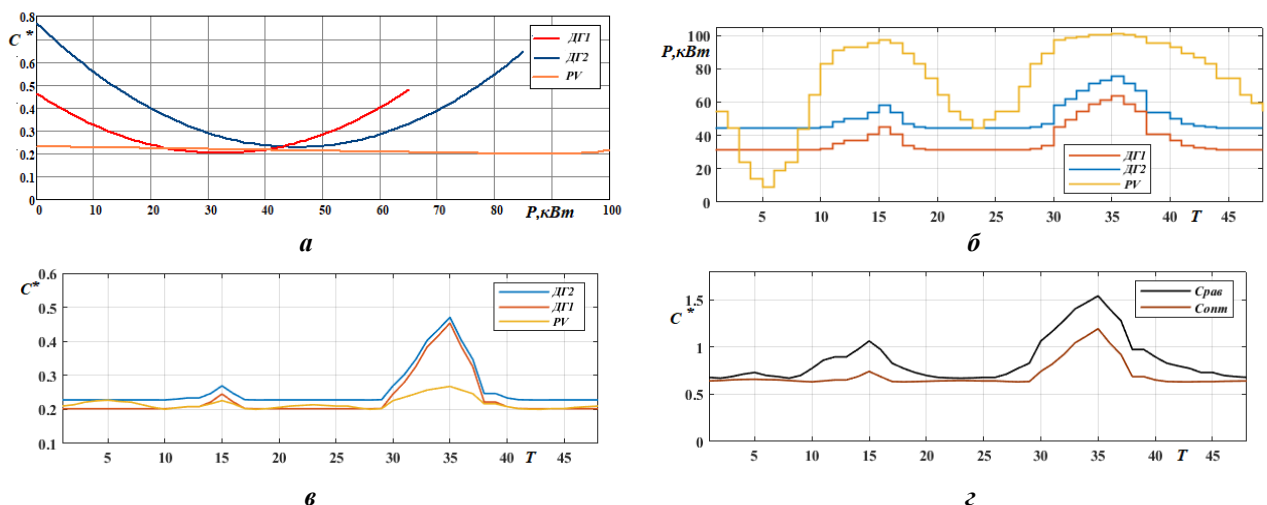


Рис. 3

У порівнянні з рівномірним розподілом потужності навантаження використання оптимального алгоритму в локальних системах дає змогу знизити ціну в середньому від 9 до 20 % за рахунок перерозподілу вироблення електроенергії серед генераторів.

Застосування наведеного алгоритму дасть змогу:

- керувати в реальному часі генераторами безперервно або через деякі проміжки часу;
- оптимізувати склад локальної системи на етапі проектування виробником електроенергії за рахунок комбінування різних типів генераторів на різну потужність для відомих графіків електричних навантажень;
- знизити собівартість електроенергії вже існуючих систем у разі керування з оптимальним перерозподілом потужності між генераторами;
- провести аналіз впливу споживачем добових графіків потужностей споживаної електроенергії на зміну вартісних показників системи, що за динамічного ціноутворення дасть змогу споживачу економити за рахунок перерозподілу своєї потужності протягом дня;
- провести попередній розрахунок витрат для різних дизель-генераторів в системі для заданих графіків потужностей навантажень, і, якщо це потрібно, заміну існуючих генераторів в системі на генератори з меншими витратами первинного палива або заміну комплектуючих.

У подальшому вдосконалення програми дасть змогу проводити аналіз гібридної системи з дизель-генераторами, сонячними та вітрогенераторами у своєму складі, а також враховувати вплив перехідних процесів у разі зміни потужності навантаження.

Висновки. Для динамічної тарифікації в локальних ринках розроблено алгоритм та на його основі програма на мові програмування Matlab, що розраховує оптимальний розподіл потужностей генератора, які відповідають мінімальному значенню витрат палива, задля забезпечення потужності навантаження P_H .

Розподіл потужностей в динамічному режимі для добового графіку електричних навантажень за умови мінімальних витрат дав змогу отримати меншу вартість електроенергії в локальних гібридних системах на основі дизель-генераторів до 23% у порівнянні з рівномірним розподілом в залежності від складу системи.

Введення СЕУ з акумуляторною батареєю дало змогу підвищити енергоефективність, зменшити витрати первинного палива зменшити ціну за рахунок зниження поточних витрат СЕУ. Вартість за 1 кВт·год знизилася в середньому на 20% по відношенню до структури з трьох дизель генераторів та залежить від характеристик генераторів, які у даний момент здійснюють генерацію електроенергії в локальній системі.

Аналіз отриманих результатів для наведених прикладів з заміною одного ДГ на СЕУ показав, що співвідношення між встановленими потужностями сонячної станції та дизельної електростанції незначно впливає на ціну по відношенню до базової структури і складає 19,6 – 20,6%.

1. Dudjak V., Neves D., Alskaf T., Khadem S., Pena-Bello A., Saggese P., Bowler B., Andoni M., Bertolini M., Zhou Yue, Lormeteau B., Mustafa A. Mustafa, Wang Yingjie, Francis Ch., Zobiri F., Parra D., Papaemmanouil A. Impact of Local Energy Markets Integration in Power Systems Layer: A Comprehensive Review. *Applied Energy*. 2021. Vol. 301. Pp. 117-434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117434>.

2. Honarmand M.E., Hosseinneshad V., Hayes B., Siano P. Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. 2021. Vol. 14(11): 3110. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113110>.

3. Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*. 2018. Pp. L 328/210 – L 328/230.

4. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв С.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>

5. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. *Science and Education a New Dimension*. Hungary, 2021. Vol. IX (31). Issue 250. Pp. 46-49.

6. Блінов І.В., Парус Є.В. Врахування мережевих обмежень та мінімізація різниці цін між ринками електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 81-88.

7. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О. Складові моделі для аналізу впливу відновлювальних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 72-75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072>.

8. Rehman S. Hybrid Power Systems – Sizes, Efficiencies, and Economics. *Energy Exploration & Exploitation*. 2021. Vol. 39. No 1. Pp. 3-43. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598720965022>

9. Rehman S., Natrajan N., Mohandes M., Alhems L.M., Himri Y., Allouhi A. Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu. *IEEE Access*. 2022. Vol. 8. Pp. 143881-143890. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>

10. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2020. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (accessed at 05.05.2022).

OPTIMIZATION OF CONSUMPTION OF PRIMARY FUEL IN LOCAL ELECTRICITY MARKETS FOR SYSTEMS USING DIESEL GENERATORS

S.P. Denysiuk, H.S. Bielokha, D.G. Derevianko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: pointage13@gmail.com.

Local energy markets represent a separate distribution system with several sources of distributed generation and with its own network-independent operator. The cost of electricity in local systems depends on many criteria. They include the consumption of primary fuel for diesel generators, which depend on their capacity. Equal distribution of power on generators running in parallel leads to an increase in primary fuel consumption. An algorithm for optimizing fuel consumption, which calculates the power distribution of generators connected in parallel, has been developed. These capacities correspond to the minimum value of fuel consumption. The system using three diesel generators and the option of replacing one generator with a solar electric installation was considered. The use of the optimal algorithm allows for reducing the price by an average of 9 to 20% if compared to the uniform distribution. The introduction of a photovoltaic system with a rechargeable battery allowed to increase energy efficiency and reduce the price due to lower running costs of the solar installation. References 10, figures 3, tables 1.

Keywords: local electricity markets, diesel generators, primary fuel consumption, photovoltaic system.

1. Dudjak V., Neves D., Alskaf T., Khadem S., Pena-Bello A., Saggese P., Bowler B., Andoni M., Bertolini M., Zhou Yue, Lormeteau B., Mustafa A. Mustafa, Wang Yingjie, Francis Ch., Zobiri F., Parra D., Papaemmanouil A. Impact of Local Energy Markets Integration in Power Systems Layer: A Comprehensive Review. *Applied Energy*. 2021. Vol. 301. Pp. 117-434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117434>.

2. Honarmand M.E., Hosseinezhad V., Hayes B., Siano P. Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. 2021. Vol. 14(11): 3110. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14113110>.

3. Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*. 2018. Pp. L 328/210 – L 328/230.

4. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52-61. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>

5. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. *Science and Education a New Dimension*. Hungary, 2021. Vol. IX (31). Issue 250. Pp. 46-49. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2021-250IX31-11>

6. Blinov I.V., Parus E.V. Congestion management and minimization of price difference between coupled electricity markets. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 81-88. (Ukr)

7. Ivanov H.A., Blinov I.V., Parus Ye.V., Miroshnyk V.O. Components of model for analysis of influence of renewables on the electricity market price in Ukraine. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2020. No 4. Pp. 72-75. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.072>.

8. Rehman S. Hybrid Power Systems – Sizes, Efficiencies, and Economics. *Energy Exploration & Exploitation*. 2021. Vol. 39. No 1. Pp. 3-43. DOI: <https://doi.org/10.1177/0144598720965022>

9. Rehman S., Natrajan N., Mohandes M., Alhems L.M., Himri Y., Allouhi A. Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu. *IEEE Access*. 2022. Vol. 8. Pp. 143881-143890. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>

10. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2020. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020> (accessed at 05.05.2022).

Надійшла 19.05.2022
Остаточний варіант 11.08.2022

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ НА ПОКРИТТЯ НЕБАЛАНСІВ УЧАСНИКІВ БАЛАНСУЮЧОЇ ГРУПИ ВИРОБНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

І.В. Блінов*, докт. техн. наук, В.О. Мірошник**, канд. техн. наук, С.С. Лоскутов***.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: blinovigor81@gmail.com, miroshnyk.volodymyr@gmail.com, loskutov.stepan1@gmail.com.

Виконано аналіз особливостей роботи балансуючої групи виробників електричної енергії з відновлюваних джерел енергії в частині розподілу вартості небалансів. Розглянуто передумови впровадження механізму підтримки виробників у вигляді Feed-in-premium. Проаналізовано переваги та недоліки самостійної участі виробника на оптовому ринку електричної енергії. Проведені розрахунки показують, що у разі виходу з балансуючої групи ДП «Гарантований покупець» доцільним є утворення нової балансуючої групи. Запропоновано метод централізованого коригування прогнозів виробників з метою зниження витрат на покриття небалансів учасників балансуючої групи. В основі методу є застосування коефіцієнті, розрахованих шляхом оптимізації цільової функції, яка враховує інтерес балансуючої групи загалом та кожного окремого учасника. Розрахунки показали, що застосування даного методу дає змогу знизити вартість небалансів для більшості модельних балансуючих груп. Бібл. 9, рис. 2.

Ключові слова: ринок електроенергії, відновлені джерела енергії, Feed-in-premium, балансуючі групи, метод коригування прогнозу генерації.

Вступ. Значне зростання встановленої потужності електростанцій з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) [1, 2] за діючої форми підтримки у вигляді «зеленого» тарифу (*Feed-in-tariff*) [3] призвело до розбалансування фінансової системи оптового ринку електричної енергії України [4], що проявилось накопиченням боргів у основних інституційних учасників ринку таких, як НЕК «Укренерго» та ДП «Гарантований покупець». Так, заборгованість ДП «Гарантований покупець» перед виробниками за 2020 р. складала 31% від сумарної вартості купленої електричної енергії, а в 2021 р. продовжила зростати. Станом на початок жовтня 2021 р. загальний борг НЕК «Укренерго» перед ДП «Гарантований покупець» за оплату послуги зі збільшення частки відновлюваних джерел енергії (виплати по «зеленому» тарифу) становив 25,1 млрд грн.

Крім того сумарні обсяги генерації ВДЕ в деякі години доби перевищують можливості енергосистеми зі споживання за умов дотримання встановлених вимог щодо надійності та резервування потужностей в ОЕС України [1, 5]. Для підтримання стабільної роботи енергосистеми Оператор системи передачі (ОСП) запровадив систему керування обмеженнями ВДЕ. Механізм роботи цієї системи подібний до механізму роботи балансуючого ринку [6, 7]. Виробники з ВДЕ повинні подавати заявки на зменшення навантаження, при цьому обсяг заявки ґрунтується на прогнозах обсягу відпуску електричної енергії [2, 8]. Оплата невідпущеної, внаслідок обмежень ОСП, електричної енергії здійснюється за встановленим для виробника «зеленим» тарифом.

Враховуючи ситуацію, яка склалася на оптовому ринку електричної енергії, Міністерство енергетики України почало розробку альтернативного механізму підтримки виробників з ВДЕ. В законодавство вводиться поняття «преміального» тарифу (*Feed-in-premium - FIT*) [9], за яким виробникам компенсується різниця між фактичною ціною продажу електричної енергії на оптовому ринку та ставкою «зеленого» тарифу. На разі деталі механізму ще обговорюються, проте можна очікувати, що даний механізм стане доступний для виробників, які вийдуть з балансуючої групи ДП «Гарантований покупець» (ГП), втрачаючи при цьому знижки на оплату власних небалансів. З іншого боку перевагою *FIT* є те, що виробник частину вартості проданої енергії отримує день-в-день (при продажі на ринку «на добу наперед») або по передоплаті (у разі укладанні довгострокових договорів), що дозволить суттєво покращити їхній фінансовий баланс.

Задля дослідження переваг та недоліків нової схеми підтримки виробників з ВДЕ та механізмів утворення та роботи балансуючих груп загалом, в Інституті електродинаміки НАН

© Блінов І.В., Мірошник В.О., Лоскутов С., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-8010-5301> ; ** <https://orcid.org/0000-0001-9036-7268> ;

*** <https://orcid.org/0000-0001-9818-6381>

Україні було розроблено спрощену модель балансуєчої групи виробників з ВДЕ. Модель використовує реальні дані 8 виробників з ВДЕ (4 сонячні (c1...c4) та 4 вітрові (v1...v4) електростанції), обсяг сумарного відпуску електроенергії моделі масштабовано до обсягів відпуску реальної балансуєчої групи ДП «Гарантований покупець».

Метою статті є порівняльний аналіз механізмів розподілу відповідальності за небаланси в межах балансуєчої групи та розробка методу централізованого коригування прогнозів обсягу генерації окремого виробника для зниження вартості таких небалансів.

Порівняння механізмів розподілу відповідальності за небаланси в межах балансуєчої групи. Незважаючи на очевидні переваги Feed-in-premium, проведені дослідження з використанням розробленої моделі балансуєчої групи виробників з ВДЕ показали, що вихід з такої групи без утворення іншої призводить до значного зростання витрат, пов'язаних з похибкою прогнозу. За результатами розрахунків для серпня 2020 р. середнє зростання частки таких витрат від загальних надходжень за «зеленим» тарифом склало 10,5%, а максимальнє зростання – на 18,9 % (v2). На рис. 1 для модельного прикладу показані розраховані витрати, пов'язані з похибкою прогнозу за умов самостійної участі кожного виробника з ВДЕ на ринку та за умов участі в балансуєчій групі при розрахунку вартості небалансів за діючою сьогодні формулою. Значення наведено у відсотках відносно суми надходжень від «зеленого» тарифу.

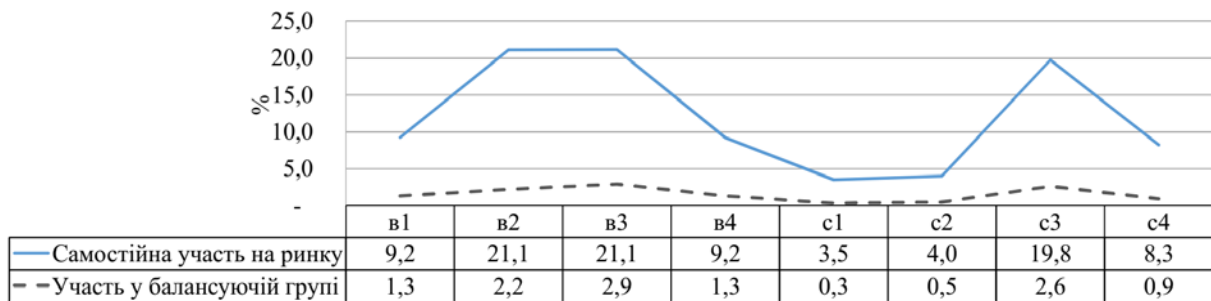


Рис. 1

Варто зазначити, що у разі виходу з балансуєчої групи розраховувалася вартість похибки прогнозів, яка не дорівнює вартості небалансів і розраховується як різниця між потенційною вигодою на ринку «на добу наперед» (РДН) та витратами/надходженнями від небалансів

$$COST_{error} = COST_{pred} + COST_{imb} - COST_{fact}$$

де $COST_{error}$ – вартість похибки прогнозу; $COST_{pred}$ – вартість прогнозного графіку в сегменті РДН; $COST_{fact}$ – вартість фактичного графіку в сегменті РДН; $COST_{imb}$ – вартість небалансів (може приймати від'ємні значення).

Під вартістю «прогнозного» та «фактичного» графіків розуміється вартість електричної енергії, проданої згідно прогнозного або фактичного графіків відпуску електричної енергії.

Розрахунок за даними серпня 2021 р., тобто після впровадження нової системи прогнозування і різкою зміною цін на оптовому ринку, показав середнє зростання частки витрат, пов'язаних з похибкою прогнозу на 10% (максимальнє зростання 18,9%).

Аналіз ефективності нової системи прогнозування ДП «Гарантований покупець» показав, що її впровадження призвело до зниження середньодобової похибки прогнозу RMSE на 55% – з 344 до 155 МВт·год. Найбільше зниження похибки прогнозів спостерігається для фотоелектричних електростанцій 61% з 278 до 108 МВт·год, для вітрових електростанцій зниження становить 13% – з 114 до 99 МВт·год. Зниження похибки прогнозу ГП і, як наслідок, зниження вартості похибки прогнозу учасників балансуєчої групи ГП стимулює виробників, які не можуть забезпечити порівнювану якість прогнозу та участь в сторонній балансуєчій групі залишатися в рамках діючого механізму підтримки.

З іншого боку, додатковим стимулом для виходу з балансуєчої групи ГП є суттєве зростання ціни на оптовому ринку. Середньозважена ціна в серпні 2021 (2077 грн/МВт·год) на ринку «на добу наперед» торгової зони ОЕС України виросла на 44% відносно липня (1444 грн/МВт·год) і продовжила зростати в вересні (2230 грн/МВт·год). Виробники за ФІТ зможуть отримувати більшу частку грошей безпосередньо в наступний день після відпуску електричної енергії. Для вітрових

електростанцій така ціна РДН покриває 75% «зеленого» тарифу, для фотоелектричних електростанцій – 53%. Тому, за умови вдосконалення власних методів прогнозування та утворення ефективної балансуєчої групи новий механізм підтримки надає виробникам суттєві переваги.

Детальний аналіз вартості похибок прогнозу в балансуєчих групах, які можна утворити з наявних 8 електростанцій, показав, що для 7 з них можна утворити балансуєчу групу, відмінну від базової (до якої входять всі станції) і в якій вартість похибки прогнозу для окремої станції буде нижча. Середнє зниження вартості похибки прогнозів для цих електростанцій склало 3%. Аналіз структури утворених балансуєчих груп показав, що найбільш ефективними є ті, що включають і вітрові і сонячні електростанції. Додаткове залучення енергоємних споживачів та системи накопичення енергії потенційно дає змогу ще більше знизити вартість похибки прогнозів.

Дослідження механізмів розподілу відповідальності за небаланси в межах балансуєчої групи показали, що під час розподілу вартості похибки прогнозу між виробниками, похибка прогнозу яких співпадає за знаком з похибкою прогнозу всієї групи (варіант V1), створюються умови для того, що окремі виробники можуть уникати витрат, пов'язаних з небалансами, незалежно від середньої похибки їхніх прогнозів

$$Cost_i^{IMB} = \begin{cases} 0, i \notin K \\ \frac{\varepsilon_i}{\sum_{j \in K} \varepsilon_j} \cdot Cost_{BG}^{IMB}, i \in K ; K = \{j : sign(\varepsilon_j) = sign(\varepsilon_{BG})\}; \end{cases}$$

$$sign(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x = 0 ; \\ -1, x < 0 \end{cases}$$

де ε_i – небаланс i -го учасника балансуєчої групи; ε_{BG} – сальдований небаланс балансуєчої групи; $Cost_i^{IMB}$ – вартість витрат на покриття небалансів i -го учасника балансуєчої групи; $Cost_{BG}^{IMB}$ – вартість небалансів всієї балансуєчої групи; K – множина індексів учасників балансуєчої групи, небаланс яких співпадає за знаком з небалансом балансуєчої групи.

Їхня частка розподіляється між іншими учасниками групи. Це, в свою чергу, знижує стимули до вдосконалення методів прогнозування. Більш коректним є розподіл витрат балансуєчої групи пропорційно до абсолютних похибок прогнозів без врахування знаку похибки прогнозу (варіант V2)

$$Cost_i^{IMB} = \frac{|\varepsilon_i|}{\sum |\varepsilon_i|} \cdot Cost_{BG}^{IMB} .$$

На рис. 2 наведено частки кожної електростанції в загальних витратах балансуєчої групи на покриття небалансів при двох варіантах механізму розподілу небалансів.

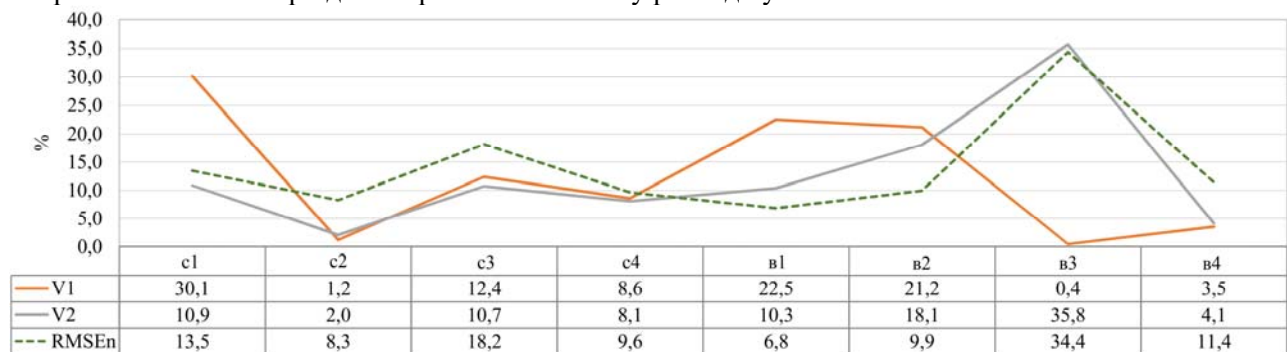


Рис. 2

З наведеного рисунку видно, що у разі застосування варіанту V1 частка виробника 7 (СЕС) у загальних витратах дорівнює 0. При цьому його відносна похибка прогнозу (RMSEn) найвища. Розрахунок за варіантом V2 в більшій мірі корелює з похибками прогнозу: чим більша похибка, тим більша частка виплат.

Зниження вартості похибки прогнозу за рахунок централізованого коригування прогнозів учасників балансуєчої групи. Запропоновано новий метод зниження вартості небалансів

діючої балансуючої групи, суть якого полягає в розрахунку коефіцієнтів, які використовуються для коригування заявок на продаж учасників балансуючої групи

$$Z_i^{DAM} = c_i \cdot W_i^{pred} - Z_i^{LT},$$

де Z_i^{DAM} – обсяг заявки на продаж i -го учасника балансуючої групи на РДН; Z_i^{LT} – обсяг укладених довгострокових договорів i -го учасника; W_i^{pred} – прогнозний обсяг відпуску i -го учасника; c_i – коригуючий коефіцієнт i -го учасника $c_i \in c^*$; c^* – вектор оптимальних коригуючих коефіцієнтів балансуючої групи.

Коефіцієнти розраховуються шляхом оптимізації розробленої цільової функції

$$c^* = \arg \min_{c \in C} L(W^{fact}, W^{pred}, c);$$

$$L = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \left(W_l^{fact} - \sum_{i=1}^k c_i \cdot W_{li}^{pred} \right)^2 + \alpha \cdot \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (1 - c_i)^2;$$

W_l^{fact} – сумарний фактичний відпуск балансуючої групи в годину $l=1 \dots n$; W_{li}^{pred} – прогнозний відпуск учасника i в годину l ; k – кількість учасників в балансуючій групі; α – вага штрафу за відхилення значень коефіцієнтів від 1. Значення α залежить від сумарного обсягу відпуску балансуючої групи. Для розрахунків використовувалися значення $\alpha = 100\,000$.

Дана цільова функція покликана знизити відхилення сумарного прогнозного скоригованого графіку відпуску від фактичного графіку відпуску балансуючої групи (перша складова). Штрафна функція (друга складова) розроблена таким чином, щоб наблизити значення коефіцієнтів до одиниці. Дане обмеження дещо знижує ефективність запропонованого методу, але без його застосування діапазон значень коефіцієнтів для деяких балансуючих груп становить від 0,1 до 1,5, що буде призводити до значної дискримінації певних учасників такої балансуючої групи.

Оцінювання ефективності даного методу проводилося шляхом визначення сумарної вартості похибки прогнозу балансуючої групи з та без розрахованих коефіцієнтів. Для 209 модельних балансуючих груп середнє зниження сумарної вартості похибки прогнозів склало 17%, для решти 38 груп вартість підвищилася в середньому на 3%. Максимальне зниження вартості склало 49%, максимальне зростання вартості – 10,6%. Аномальні значення зниження вартості пов'язані із значним заниженням або завищенням коефіцієнтів окремих учасників ($c_i < 0,8$ або $c_i > 1,2$), що може вказувати на недоцільність утворення даної балансуючої групи.

Необхідною умовою для застосування даного методу є алгоритмізація прогнозів виробників та незмінність методів прогнозування. У разі зміни методу прогнозування у одного учасника групи або зміни структури самої балансуючої групи необхідно проводити повторну оптимізацію або оновлювати структуру цільової функції.

Висновки. В умовах підвищення ціни на оптовому ринку електричної енергії та накопичення заборгованості по «зеленому» тарифу у виробників існують економічні стимули до переходу на «преміальний» тариф з обов'язковим виходом з балансуючої групи ДП «Гарантований покупець». При виході з цієї балансуючої групи у виробників з ВДЕ можуть суттєво зрости витрати, пов'язані з похибкою прогнозу обсягів відпуску. За умови самостійної участі на ринку витрати, пов'язані з похибкою прогнозу, в середньому можуть вирости до 10% відносно надходжень від «зеленого» тарифу. Застосування запропонованого методу до коригування обсягів продажу учасників балансуючої групи в більшості випадків дає змогу суттєво знизити витрати балансуючої групи, пов'язані з похибкою прогнозу обсягу відпуску.

Роботу виконано за держбюджетною темою “Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E” (шифр «Режим-2»), КПКВК 6541230.

1. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.03.052>

2. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О. Складові моделі для аналізу впливу відновлювальних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 72-75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.04.072>
3. Про альтернативні джерела енергії. Верховна Рада України. Закон № 555-15.
4. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
5. Басок Б.І., Буткевич О.Ф., Дубовський С.В. Техніко-економічні аспекти оцінювання перспектив декарбонізації об'єднаної енергосистеми України. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.05.055> .
6. Blinov I., Kyrylenko O., Parus E., Rybina O. Decentralized Market Coupling with Taking Account Power Systems Transmission Network Constraints. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. vol 388. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_1
7. Про затвердження Правил ринку. Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018. Київ.
8. Lezhniuk P., Kravchuk S., Netebskiy V., Komar V., Lesko V. Forecasting Hourly Photovoltaic Generation On Day Ahead. IEEE 6th Int. Conf. on *Energy Smart Syst.*, Kyiv, Ukraine, Apr. 17-19, 2019. Pp. 184-187. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764245>
9. Ukraine considers feed-in-premiums to further support renewable energy projects (2021). URL: https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2021/09/ukraine-considers-feed-in-premiums-to-further-support-renewable-energy-projects?cc_lang=en.

REDUCING THE COST OF IMBALANCES OF THE BALANCING GROUP OF PRODUCERS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES

I.V. Blinov, V.O. Miroshnyk, S.S. Loskutov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: blinovigor81@gmail.com, miroshnyk.volodymyr@gmail.com, loskutov.stepan1@gmail.com.

The analysis of the peculiarities of the work of the balancing group of electricity producers from renewable energy sources in terms of the distribution of the cost of imbalances. Prerequisites for the introduction of a mechanism to support producers in the form of Feed-in-premium are considered. The advantages and disadvantages of independent participation of the producer in the wholesale electricity market are analyzed. The calculations show that when leaving the balancing group of SE "Guaranteed Buyer" it is advisable to form a new balancing group. A method of centralized adjustment of producers' forecasts is proposed in order to reduce the cost of covering the imbalances of the members of the balancing group. The method is based on the use of coefficients calculated by optimizing the objective function, which takes into account the interest of the balancing group as a whole and each individual participant. Calculations have shown that the application of this method reduces the cost of imbalances for most model balancing groups. References 9, figures 2.

Keywords. electricity market, renewable energy sources, Feed-in-premium, balancing groups.

1. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. (3): 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.03.052> (Ukr)
2. Ivanov G., Blinov I., Parus E., Miroshnyk V. Component models for the analysis of the impact of renewable energy sources on the market value of 171 electricity in Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. № 4. Pp. 72-75. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.04.072> (Ukr)
3. On alternative energy sources. Verkhovna Rada of Ukraine. Law № 555-15. (Ukr)
4. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No. 2019-VIII of 13.04.2017. (Ukr)
5. Basok B.I., Butkevych O.F., Dubovskiy S.V. Technical and economic aspects of decarbonisation prospects assessing of the interconnected power system of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No. 5. Pp. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.05.055> . (Ukr)
6. Blinov I., Kyrylenko O., Parus E., Rybina O. Decentralized Market Coupling with Taking Account Power Systems Transmission Network Constraints. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. vol 388. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_1
7. On Approval of Market Rules. NEURC's Resolution No. 307. 14. 03.2018. Kyiv. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2018.04.003>
8. Lezhniuk P., Kravchuk S., Netebskiy V., Komar V., Lesko V. Forecasting Hourly Photovoltaic Generation On Day Ahead. IEEE 6th Int. Conf. on *Energy Smart Syst.*, Kyiv, Ukraine, Apr.17-19, 2019. Pp. 184-187. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764245>
9. Ukraine considers feed-in-premiums to further support renewable energy projects (2021). URL: https://www.cms-lawnow.com/ealerts/2021/09/ukraine-considers-feed-in-premiums-to-further-support-renewable-energy-projects?cc_lang=en .

Надійшла 28.04.2022

Остаточний варіант 21.06.2022

DECISION-MAKING METHOD FOR THE OPTIMUM ALLOCATION OF CHARGING STATIONS OF ELECTRIC VEHICLE IN DISTRIBUTION NETWORKS

Ahmed Jassim Ahmed^{1*}, Mohammed H. Alkhafaji^{1**}, Ali Jafer Mahdi^{2***}

¹ University of Technology,
Baghdad, Iraq

E-mail: ahmedjasem858@gmail.com

² University of Kerbala,
Kerbala, Iraq

Electric vehicles are becoming prominent nowadays and playing an important role in the transportation sector as conventional vehicles affect the environment. The rising number of vehicles requires increasing the charging stations, which affects the distribution network if placed randomly. Therefore, selecting the optimal place for these charging stations is very important to mitigate the effect on the distribution system. This paper presents a decision-making method to select the location of the charging station in a radial distribution system optimally. The fixed point algorithm was used for the analysis of load flow. The analysis was carried out and tested on the 33 bus IEEE and a real case study in Iraq was used for the study. The result of the charging station placement is compared with other research and showed its efficiency in work. The analysis showed the effectiveness of the proposed method in reducing the effect of charging stations on voltages and losses under different conditions. References 27, Figures 10, Tables 6.

Keywords: optimal placement, load flow, charging stations, losses reduction, electric vehicles.

1. Introduction. Rising prices of oil and rising energy demand are major challenges that the transportation sector is currently facing [1, 2]. This is because the transportation sector's heavy reliance on oil as the primary energy source has a number of unfavorable influences that can have an impact on those sectors. In terms of the environment, the transportation industry is responsible for a significant amount of carbon dioxide released into the atmosphere, which results in a significant rise in the amount of emissions of greenhouse gases. As a direct consequence of this, the demand for electric vehicles (EVs) has been growing at a rapid pace as a direct response to the dramatic reduction in CO₂ emissions and operation costs [3, 4]. However, the widespread use of electric vehicles could pose a significant risk to the nation's power infrastructure because of the potential for an increase and variation in the amount of electricity required by EV charging stations (CS). They present an entirely new obstacle for the infrastructure of the distribution network as well as the operators of the distribution network. In point of fact, the distribution network could be negatively impacted by high electrical power demand brought on by the integration of electric vehicles (EVs), bus voltages, power loss, stability, voltage mismatch, and power efficiency. In addition, the increase in the number of electric vehicles calls for the installation of more dependable electric vehicle charging station (EVCS) systems [5, 6]. The availability of charging setup is a major aspect of promoting the widespread adoption of electric vehicles [7]; however, due to the limited electric range of EVs, it is necessary to use public charging stations when traveling long distances. As a result of this, the provision of a public charging service to act as a supplement to charging at home will be an essential requirement [8]. The adoption of electric vehicles will be slowed, and the operation of the electric grid will be impacted by inadequate planning for the implementation of charging infrastructure, especially the voltage and the losses. As a result, the placement of the charging stations should be done optimally [9]. Many studies on the topic of the optimal locations for charging stations of electric vehicles have been published.

In [10], the authors suggested that the objectives be investment costs, operation costs, maintenance costs, and network loss costs. The modified primal-dual interior-point algorithm was used to find the best location for charging stations. The authors in [11] proposed a multi-objective optimization based on the cost of lost energy during transportation, the cost of building a charging station, and the cost of lost energy at a substation. The binary lighting search algorithm was used to solve this problem. In [12], the

© Ahmed Jassim Ahmed, Mohammed H. Alkhafaji, Ali Jafer Mahdi, 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-9945-4947> ; ** <https://orcid.org/0000-0003-4568-1818>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-0162-4064>

city feeder of the Pokhara distribution network is used to allocate the charging stations for electric vehicles optimally. Genetic Algorithm is used to find the best place for charging stations. The effect of installing EV charging stations on voltage stability, reliability, and power loss is measured before and after the stations are put in place. When charging stations are allocated, the voltage in the bus drops because the load goes up. Power loss also goes up, but the reliability doesn't change. In [13], the authors provided four solutions to the problem of placement of the charging station, which is: greedy approach, iterative mixed integer linear program, chemical reaction optimization, and effective MILP. In [14], the authors used the Harries Hawk Optimization and Teaching Learning Based Optimization algorithms to find the best place for charging stations. This was done to minimize real power loss and average voltage deviation while increasing the voltage stability index, and they also made sure that the distributed generators were the right size and placed in the best places so that the charging stations would have the least impact on the network. Based on the fuzzy Analytical Hierarchy Process and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, the authors in [15] proposed the Geographic Information System-based Fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis approach to choose an optimal location of a charging station. In [16], a two-tiered intelligent energy management strategy is advocated as the best way to integrate EVs into the distribution network. This plan relied on two distinct layers: one for real power management at the nodes, with the goal of reducing the daily total cost of EV charging and discharging, and another for reactive power management at the system level, with the goal of lowering overall power loss by making better use of the EVs' reactive power capacity. In [17], the authors gave a method for solving the Route Node Coverage problem, which is used to find the best placement for charging stations for electric vehicles in a road transportation network. The author in [18] employed the cost as the primary objective function in the problem of the placement of charging stations, and the Binary Firefly Algorithm was used to find a solution to the problem. In [19], the mixed integer linear model is suggested as a way of allocating Charging, taking into account both transit systems and traditional systems. The suggested method finds where the stations should be and what they should be able to do so that EVs don't have to travel too far to reach them and the waiting time for the transport network charging facility is cut down.

From the mentioned studies, it can be said that placing the charging stations optimally in the power system is necessary. This paper proposes a new decision-making algorithm for the selection of electric vehicle charging stations. In this work, the IEEE 33 bus and a real network of Iraq/Baghdad/alghazalya systems are used for the placement of charging stations, and the openss program is used through the Matlab program; the analyses of the networks is carried out using the fixed point method.

2. Impact of integrating EVs on the distribution system

2.1. Impact on power losses

The impact of EV integration on power losses is the more EVs that are used, the greater the power losses due to increased load. The relationship between power losses and EV penetration is linear; to address this issue, the dual tariff scheme is used [15].

2.2. Impact on Voltages.

Uncontrolled integration of EVs with Microgrids results in a significant drop in voltage that may exceed the limits. But, with the dual-tariff charging scheme and the integration of DG, the voltage drop is less significant. This demonstrates the effective use of distributed energy resources in microgrids by charging EVs preferentially from renewables [20].

3. Methodology

3.1 Fixed point algorithm

In OpenDSS software, fixed-point algorithm is the default method to analyze load flow. This algorithm constructs a nodal admittance matrix to iteratively solve the power flow of distribution networks [21]. This approach varies from previous methods used in load flow studies such as Gauss-Seidel and Newton Raphson since it does not employ data of energy that is injected directly into the network. It generates an admittance matrix of the elements of the power distribution system. To compensate for the nonlinear part, elements of power conversion, which are loads and generators, are designed as

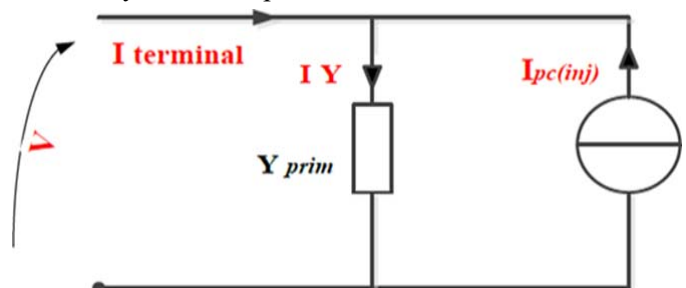


Fig. 1

a Norton's equivalent network with a fixed admittance matrix (Y_{prim}) and a compensation current $I_{comp}(inj)$, as shown in Figure 1 [22]. The algorithm is described in [22] as follows:

1. Opendss determines the system's nodal admittance matrix before beginning the algorithm. After that, disconnect all power conversion (components from the network. Finding the initial value of the node voltage to use it with the system admittance (Y_{system}) for iterations as below:

$$V_{a,n}^0 = [Y_{system}]^{-1} \times I_{source} \quad (1)$$

2. Connect all of the (PC) components with the system. Finding each (PC) element's compensation (injection) current ($I_{Comp, inj}$) using its admittance (Y_{system}), powers and voltages as shown in Figure 1. The current of compensation (I_{comp}), is the subtraction between the current of the linear portion of the power conversion element and the nonlinear element, if any, embedded in the Y_{system} matrix, as in Eq 2:

$$I_{comp, inj}^k = I_Y^k - I_{terminal}^k \quad (2)$$

3. To create a compensation current matrix, the ($I_{comp, inj}$) from each (PC) element is used. Matrix operations can be used to calculate node voltages using the compensation current matrix and the (Y_{system}) matrix, as shown in Eq 3:

$$\begin{bmatrix} V_a^k \\ \vdots \\ V_n^k \end{bmatrix} = [Y_{system}]^{-1} \times \begin{bmatrix} I_{source} \\ \vdots \\ I_{comp, inj}^k \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. The above steps keep repeating until convergence is reached, as shown in Eq 4:

$$error_{a,n}^k = \frac{V_{a,n}^k - V_{a,n}^{k-1}}{V_{source}} \quad (4)$$

where k denotes the number of iterations, (I_{source}) denotes source current, (V_{source}) denotes source voltage, and ($V_{a,n}$) Denotes node voltage. ($I_{terminal}$): terminal current, I_Y^k : is the current of the nonlinear element of power conversion, $I_{pc, comp, inj}$ =, injection, or compensation currents from elements of Power Conversion in the circuit, which could be nonlinear, $n=1,2, 3, \dots$: the total number of iterations. The flowchart in Figure 2 summarizes the algorithm's working steps.

4. Proposed method for charging stations allocation

Electric vehicles are becoming prominent nowadays, and they are expected to grow rapidly in the future, but at the same time, they act as a high load and affect the grid, so they need to be optimally placed to reduce the impact on the grid. This algorithm is a simple algorithm that works through the Matlab com interface and Opendss, it selects the bus that gives the best performance with minimum losses, as shown in Figure 3, and the procedure of the method is explained in the following steps:

Step 1: Read the parameters and data of the system
 Step 2: Analyze the load flow using the fixed point method.

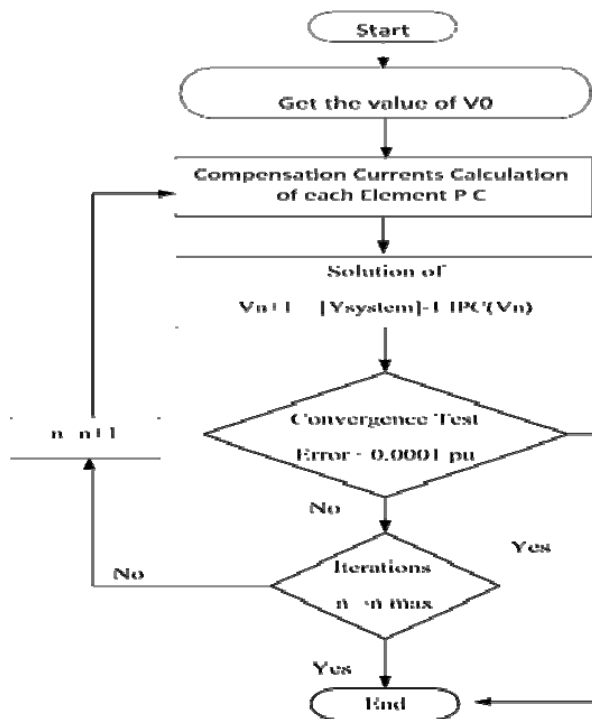


Fig. 2

- Step 3: Determine the total losses in the base case without charging stations.
- Step 4: Run the load flow analysis again with the addition of a charging station for bus i.
- Step 5: Determined the value of the losses with the addition.
- Step 6: Record the losses.
- Step 7: Run the load flow analysis for bus i+1.
- Step 8: Compare the new losses with the recorded losses value and store the lower.
- Step 9: Repeat 7 &8 until reaching bus n.
- Step 10: Show the optimal location for the addition of charging stations.

4.1 Objective function

Charging stations should be put in places where the increased load from EVs has the least effect on how well the distribution system works. The radial Distribution System has a high ratio of R/X, which means that basic load flow methods like gauss seidel or Newton Raphson approaches do not give accurate results. The objective of this study is to reduce power losses as much as possible, as given in the equation below:

$$f = \min \sum_{i=1}^n R_i + i_i^2 \quad (5)$$

where R_i represents the resistance of the i th branch, I_i represents the current that flows in the i th branch, i is the branch number, and n is the total number of branches.

5. Results and discussion

In this proposed work, the IEEE 33 bus and a real case network of Baghdad/alghazalya are considered for the placement of electric vehicle charging stations, and the effect on losses and voltages is recorded and compared with other studies and taking into consideration the distance between the CS, the number of working stations, and the level of EVs presented at the CS to show the efficiency of the proposed method.

5.1 Case 1: IEEE 33 bus system

The 33 bus IEEE system is shown in Figure 4. It has 33 buses and 32 branches. The voltage of the system is 12.66 kV, and the base power is 1000 kW. The limits of voltages are within $\pm 5\%$. The active power of the system is 3.715 MW, and the reactive power is 2.3 MVAR. The total losses of the system is 202.6, and the minimum voltage is 0.91308 at bus 18. The electrical parameters of the system are from [23]. The fixed point method was used for power flow analysis; the result of the analysis showed that the loss is 202.6 kW and the minimum voltage is 0.91308 at bus 18, which are the same results when compared with the studies in [24-26]. Figure 5 shows the voltages for the base load.

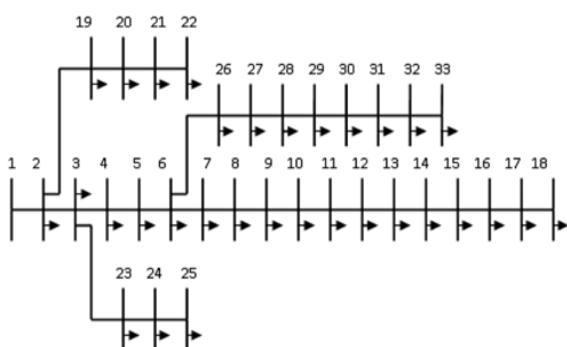


Fig. 4

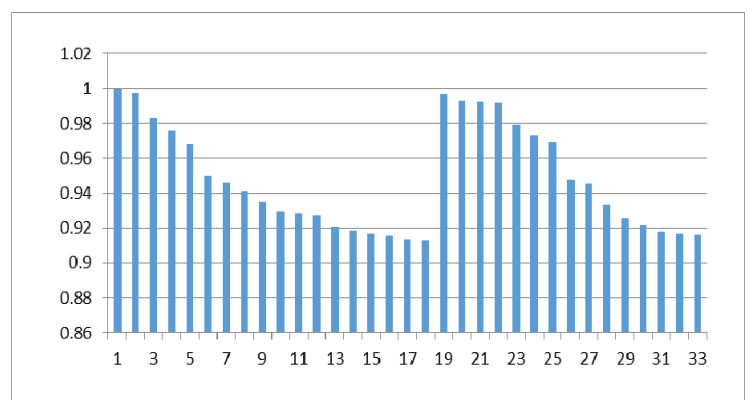


Fig. 5

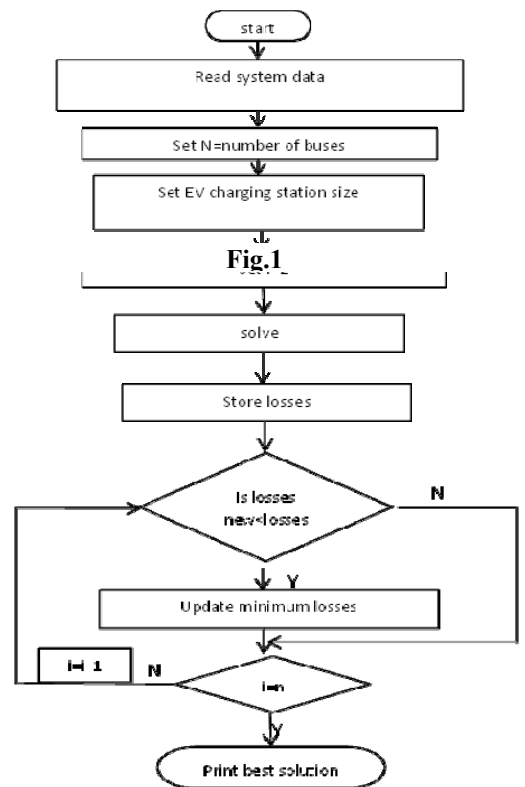


Fig. 3

The proposed method was used to test the method and select the optimum location for the placement of the charging station in the 33 bus IEEE system; Table 1 shows the features and details of the EVs used in this study under charging mode 2 in which the rate of charge is 7kW [27]. The results of adding three charging stations with a size of 975 kW each and the comparison with other studies are shown in Table 2.

Table 1

Type of EV	EVRating (kW)	No. of EVs	Stations rating
Chang An Yidong	3.75	20	75
Chevrolet Volt	2.2	25	55
Tesla Model X	13	15	195
BMW i3	44	10	440
SAE J1772 Standard	7	30	210
Total power rating of CS (kW)		100	975

Table 2

Algorithms	Charging station location	Size of charging station	Minimum voltage	Losses in kW
Proposed Algorithm	2,19,25	975,975,975	0.89826	295.5
HHO [27]	2,19,25	975,975,975	0.89826	295.5
TLBO[27]	2,19,25	975,975,975	0.89826	295.5
PSO [28]	2,19,25	975,975,975	0.89826	295.5
FPA [29]	2,19,25	975,975,975	0.89826	295.5

Figures 6 and 7 show the impact of the addition of charging stations on voltages and losses. From the results of implementation, it can be seen that the voltages and losses weren't largely affected by the addition of charging stations even with their large size, which makes the proposed method very reliable in selecting the optimal location of charging station that improves the network's performance.

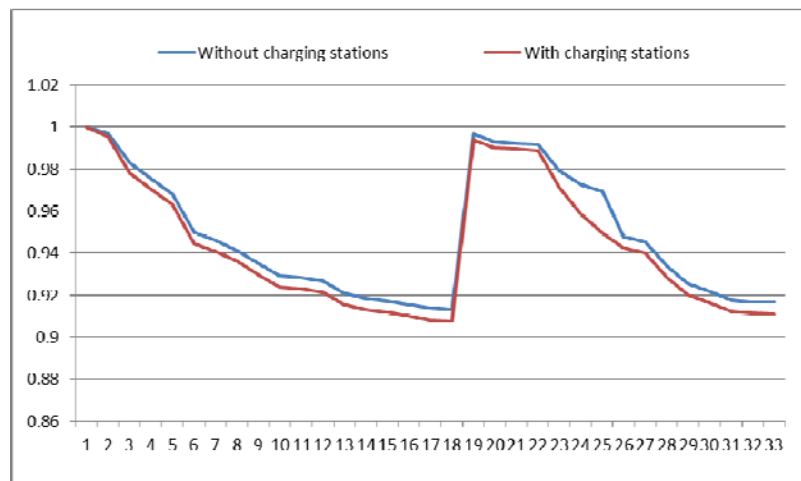


Fig. 6

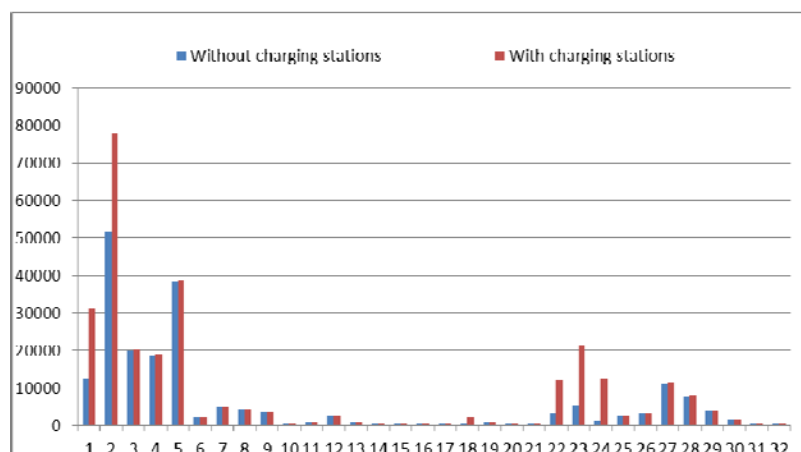


Fig. 7

5.2. Case2: the realistic network of Baghdad/alghazalya

The network of Baghdad/alghazalya is shown in Figure 8. It consists of twenty-five buses and twenty-four branches. The voltage of the system is 11 kV. The total active load of the network is 5.4598 MW and the reactive load is 3.31764 MVAR. The loss of the system is 244.11 kW and the minimum voltage is 0.94485 at bus 14. The electrical parameters of the system are presented in Table 3.

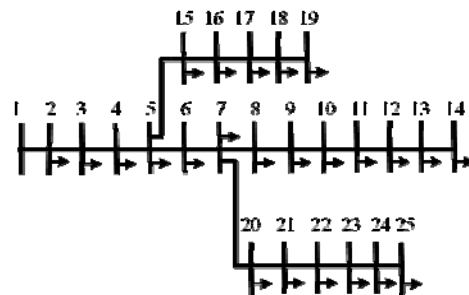


Fig. 8

The proposed decision method was used to select the optimum location for the placement of the charging station in the real case network; Table 4 shows the details of the EVs used in this study.

Table 3

Bus1	Bus 2	Active power kW	Reactive power kVAR	Resistance (ohm/km)	Reactance (ohm/km)
1	2	205	124	0.0492	0.0267
2	3	205	124	0.423	0.221
3	4	340	210	0.07481	0.09131
4	5	205	124	0.04987	0.060879
5	6	205	124	0.19618	0.2174
6	7	205	124	0.0278	0.0317
7	8	205	124	0.0278	0.0143
8	9	205	124	0.0712	0.0869
9	10	205	124	0.0356	0.0434
10	11	340	210	0.0973	0.1188
11	12	205	124	0.0855	0.104
12	13	205	124	0.0374	0.0511
13	14	340	210	0.054	0.049
5	15	205	124	0.0308	0.0376
15	16	205	124	0.0594	0.0724
16	17	205	124	0.1306	0.159
17	18	205	124	0.0183	0.0223
18	19	205	124	0.0235	0.0287
7	20	205	124	0.0214	0.0261
20	21	340	210	0.01544	0.0188
21	22	205	124	0.0475	0.05798
22	23	205	124	0.0736	0.089
23	24	205	124	0.0594	0.0724
24	25	205	124	0.0178	0.0217

Based on the total load of EVs of 1620 kW it is decided to add three stations of 502 kW each to cover the residential city of alghazalya and take into consideration the number of stations working together in the work and the distance between the stations. Table 5 show the placement of charging stations under fully load condition . Figures 9 and 10 show the impact of the addition on losses and voltages of the real case system.

From the results, it can be seen that the voltages and losses weren't affected by adding the charging station even with their large size, which makes the proposed method very reliable in selecting the optimal location of charging station that improves the network's performance and designing microgrids. Table 6 discuss the operation of these stations under three cases where in case A all the stations are working, B station one and two are working and C only station one is working under different EVs levels. The results of Table 6 show a different penetration levels of EVs in wich each station has a total number of charging ports of 53 that equals number of EVs in the CS at full capacity under different working cases with considering the distance constaraint between the stations to cover the real network of Iraq/Baghdad/al-ghazalya correctly. As it can be seen the minimum voltage hase slightly affected by the addition and the losses didn't rise high compared to the base case even under under the full load of EVs of 1502 kW and that makes the method reliable to select the best locations of CS with reducing the impact coming from the addition under different cases.

can be seen the minimum voltage hase slightly affected by the addition and the losses didn't rise high compared

Table 4

Type of EV	EVRating (kW)	No. of EVs	Stations rating
Chang An Yidong	3.75	30	112.5
Chevrolet Volt	2.2	38	83.6
Tesla Model X	13	25	325
BMW i3	44	16	704
SAE J1772 Standard	7	40	280
Total power rating of CS (kW)		160	1506

6. Conclusion

A newly proposed method for the placement of charging stations has been introduced and used in this paper. The IEEE 33 bus system and a real study case of Iraq/Baghdad/alghazalya have been used for the test of the method and the work. The impact on voltages and losses has been analyzed. The fixed

Table 5

Algorithms	Location	Size of CS kW	Losses in kW
Proposed algorithm	2,15,25	502,502,502	323.3

point method was used for power flow analysis, and the proposed method was used for the placement of charging stations. The results showed the efficiency of the proposed method in selecting the optimal place for the charging stations in terms of losses reduction, voltage reduction, and operating time under different conditions of stations working and EVs level, where the voltages and losses weren't affected that much when compared with the base system, and the operating time is several seconds. This work can be developed by integrating distributed generators into the system and managing the network with the connected charging stations to provide storage for intermittent sources such as (PV and wind).

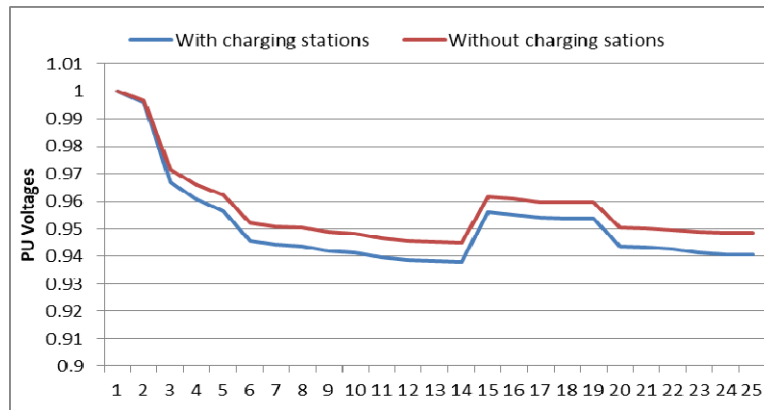


Fig. 9

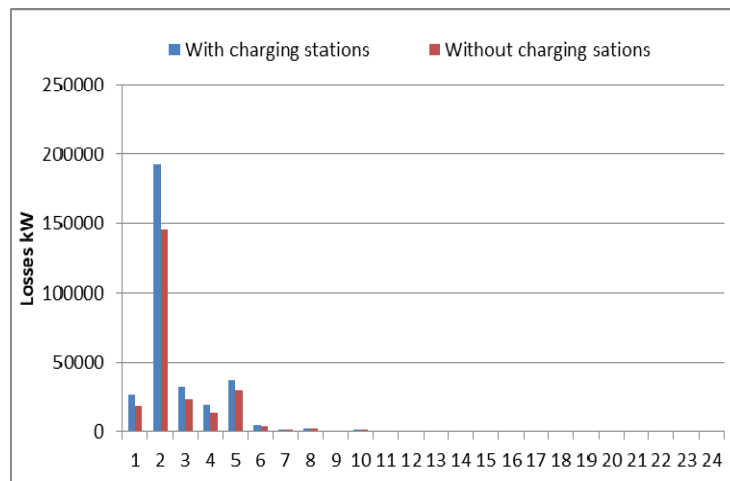


Fig. 10

Table 6

EVs level	Case	Location of CS	Size of CS	Losses	Minimum voltage&bus
100%	A	2,15,25	502,502,502	323.35	0.93804(14)
	B	2,15	502,502	278	0.94191(14)
	C	2	502	246.6	0.94466(14)
80%	A	2,15,25	401.6,401.6,401.6	306	0.93942(14)
	B	2,15	401.6,401.6	271.04	0.94251(14)
	C	2	401.6	246.1	0.9447(14)
60%	A	2,15,25	301.2,301.2,301.2	289.66	0.94079(14)
	B	2,15	301.2,301.2	264.07	0.9431(14)
	C	2	301.2	245.6	0.94475(14)
40%	A	2,15,25	200.8,200.8,200.8	273.82	0.94216(14)
	B	2,15	200.8,200.8	257.26	0.9437(14)
	C	2	200.8	245.1	0.94479(14)

1. Trofimenko Y.V., Komkov V.I., Donchenko V.V., Potapchenko T.D. Model for the assessment greenhouse

- gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2019. Vol. 7(1). Pp. 465-473. DOI: <https://doi.org/10.21533/pen.v7i1.390>
2. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.03.052>. (Ukr)
 3. Parker N., Breetz H.L., Salon D., Conway M.W., Williams J., Patterson M. Who saves money buying electric vehicles? Heterogeneity in total cost of ownership. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 96. P. 102893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102893>.
 4. Sabzi S., Vajta L., Faghihi T. A Review on Electric Vehicles Charging Strategies Concerning Actors Interests. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol. 66(2). Pp. 148-162. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPee.19625>.
 5. Zeb M.Z., Imran K.; Khattak A., Janjua A.K., Pal A., Nadeem M., Zhang J., Khan S. Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in the Active Distribution Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 68124-68134. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984127>.
 6. Avdakovic S., Bosovic A. Impact of charging a large number of electric vehicles on the power system voltage stability. *Electrotechnical Review*. 2014. Vol. 81. Pp. 137-142.
 7. Akhavan-Rezai E., Shaaban M.F., El-Saadany E.F., Zidan A. Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: Normal and fast charging comparison. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, CA, USA, 22-26 July 2012. 13170647. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345583>
 8. Alhazmi Y., Mostafa H., Salama M.M.A. Optimal allocation for electric vehicle charging stations using Trip Success Ratio. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017. Vol. 91. Pp. 101-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.009>.
 9. Golla N., Sudabattula S., Suresh V. Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Station in Distribution System Using Meta-Heuristic Techniques. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. Vol. 9. Pp. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.090108>.
 10. Liu Z., Wen F., Ledwich G. Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*. 2012. Vol. 28(1). Pp. 102-110. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2223489>
 11. Islam M.M., Shareef H., Mohamed A. Optimal location and sizing of fast charging stations for electric vehicles by incorporating traffic and power networks. *IET Intelligent Transport Systems*. 2018. No 12. Pp. 947-957. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5136>
 12. Chaudhary R., Karki M., Khan S. Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations by Genetic Algorithm in Pokhara's Radial Distribution Network. *Proceedings of 9th IOE Graduate Conference*. 2021. Vol. 9. Pp. 94-101.
 13. Lam A.Y.S., Leung Y.W., Chu X. Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014. Vol. 5(6). Pp. 2846-2856. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2344684>.
 14. Ponnamp V., Swarnasri K. Multi-Objective Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations in Radial Distribution System Using Teaching Learning Based Optimization. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2020. No 10. Pp. 366-377.
 15. Alquthami T., Alsubaie A., Alqahtani M., Alqahtani K., Alshahrani S., Anwar M. Investigating the Impact of Electric Vehicles Demand on the Distribution Network. *Energies*, 2022. Vol. 15(3). 1180. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031180>.
 16. Mehta R., Verma P., Srinivasan D., Yang J. Double-layered intelligent energy management for optimal integration of plug-in electric vehicles into distribution systems. *Applied Energy*. 2019. Vol. 233-234. Pp. 146-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.008>.
 17. Fredriksson H., Dahl M., Holmgren J. Optimal placement of Charging Stations for Electric Vehicles in large-scale Transportation Networks. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 160. Pp. 77-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.446>.
 18. Islam M.M., Mohamed A., Shareef H. Optimal allocation of rapid charging stations for electric vehicles. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*. Kuala Lumpur, Malaysia, December 13-14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCORED.2015.7449360>.
 19. Hashemian S.N., Latify M.A., Yousefi G.R. PEV Fast-Charging Station Sizing and Placement in Coupled Transportation-Distribution Networks Considering Power Line Conditioning Capability. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11(6). Pp. 4773-4783. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3000113>.
 20. Hassan A.S., Firrincieli A., Marmaras C., Cipcigan L.M., Pastorelli M.A. Integration of electric vehicles in a microgrid with distributed generation. *49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Cluj-Napoca, Romania, September 2-5, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2014.6934641>.
 21. Dugan R.C., McDermott T.E. An open source platform for collaborating on smart grid research. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit, MI, USA Detroit. July 24-28, 2011. DOI:

<https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039829>.

22. Nasser R., Ali M.I.I., Alkhafaji M.H. Optimal Placement and Size of Distributed Generators Based on Autoadd and PSO to Improve Voltage Profile and Minimize Power Losses. *Engineering and Technology Journal*. 2021. Vol. 39(3A). Pp. 453-464. DOI: <https://doi.org/10.30684/etj.v39i3A.1781>.

23. Vita V. Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks. *Energies*. 2017. Vol. 10(9). P. 1433. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10091433>.

24. Rao R., Narasimham S., Ramalingaraju M. Optimization of Distribution Network Configuration for Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2008. Vol. 2. No 9. Pp. 1964-197.

25. Soliman M.E., Abdelaziz A.Y., El-Hassani R.M. Distribution power system reconfiguration using whale optimization algorithm. *International Journal of Applied Power Engineering*. 2020. No 9. Pp. 48-57. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijape.v9.i1.pp48-57>

26. Abdelaziz A.Y., Osama R.A., Elkhodary S.M. Distribution Systems Reconfiguration Using Ant Colony Optimization and Harmony Search Algorithms. *Electric Power Components and Systems*. 2013. Vol. 41(5). Pp. 537-554. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325008.2012.755232>.

27. Ponnamp V.K.B., Swarnasri K. Multi-Objective Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations and Distributed Generators in Radial Distribution Systems using Metaheuristic Optimization Algorithms. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2020. Vol. 10(3). Pp. 5837-5844. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.3517>.

МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Ахмед Джасім Ахмед¹, Мохаммед Х. Альхафаджі¹, Алі Джафер Махді²

¹ Технологічний університет,

Багдад, Ірак

E-mail: ahmedjasem858@gmail.com .

² Університет Кербали,

Кербала, Ірак

Електричні транспортні засоби сьогодні стають помітними та відіграють важливу роль у транспортному секторі, оскільки звичайні транспортні засоби впливають на навколишнє середовище. Зростаюча кількість транспортних засобів вимагає збільшення зарядних станцій, що впливає на розподільчу мережу, якщо вони розташовані випадково. Тому вибір оптимального місця для цих зарядних станцій є дуже важливим для пом'якшення впливу на систему розподілу. У роботі представлено метод прийняття рішень для оптимального вибору розташування зарядної станції в радіальній системі розподілу. Для аналізу потоку навантаження використовувався алгоритм фіксованої точки. Аналіз проводився та перевірявся на 33 шині IEEE, а для дослідження використовувався реальний приклад в Іраку. Аналіз показав ефективність запропонованого методу щодо зменшення впливу зарядних станцій на напруги та втрати за різних умов.

Бібл. 27, рис. 10, табл. 6.

Ключові слова: оптимальне розміщення, вантажопотік, зарядні станції, зменшення втрат, електромобілі.

Надійшла 12.09.2022

Остаточний варіант 18.10.2022

**ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ
ДЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ПЛАСТИН ЗІ СТАЛІ МАРКИ 25ХГНМТ**

І.В. Божко^{1*}, канд.техн.наук, **І.П. Кондратенко**^{1**}, чл.-кор. НАН України
Л.М. Лобанов^{2***}, академік НАН України, **М.О. Пашин**^{2****}, докт.техн.наук,
О.М. Берднікова^{2*****}, докт.техн.наук, **О.Л. Миходуй**^{2*****}, канд.техн.наук,
О.С. Кушнарєва^{2*****}, канд.техн.наук, **П.В. Гончаров**^{2*****}, канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: dep7ied@ukr.net

² Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03680, Україна, e-mail: svarka2000@ukr.net

Застосування в металообробці імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, є новим підходом до оптимізації механічних властивостей металевих матеріалів, який базується на електрофізичних процесах. В роботі вивчалось зміцнення конструктивної сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню ІБР. Обробка сталі ІБР проходила в розрядному пристрої за швидкості наростання напруги $\approx 3 \cdot 10^{11}$ В/с. Досліджено вплив тривалості обробки ІБР на значення твердості по Віккерсу (HV) дослідних зразків. Дослідження структури сталі 25ХГНМТ проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії з метою встановлення її змін внаслідок дії ІБР. Встановлено, що значення HV після обробки ІБР зростають з 420 до 500 кг/мм², що супроводжується диспергуванням мікроструктури, яке позитивно впливає на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ. Бібл. 14, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, обробка поверхні, конструкційна сталь, твердість по Віккерсу, мікроструктура, електронна мікроскопія, механічні характеристики, низькотемпературна плазма.

Вступ. Актуальність дослідження. Мета роботи. Розвиток високотехнологічних галузей промисловості стимулює зростання вимог до металевих конструкцій, комплексу їхніх основних та спеціальних властивостей. Новим трендом сучасного виробництва, що направлений на підвищення ресурсу виробів машинобудування, є розробка технологій металообробки із застосуванням електрофізичних дій. Використання імпульсних електричних розрядів, струмів плазми, імпульсних електромагнітних полів, їхніх комбінованих впливів задля підвищення механічних характеристик металів і сплавів є актуальним у зв'язку з необхідністю заміни традиційних енергоємних технологій конструкційних матеріалів на більш прогресивні. Результати досліджень електрофізичних процесів, що протікають в металевих матеріалах під час дії імпульсного електричного струму та електромагнітного поля, дають підставу вважати їх перспективними для інженерної практики з позицій енергоефективності та технологічності [1–8].

Застосування в металообробці імпульсного бар'єрного розряду (ІБР), який генерує низькотемпературну плазму на поверхні металу, що обробляється, і відрізняється від інших відомих електричних розрядів високим ступенем однорідності, є новим підходом в інженерії поверхні до оптимізації механічних властивостей металевих матеріалів, який базується на електрофізичних процесах. Критерієм доцільності практичного використання технологій зміцнення металів і сплавів із застосуванням ІБР є їхня енергоефективність Y , що визначається значно меншими витратами енергії у порівнянні із термічною обробкою. Величину енергоефективності Y будемо визначати як відношення витраченої кількості електроенергії до площі обробленої поверхні металевої пластини. Попередньо величина енергоефективності буде визначатися комплексом чинників, які характеризують імпульсний

© Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М., Пашин М.О., Берднікова О.М., Миходуй О.Л., Кушнарєва О.С., Гончаров П.В., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-7955-246X> ; ** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383> ;

*** <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335> ; **** <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137> ;

***** <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478> ; ***** <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540> ;

***** <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795> ; ***** <https://orcid.org/0000-0002-1980-2340>

бар'єрний розряд, а саме: напруга на розрядному проміжку, швидкість її зростання, частота повторення імпульсів, тощо [9].

Особливо актуальним є застосування електрофізичних методів обробки виробів спеціального призначення, які працюють у жорстких умовах динамічних навантажень за високих температур та в умовах оперативного обслуговування. Особливі вимоги приділяються твердості конструкційних сталей, що є однією з оцінних характеристик їхніх властивостей у разі динамічних контактних взаємодій зі швидкостями до 1000 м/с. Прикладом такого матеріалу є сталь типу 25ХГНМТ, яка використовується у відповідальних конструкціях спеціального призначення. Традиційний метод підвищення твердості такої сталі полягає у проведенні закалювання, яке здійснюється за температури $T=860^{\circ}\text{C}$ в маслі із наступним відпуском за $T=190^{\circ}\text{C}$ в повітрі [10]. Це є досить енерговитратною технологією, що потребує габаритного металовмісного обладнання. Застосування ІБР для обробки поверхні сталі 25ХГНМТ з метою покращення її механічних характеристик відкриває нові перспективи застосування електрофізичних процесів у металообробці. Враховуючи наведене, слід вважати доцільним дослідження впливу ІБР на механічні характеристики сталі 25ХГНМТ.

Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування ІБР в технологіях обробки поверхні сталі 25ХГНМТ задля покращення її механічних характеристик і ресурсу в конструкціях, які працюють у спеціальних умовах.

Дослідні зразки, обладнання для обробки ІБР та методика досліджень. Як предмет досліджень використовували пласкі зразки розмірами 40x40x4 мм, які підлягали обробці ІБР. Проводили хімічний аналіз зразків згідно стандарту ДСТУ ISO 10012:2005, що підтвердив відповідність матеріалу, що підлягав обробці, хімічному складу сталі 25ХГНМТ згідно ДСТУ 7806:2015. Результати аналізу хімічного складу дослідних зразків сталі 25ХГНМТ наведено у таблиці.

Метал	Масова доля у відсотках												
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	Ti	W
Сталь 25ХГНМТ	0,27	0,24	0,84	0,004	0,018	0,50	0,95	0,23	0,40	0,03	0,04	0,007	≤0,02

Електродна система для дослідження впливу дії ІБР на поверхню сталі 25ХГНМТ та характеристики розряду. Обробка ІБР поверхні зразків проводилася із застосуванням електродної системи (ЕС), конструктивну схему якої показано на рис. 1.

ЕС складалася із дослідного зразка 1 сталі 25ХГНМТ, високовольтного електроду 2 та скляного (кварцове скло) діелектричного бар'єру 3 (100x100x1мм³). Для зменшення крайового ефекту електрод 2 мав заокруглені краї. Діаметр пласкої частини цього електроду становив 36 мм. Обробка проводилася за повітряного проміжку $\delta=1\text{мм}$ між пластиною 1 та бар'єром 3. Виходячи з розмірів електроду можна судити про величину площі поверхні, що обробляється. Вона становить близько 10^{-3} м^2 . Висока напруга (ВН) на електрод 2 подавалася від генератора імпульсів (ГІ), який забезпечував уніполярні імпульси напруги амплітудою до 30 кВ за швидкості їхнього зростання $\approx 3 \cdot 10^{11}\text{ В/с}$ та тривалості близько 150 нс. До складу ГІ також входив магнітний ключ, який сприяв розряджанню діелектричного бар'єру після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Амплітуда імпульсів встановлювалася на одному фіксованому рівні для всіх режимів обробки поверхні. Осцилограми напруги та струму через електродну систему записувалися за допомогою осцилографа TDS1012 та відповідно датчиків Р6015 і Р6021. Всі дослідження виконано за частоти повторення імпульсів 300 Гц. Зовнішній вигляд розряду, який наведено на рис. 2 (час експозиції 0,1 с), свідчить про однорідний характер розряду в проміжку δ , а не ниткоподібний.

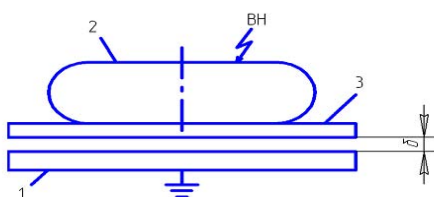


Рис. 1

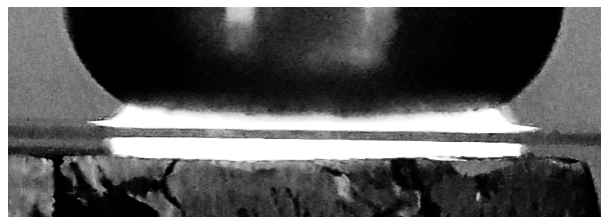


Рис. 2

Типовий вигляд осцилограм струму $i(t)$ та напруги $u(t)$ режиму ІБР, на якому обробляли зразки, показано на рис. 3 відповідно кривими 1 та 2. Як видно з рисунку, під час дії імпульсу напруги, амплітуда U_m якого досягає 26 кВ, струм ІБР складається з двох основних частин: прямого струму з амплітудою $I_{m1}=80$ А та зворотного з амплітудою $I_{m2}=65$ А, котрий обумовлений розрядженням діелектричного бар'єру через магнітний ключ. Розрахунки показують, що під час прямого імпульсу струму амплітудне значення середньої густини струму через пластину становить близько $0,9$ А/см². За таких параметрів енергія, що виділяється під час дії одного імпульсу, становить близько 35 мДж [11], а потужність за частоти повторення імпульсів 300 Гц – 10 Вт.

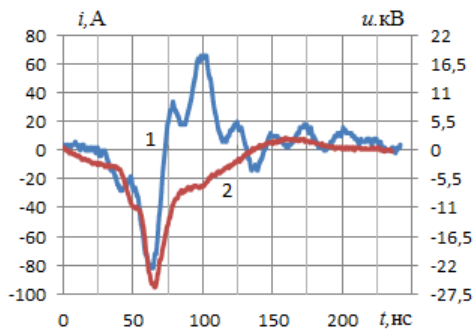


Рис. 3

Досліджено вплив періоду часу обробки на значення твердості сталі. Зразки піддавалися ІБР в режимі, який відповідає рис. 3 за варіації часу відповідно 5, 10, 15 та 20 хвилин. Таким чином, за час обробки (без урахування коефіцієнта корисної дії імпульсного перетворювача) на обробку поверхонь витрачалося відповідно 3, 6, 9, 12 кДж. Зауважимо, що термообробка зразка товщиною 4 мм і діаметром 35 мм за традиційною технологією (без урахування коефіцієнта корисної дії нагрівальної установки) потребує вкладання 13,7 кДж. Приводячи до площ оброблених поверхонь, маємо $9,36$ кДж/м² при витраті енергії на ІБР 9 кДж та $14,2$ кДж/м², що на третину менше.

Із металу зразків готували макрошліфи згідно стандартної методики, на яких проводили дослідження структури та вимірювання мікротвердості оброблених поверхонь по Віккерсу (HV) згідно стандарту ISO 6507-1:2005. Оцінку значень HV виконували із застосуванням мікротвердоміру М-400 фірми LECO за навантаження зразків $P=100$ г.

Дослідження структури на просвіт проводили методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на приладі JEM-200CX (фірми JEOL) за прискорювальної напруги 200 кВ з метою встановлення зміни структури сталі 25ХГНМТ внаслідок дії на її поверхню ІБР. Дослідження методом ТЕМ дали змогу отримати достовірну експериментальну інформацію на дислокаційному рівні про структурні складові та розподіл щільності дислокацій у сталі до та після обробки, які мають вплив на її міцність та тріщиностійкість.

Результати досліджень. Встановлено, що максимальний вплив ІБР на твердість сталі 25ХГНМТ за визначених вище параметрах імпульсів напруги досягається за тривалості обробки зразків у 15 хвилин. При цьому значення HV після обробки зростають на 20% – з 420 до 505 кг/мм² (рис. 4). Підвищення твердості HV розповсюджується на половину товщини зразка – на глибину до 2 мм. Це суттєво підвищує динамічну міцність сталі за контактних взаємодіях на швидкостях до 1000 м/с.

В результаті проведених досліджень встановлено, що первинна (до обробки) структура сталі 25ХГНМТ є мартенситно-бейнітною з об'ємною часткою відпущеного мартенситу ($M_{відп}$) до 60% за рівномірного об'ємного розподілу щільності дислокацій $\rho=(1...6)\times 10^{10}$ см⁻². Під час деталізації структури металу до обробки встановлено, що ширина рейкової структури $M_{відп}$ становить 0,3...2,0 мкм (рис. 5, а). На рис. 5 показано тонку структуру відпущеного мартенситу металу (а) та у металі обробленої поверхні (б) сталі 25ХГНМТ ($\times 22000$). Стрілками позначено ширину рейкової структури.

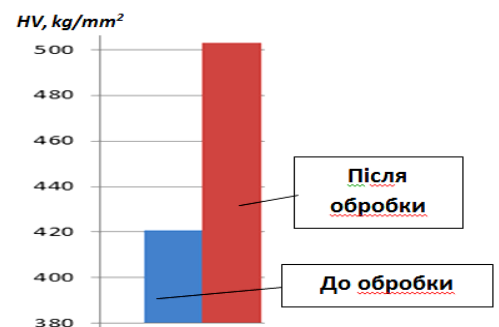


Рис. 4

На віддаленні від обробленої ІБР поверхні на глибину до 2,2 мм (тобто на половину товщини металу) у поперечному перерізі зразка виявлено зміну структури та щільності дислокацій. Це корелює з даними по збільшенню значень твердості HV після обробки ІБР. У порівнянні з металом до обробки має місце як помітне подрібнення структури $M_{відп}$, так і загальне підвищення щільності дислокацій в середньому у 1,5 рази до $\rho=(2...8)\times 10^{10}$ см⁻² у разі рівномірного її розподілу. Ширина рейкових структур $M_{відп}$ після обробки також зменшується в середньому у 1,6 разів і становить 0,2...1,3 мкм (рис. 5, б).

Виходячи з наведених вище даних, у зразку сталі 25ХГНМТ, поверхню якого було оброблено ІБР впродовж 15 хвилин, спостерігали загальне зміцнення металу, обумовлене підвищенням щільно-

сті дислокацій та диспергуванням структури у порівнянні з металом без обробки. В результаті обробки ІБР під дією імпульсного струму в нерівноважних умовах можна отримати метастабільний стан у поверхневих шарах металу. Дія прямого імпульсу струму ініціює періодичні коливання атомів, наслідком яких є перерозподіл дефектів кристалічної решітки. Результатом цього є деформаційне зміцнення металу та подрібнення рейкової структури мартенситу. Це сприятиме зміцненню сталі 25ХГНМТ та підвищенню її тріщиностійкості [12 – 14].

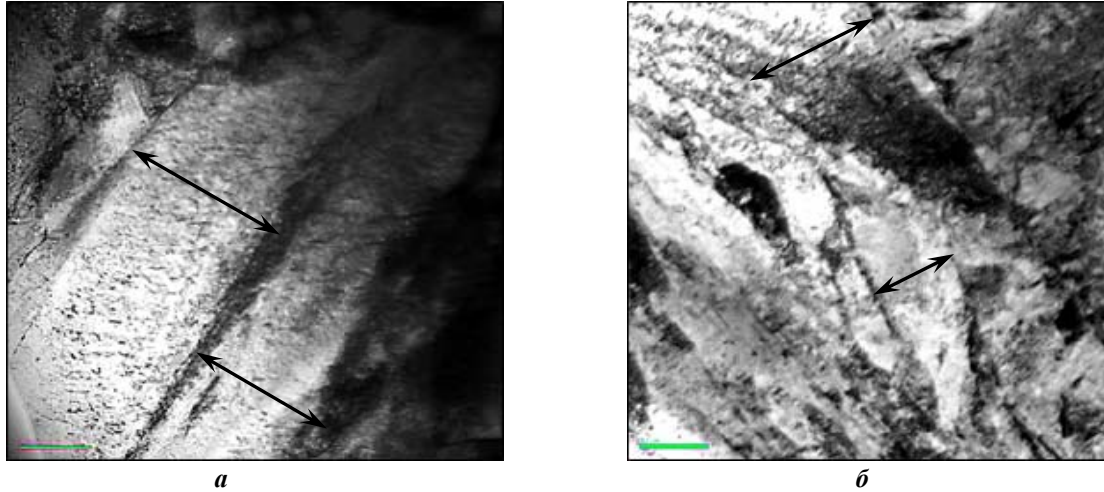


Рис. 5.

У разі обробки впродовж 5 і 10 хвилин коливання забезпечують пружну деформацію ковзання, яка не викликає помітної зміни механічних властивостей сталі після завершення циклу обробки у порівнянні із необробленою. У разі збільшення часу обробки до 20 хвилин метал піддається відпуску за рахунок зростання термічної складової дії ІБР, що викликає зниження значень HV до 250-370 кг/мм^2 у порівнянні з металом, який є необробленим.

Аналізуючи наведені вище результати, слід зазначити, що локальна обробка ІБР сталі 25ХГНМТ в перспективі може стати базою для розробки низки технологій інженерії поверхні, що будуть направлені на подовження ресурсу металевих матеріалів для конструкцій, які працюють у спеціальних умовах.

Висновки.

1. Застосування імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) для обробки поверхні сталі 25ХГНМТ з метою покращення її механічних характеристик може стати базою для розробки низки технологій інженерії поверхні, що будуть направлені на подовження ресурсу металевих матеріалів для конструкцій, які працюють у спеціальних умовах. При цьому витрати електричної енергії за технологією, що пропонується, у порівнянні з термообробкою виробів виявляється на третину меншою – 9,36 кДж/м^2 у разі застосуванні ІБР та 14,2 кДж/м^2 – за термообробки пластини однакової товщини.

2. Встановлено, що в результаті 15 хвилинної обробки ІБР сталі 25ХГНМТ відбувається підвищення її твердості по Віккерсу (HV) на 20% – з 420 до 505 кг/мм^2 , яке розповсюджується на половину товщини зразка – на глибину до 2 мм. Зміцнення зразків сталі обумовлено подрібненням мартенситної структури і підвищенням щільності дислокацій відповідно у 1,5 та 1,4 рази у порівнянні з металом у вихідному стані.

3. Запропоновано механізм зміцнення сталі в результаті обробки ІБР, який базується на отриманні в нерівноважних умовах метастабільного стану у поверхневих шарах металу. Дія прямого імпульсу струму ініціює періодичні коливання атомів, наслідком яких є перерозподіл дефектів кристалічної решітки. Результатом цього є деформаційне зміцнення металу та подрібнення рейкової структури мартенситу.

1. Dubodielov V.I., Horiuk M.S. The use of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena to intensify the impact on metal systems: world and Ukrainian experience. Pp. 24-50. In the book: Materials science: achievements and prospects. In two volumes. Vol. 2. Kyiv: Akadempriodyka. 2018. 395 p. (Ukr.)

2. Sydorenko Y.M., Pashchin M.O., Mykhodui O.L., Khokhlova Y.A., Khokhlov M.A. Effect of Pulse Current on Residual Stresses in AMg6 Aluminum Alloy in Electrodynamics Treatment. *Strength of Materials*. 2020. Vol. 52(5). Pp. 731–737. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00226-2>.

3. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mikhodui O.L., Goncharov P.V., Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R. Modeling of stress-strain states of AMg6 alloy due to impact action of electrode-indenter in electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.* 2021. No 6. Pp. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.06.01>
4. Zhang Jun; Liu Ji-De; Zhang Xin-Fang; Cui Chuan-Yong; Li Jin-Guo; Zhou Yi-Zhou; Wang, Bao-Quan; Guo Jing-Dong. Effect of High Density Current Pulses on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Wrought Superalloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2021. Vol. 34. Issue 12. Pp. 1635 – 1644. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01211-7>.
5. Qin Shuyang; Zhang Xinfang. Ultrafast regulation of nano-scale matrix defects using electrical property discrepancies to delay material embrittlement. *Journal of Materials Science and Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 25 – 36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.070>.
6. Zhang Xinfang; Qin Rongshan. Exploring the Particle Reconfiguration in the Metallic Materials under the Pulsed Electric Current. *Steel Research International Open Access*. 2018. Vol. 89. Issue 12. Article number 1800062. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201800062>
7. Diao Aimin; Wang Jingpen; Yang Yuqiu; Liu Jide; Guo Jingdong. Fatigue Damage Recovery of 20 Carbon Steel under Pulsed Current. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2022. Vol. 42. Issue 3. Pp. 318 - 322. DOI: <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.2022.03.009>.
8. Guo J.D., Wang X.L., Dai W.B. Microstructure evolution in metals induced by high density electric current pulses. *Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 31(13a). Pp. 1545-1554. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000001>
9. Fangmin Huang, Li Chen, Honglin Wang, Zongcheng Yan. Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 162. Pp. 250–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.05.041>
10. URL: <https://s-metall.com.ua> (accessed at 25.07.2022).
11. Bozhko S.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transaction on Plasma Science*. 2017. Vol. 85. No 10. Pp. 3064-3069. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2760888>
12. Kostin V.A., Poznyakov V.D., Berdnikova O.M., Zhukov V.V., Alekseyenko T. O., Alekseyenko I. I. Influence of Structural Transformations on the Mechanical Properties of Welded Joints of Armor Steels. *Materials Science*. 2021. 56(4). 472-480. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00453-1> /
13. Berdnikova O.M., Kostin V.A., Poznyakov V.D., Gaivoronskii O.A., Alekseenko T.O., Alekseenko I.I. Structure and crack resistance of special steels with 0.25...0.31 % carbon under the conditions of simulation of thermal cycles of welding. *Automatic Welding*. 2020. No 5. Pp. 3-9. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.01>.
14. Bernstein M.L., Zaymovskiy V.A. Mechanical properties of metals. Moskva: Metallurgiya, 1979. 496 p. (Rus)

PULSED BARRIER DISCHARGE FOR TREATMENT OF SURFACES OF 25XGHMT STEEL PLATES

I.V. Bozhko¹, I.P. Kondratenko¹, L.M. Lobanov², M.O. Pashchin², O.M. Berdnikova², O.L. Mykhodui², O.S. Kushnarova², P.V. Goncharov²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, av. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: dep7ied@ukr.net.

² E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine, st. Kazimir Malevich, 11, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: svarka2000@ukr.net.

The development of high-tech industries stimulates the growth of requirements to metal structures and a complex of their main and special properties. The use of pulsed electrical discharges, plasma currents, pulsed electromagnetic fields, and their combined effects to improve the mechanical characteristics of metals and alloys is relevant in connection with the need in replacing traditional energy-intensive technologies of structural materials with more advanced ones. The use of pulsed barrier discharge (PBD) in metal treatment, which generates a low-temperature plasma on the surface of the metal being treated, is a new approach to optimize the mechanical properties of metal materials, which is based on electrophysical processes. In the work, strengthening of structural 25KhGNMT steel as a result of the action of PBD on its surface was studied. The treatment of steel by PBD took place in a discharge device at a voltage increment rate of $\approx 3 \cdot 10^{11}$ V/s. The influence of the duration of PBD treatment on the value of Vickers hardness (HV) of the test samples was studied. The study of the structure of 25KhGNMT steel was carried out by the method of transmission electron microscopy in order to determine its changes as a result of the action of PBD. It was established that HV values after PBD treatment increase from 420 to 500 kg/mm², which is accompanied by microstructure dispersion, which positively affects the mechanical characteristics of 25KhGNMT steel. References 14, figure 5, table 1.

Key words: pulsed barrier discharge, surface treatment, structural steel, Vickers hardness, microstructure, electron microscopy, mechanical characteristics, low-temperature plasma.

Надійшла 18.08.2022
Остаточний варіант 15.09.2022

УДК 621.316.729:621.396.6

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.081>

**ПРИСТРІЙ БАГАТОКАНАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ СИНХРОСИГНАЛІВ
SMART GRID ЕНЕРГОСИСТЕМ З ОПТИМАЛЬНИМ ЗА ШВИДКОДІЄЮ
ФАЗОВИМ АВТОПІДСТРОЮВАННЯМ ЧАСТОТИ**

О.В. Самков^{1*}, докт.техн.наук, **В.В. Коваль**^{2**}, докт.техн.наук,
В.П. Лисенко^{2***}, докт.техн.наук, **Д.О. Кальян**^{2****}, канд.техн.наук,
О.Б. Рибіна¹, канд.техн.наук, **О.Л. Осінський**^{1*****}

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

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

E-mail: y.koval@nubip.edu.ua

У роботі запропоновано багатоканальний пристрій моніторингу з оптимальною за швидкодією системою фазового автопідстроювання частоти, який за рахунок виконання одночасних вимірів декількох синхросигналів відносно опорного, обробки і передавання результатів вимірів IP-мережею у реальному часі підвищує надійність та достовірність формування сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем. Встановлено аналітичні залежності для визначення умов, за яких в оптимальній за швидкодією системі автопідстроювання частоти відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики фазового дискримінатора. Експериментальні дослідження підтвердили виконання норм європейського стандарту ETS 300 462-4 на часові параметри опорного сигналу, який формується оптимальною за швидкодією системою фазового автопідстроювання, а також продемонстрували ефективність запропонованої реалізації пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: SMART Grid енергосистема, моніторинг синхросигналів, автопідстроювання частоти.

Вступ. В сучасних умовах енергозабезпеченість та енергоефективність є одними із головних технічних показників, що характеризують конкурентоспроможність продукції, інноваційний розвиток економіки, безпеку держави. Глобальні реалії, потреба адаптувати українську економіку ринковим цінам на енергоносії призвели до необхідності вирішення проблем раціонального використання електричної енергії [1]. Окрім цього в електроенергетичній галузі не менш актуальними є проблеми підвищення енергоефективності інтелектуальних електричних мереж [2]. Спільне вирішення зазначених проблем за рахунок впровадження інтелектуальних засобів керування з використанням синхронізованих векторних вимірювань та застосуванням мультиагентних комплексів управління передбачає отримання синергетичного, тобто позитивного ефекту, який, згідно визначення Г. Хакенена, базується на узгодженості взаємодії елементів через утворення структури як єдиного цілого [3].

Енергоефективне функціонування інтегрованих електроенергетичних мереж потребує вирішення задач узгодженості взаємодії елементів, включно і часової [2, 4, 5]. Дані задачі безпосередньо пов'язані з якістю функціонування систем автоматизованого керування, які побудовано на базі SMART Grid технологій [2, 4-7]. Сучасні цифрові системи автоматизованого керування виконують свої функції з прив'язкою до часу за рахунок використання синхросигналів. У

© Самков О.В., Коваль В.В., Лисенко В.П., Кальян Д.О., Рибіна О.Б., Осінський О.Л., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-2790-8564>; ** <https://orcid.org/0000-0003-0911-2538>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-5659-6806>; **** <https://orcid.org/0000-0003-2016-2253>;
***** <https://orcid.org/0000-0002-9921-699X>

такому разі від характеристик синхросигналів залежить часова узгодженість взаємодій в системах автоматики та їхніх складових, і, як наслідок, якість роботи SMART Grid енергосистем [2, 4-9].

В міжнародних стандартах IEEE C37.118.1-2011, IEEE C37.118.2-2011 визначена точність ± 1 мікросекунда для синхросигналів, які використовуються для проведення синхронізованих векторних вимірювань в електроенергетичних SMART Grid мережах з використанням синхрофазорів. Очевидно, що у разі виникнення часової неузгодженості будуть погіршені технічні характеристики як систем керування, так і, відповідно, електроенергетичних мереж, що керуються ними. Зазначена залежність впливає на енергозабезпеченість та енергоефективність, що обумовлює необхідність застосування не тільки сучасних пристроїв синхронізації часу, а і високоякісних засобів моніторингу параметрів синхросигналів, які вони формують [4, 5, 9-12]. Одноканальний моніторинг, який базується на часових вимірах вхідного синхросигналу відносно опорного, є не цілком об'єктивним, а тому одержані результати обмежено достовірні [5, 10, 11]. Крім цього, моніторинг тільки одного вхідного синхросигналу звужує можливість ефективного підвищення надійності частотно-часового забезпечення шляхом використання як резервних додаткових джерел синхросигналів. Натомість впровадження системи багатоканального моніторингу пристроїв синхронізації часу забезпечує можливість формування синхросигналів із заданою якістю, підвищеною надійністю і достовірністю [5, 11, 12].

Складовою системи моніторингу є пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу, який формує інформацію про результати одночасних вимірів декількох синхросигналів у реальному часі без участі людини, тобто в автоматичному режимі, та передає її, використовуючи засоби мереж телекомунікації [5, 11, 12]. Важливим є те, що процес вимірювань параметрів базується на порівнянні з еталонною одиницею часу, яка формується джерелом опорного сигналу з системою фазового автопідстроювання частоти [5, 11]. Необхідна точність та стабільність джерела опорного сигналу забезпечується за рахунок його синхронізації від провідного генератора зразкових коливань з використанням фазового автопідстроювання частоти. Сучасні дослідження засобів синхронізації [4, 5, 9, 11] направлені на підвищення їхніх якісних показників, в тому числі швидкодії пристроїв автопідстроювання. До прикладу, виконана в дисертаційній роботі [11] оптимізація за швидкістю системи автопідстроювання частоти покращила показники продуктивності контролю багатоменклатурного виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

Метою роботи є розробка пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, оптимізація за швидкістю джерела опорного сигналу на основі системи фазового автопідстроювання частоти, їхнє аналітичне й експериментальне дослідження та апробація на діючих IP-мережах.

1. Система багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем. В дослідженнях закордонних і вітчизняних фахівців проблем часової синхронізації SMART Grid енергосистем використовуються опосередковані способи оцінки характеристик сигналів синхронізації часу та одноканальні пристрої для вимірювань часових (частотних) характеристик сигналів [2, 4, 7, 8, 10]. Результати створення та дослідження пристроїв багатоканального контролю підтвердили ефективність їхнього використання на мережах синхронізації операторів телекомунікацій, в процесах багатоменклатурного виробництва і технічної експлуатації пристроїв синхронізації цифрових сигналів [11, 12]. Пропонується задля підвищення надійності та достовірності формування сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем розроблення пристрою багатоканального моніторингу з оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти. Пристрій, у порівнянні з розробленим дослідним зразком [5], забезпечить обробку і передавання IP-мережею у реальному часі результатів одночасних вимірів декількох синхросигналів відносно опорного сигналу, який формується оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти з урахуванням кількості змін знаку керуючої дії на інтервалі керування згідно теореми А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

Аналіз сформульованих задач, які повинні виконуватися системою багатоканального моніторингу, підтверджує необхідність одночасного виконання вимірів часових параметрів декількох контрольованих сигналів синхронізації часу (ССЧ) SMART Grid енергосистем, а саме відхилення часового інтервалу контрольованих синхросигналів відносно опорного сигналу. Також повинна бути забезпечена перевірка відповідності встановленим технічним показникам цифрових даних вимірів контрольованих ССЧ, які передаються з використанням цифрової телекомунікації до інтелектуальних засобів керування SMART Grid енергосистем (рис. 1). В режимі реального часу оброблені

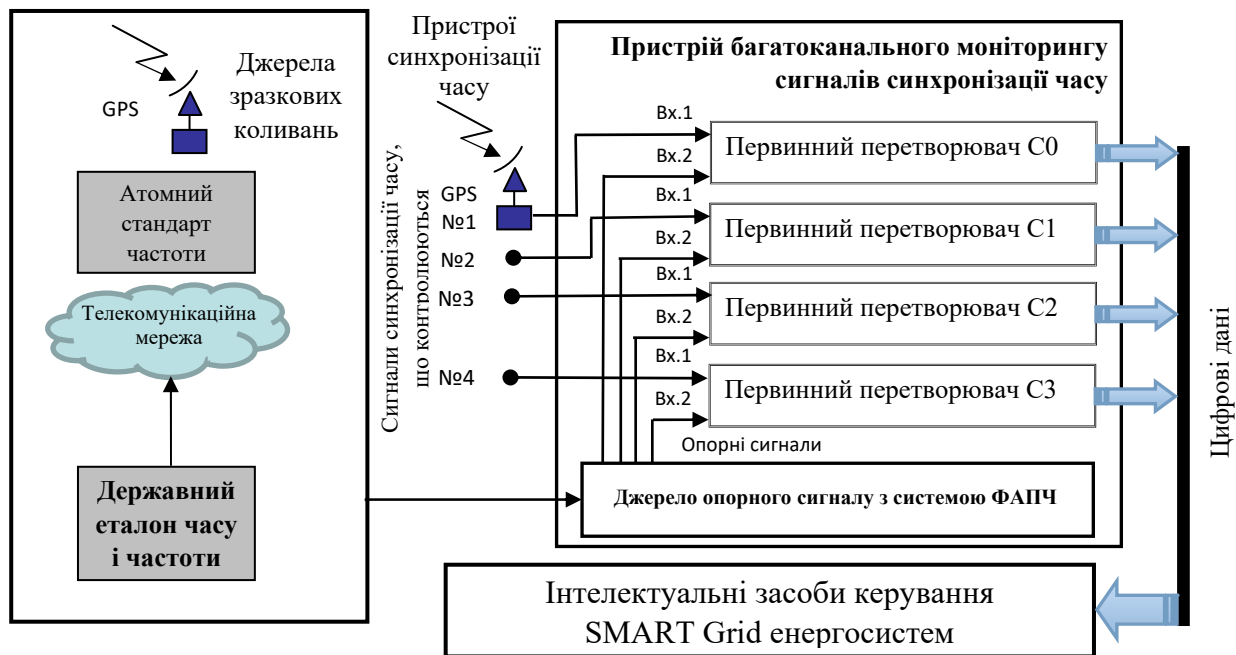


Рис. 1

комп'ютерними засобами цифрові дані вимірів повинні «надходити на екран дисплея у вигляді мнемонічних символів, сигнальної інформації та важливих кількісних показників з обов'язковим забезпеченням можливості інтерактивного режиму роботи оператора, за допомогою якого на основі даних контролю здійснюється прийняття рішення щодо якісних показників сигналів синхронізації часу та можливості їх використання для вирішення задач керування роботою електроенергетичної мережі SMART Grid» [11].

Пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу (ПБМССЧ), як складова системи моніторингу, яку представлено на рис. 1, повинен забезпечити одночасне виконання багатоканальних вимірів сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, первинну обробку та передавання цифрових даних вимірювань з використання IP-технологій. ПБМССЧ є первинним датчиком системи, який «забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу (контрольованого показника якості). Первинний перетворювач перетворює вхідну фізичну величину – різницю фаз (часовий інтервал) – у пропорційний вихідний сигнал, представлений у вигляді цифрової кодової комбінації (цифрових даних)» [5].

З метою експериментальної перевірки і апробації способу багатоканального моніторингу виконано розроблення дослідного зразка ПБМССЧ SMART Grid енергосистем. Дослідний зразок пристрою має у своєму складі вхідні інтерфейси, комутатор, блоки контролю періодичності, первинні перетворювачі, джерело опорного сигналу з системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), мікроконтролер, світлодіодну індикацію, інтерфейси RS-232 та Ethernet.

2. Розроблення джерела опорного сигналу з оптимізованою за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти та адаптивним цифровим фазовим дискримінатором. Аналіз вимог до реалізації ПБМССЧ та вибір засобів його практичної реалізації на етапі проектування як спільної задачі створення складної інформаційно-технічної системи, обумовили доцільність розроблення джерела опорного сигналу з використанням системи фазового автопідстроювання частоти [5, 11].

Система ФАПЧ забезпечує формування опорного цифрового сигналу з точним і стабільним значенням тривалості тактового інтервалу (періоду) за рахунок фазової синхронізації від провідного генератора (ПГ). Як ПГ можуть бути державні еталони часу і частоти, супутникові навігаційні системи, атомні та кварцові стандарти частоти. Важливим є те, що застосування системи ФАПЧ може забезпечити синхронізацію ПБМССЧ від провідного генератора, використовуючи за транспортне середовище кабельні, в тому числі IP-мережі, які є альтернативою закордонним супутниковим системам.

Розроблення джерела опорного сигналу з високими якісними показниками нерозривно пов'язано з удосконаленням технічних та конструкторських робіт, спрямованих на поліпшення (оптимізацію, адаптацію) параметрів, зростання його експлуатаційної надійності, поліпшення технологічності в експлуатації тощо. Виконання вимог щодо мінімальної тривалості режимів

перехідних процесів джерела опорного сигналу можливо забезпечити за рахунок реалізації в системі ФАПЧ оптимального за швидкістю входження в синхронізм [5, 11]. Виконаємо оптимізацію за швидкістю джерела опорного сигналу з системою ФАПЧ задля покращення якісних показників опорного сигналу і, як наслідок, підвищення точності та достовірності процесу багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем.

Джерело опорного сигналу ПБМССЧ побудовано з використанням системи ФАПЧ кварцового генератора, що керується напругою (ГКН), яка формується цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП). Цифрові сигнали керування, що поступають на входи ЦАП, формуються мікроконтролером згідно розроблених алгоритмів на основі даних фазового дискримінатора (ФД) про різницю фаз сигналів, які синхронізуються. Система ФАПЧ в процесі функціонування виконує автоматичне підстроювання частоти і фази керованого генератора під фазу синхронізуючого сигналу. Важливим є те, що використання цифрових технологій забезпечує можливість "запам'ятовування" даних ФД і ЦАП. У разі відсутності синхронізуючого сигналу розходження фаз (частот), в основному, буде обумовлено нестабільністю керованого генератора. Отже, принциповими складовими ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ є кварцовий генератор, що керується напругою від ЦАП, фазовий дискримінатор, мікроконтролер.

Проведення аналітичних досліджень системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ будемо виконувати з використанням схеми математичної моделі (рис. 2), яка, на відміну від відомих [5, 11], містить адаптивний цифровий ФД. Розроблення схеми, наведеної на рис. 2, виконано за умови ідеальності провідного генератора, тобто такого, у якого вихідний сигнал має абсолютно стабільне значення частоти і відсутній фазовий шум. Аналогічно зроблених в монографії [5] припущень, будемо вважати, що збурення, які діють на систему, незначні та їхній вплив відсутній, тобто $f(t)=0$. Враховуючи використання сучасних цифрових мікроелектронних компонентів, які є швидкодіючими та багаторозрядними, припустимо відсутність впливів ефектів квантування на процес автопідстроювання. Функцію фільтра нижніх частот (ФНЧ), яку виконує мікроконтролер, представимо у вигляді елемента з коефіцієнтом передачі $K_{ФНЧ}(t)$. В процесі досліджень важливим є врахування особливостей роботи системи ФАПЧ, які пов'язані з наявністю нелінійностей, обумовлених, наприклад, ефектами «насичення», періодичностями характеристики адаптивного цифрового ФД у функції різниці фаз [5, 10, 11].

З наведеної на рис. 2 схеми системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ та зроблених припущень можна записати алгебраїчне рівняння, яке описує роботу адаптивного цифрового ФД і вираз, що зв'язує різницю фаз $\varphi(t)$ із значенням різниці частот $\omega(t)$, відповідно сигналів ГКН $\omega_{ГКН}(t)$ і ПГ $\omega_{ПГ}(t)$

$$\varphi(t) = \varphi_{ПГ}(t) - \varphi_{ГКН}(t) \text{ та } \dot{\varphi}(t) = \varphi_0 + \int (\omega_{ПГ}(t) - \omega_{ГКН}(t)) dt = \varphi_0 + \int \omega(t) dt,$$

де φ_0 – різниця фаз при $t=0$, $\omega_{ПГ}(t)$ і $\omega_{ГКН}(t)$ – відповідно частота ПГ і ГКН.

Проведення аналітичних досліджень системи ФАПЧ виконаємо за умови реалізації фільтра нижніх частот у вигляді інтегральної ланки. Рівняння динаміки інтегральної ланки та її передатна функція $K_{\Phi}(p)$, як відношення зображення по Лапласу вихідної до вхідної величини за нульових початкових умов, відповідно матимуть вигляд

$$u_{ФНЧ\text{вих}}(t) = K_{\Phi} \int_0^t u_{ФНЧ\text{вх}}(t) dt \text{ та } K_{\Phi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi} p},$$

де $u_{ФНЧ\text{вх}}(t)$ та $u_{ФНЧ\text{вих}}(t)$ – відповідно напруга сигналу на вході та виході ФНЧ, реалізованого у вигляді інтегральної ланки; $T_{\Phi}=1/k_{\Phi}$ – постійна інтегрування; p – комплексна змінна ($p=\sigma+j\omega$).

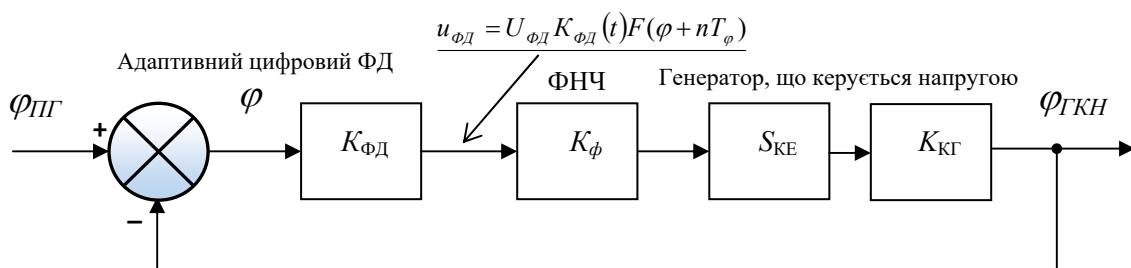


Рис. 2

Математичну модель замкнутої системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегральною ланкою для випадку, коли початкове розлаштування ГКН відносно ПГ є постійним та коефіцієнт передачі кварцового генератора КГ $K_{КГ}=1$, запишемо у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = -\frac{S_{KE}}{T_\phi} K_{КГ}(t) u_{\phi Д}(t) = K_1 u_{\phi Д}(t); \\ \varphi(t) = \varphi_{ПГ}(t) - \varphi_{ГКН}(t); \\ u_{\phi Д}(t) = U_{\phi Д} K_{\phi Д}(t) F(\varphi(t) + nT_\phi); \\ U_{\phi Д\min} \leq U_{\phi Д} \leq U_{\phi Д\max}; -1 \leq F(\varphi(t) + nT_\phi) \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

де t – час (незалежна змінна); S_{KE} – крутизна характеристики керуючого елементу; $u_{\phi Д}(t)$ – керуюча дія (сигнал на виході ФД); $U_{\phi Д}$ – екстремальне значення сигналу керуючої дії на виході ФД; $K_{\phi Д}(t)$ – коефіцієнт передачі адаптивного цифрового ФД; $F(\varphi + nT_\phi)$ – нормована періодична характеристика адаптивного цифрового ФД з коефіцієнтом періоду n ; $U_{\phi Д\max}$ і $U_{\phi Д\min}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення сигналу на виході адаптивного цифрового ФД; T_ϕ – період періодичної за координатою φ дискримінаційної характеристики адаптивного цифрового ФД. Коефіцієнт K_1 визначається рівнянням $K_1 = -S_{KE}/T_\phi$.

Проведемо оптимізацію за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегральною ланкою. В процесі оптимізації будемо враховувати обмеження на екстремальні значення та періодичність керуючої дії в функції фазової координати, що формується адаптивним цифровим ФД [5]. Керуюча дія – напруга на виході адаптивного цифрового ФД (рис. 2), є періодичною функцією різниці фаз φ , що вимірюється адаптивним цифровим ФД, вперше реалізованим в ПБМССЧ з використанням програмованої логічної інтегральної схеми CYCLONE IV. Вказана періодичність є наслідком того, що система ФАПЧ має нескінчене злічене число станів стійкої рівноваги, яке обумовлено періодичністю різниці фаз φ . Експериментально визначена періодичність адаптивного цифрового ФД формалізована і представлена виразом

$$\varphi = \varphi + nT_\phi, T_\phi = 2\pi, \forall n = -\infty, +\infty. \quad (2)$$

Обмеження на екстремальні значення напруги на виході адаптивного цифрового ФД типу "насичення", які за умови прийнятого значення коефіцієнта передачі ФД, рівного $K_{\phi Д}(t)=1$, можуть бути записані у вигляді нерівності

$$U_{\phi Д\min} \leq u_{\phi Д}(t) \leq U_{\phi Д\max}. \quad (3)$$

Сформулюємо постановку задачі оптимізації за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегральною ланкою в наступному виді. Необхідно, щоб система досягла стану стійкої рівноваги в момент часу t_k за допустимого значення періодичної керуючої дії $u_{\phi Д}(t, \varphi)$ з урахуванням того, що у момент часу $t=t_0$ вона знаходилася в стані, який визначається початковими умовами. Зазначений динамічний процес повинен виконуватися за умови мінімізації інтегрального критерію оптимальності, який представимо у вигляді функціонала

$$\Theta = \int_{t_0}^{t_k} 1 \cdot dt \Rightarrow \min.$$

З метою визначення оптимального за швидкодією керування в системі ФАПЧ джерела опорного сигналу скористаємося результатами проведених аналітичних досліджень з використанням принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна-Гамільтона, які наведено в монографії [5] з урахуванням обмежень (3) на екстремальні значення напруги на виході адаптивного цифрового ФД.

Згідно поставленої задачі необхідно знайти такий закон керування, а саме зміну значення $u_{\phi Д}(t)$, що забезпечує таку траєкторію руху, для якої значення функції Гамільтона H у всіх її точках будуть максимальні. Також потрібно, щоб функція Гамільтона H була максимальною за керуючою дією $u_{\phi Д}(t)$. Функція Гамільтона H і система рівнянь з допоміжними змінними ψ_1 і ψ_2 для системи рівнянь (1), відповідно, матимуть вигляд

$$H = \psi_1 \omega + \psi_2 K_1 u_{\phi Д}(t) - 1 \quad (4)$$

i

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \varphi}, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \omega} = \psi_1. \end{cases} \quad (5)$$

Інтегруючи (5), з урахуванням рівняння (4), отримуємо наступний вираз для допоміжних змінних ψ_1, ψ_2 вектор-функції Ψ за любых початкових умов ψ_{10} і ψ_{20}

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{10} = const, \\ \psi_2 = \psi_{10}t + \psi_{20}. \end{cases} \quad (6)$$

Згідно з принципом максимуму акад. Л.С. Понтрягіна оптимальним за швидкодією буде таке керування, за якого функція Гамільтона H буде максимальною за керуючою дією з обов'язковим урахуванням умов нерівності (3), а саме обмежень типу "насичення". Виконання зазначених вимог з урахуванням результатів аналітичних досліджень [5] дає наступне рішення:

$$u_{\text{фд}}(t) = U_{\text{ФДекстр}} \cdot \text{sign}(\psi_{10}t + \psi_{20}), \quad (7)$$

де $U_{\text{ФДекстр}}$ визначається граничними значеннями $U_{\text{ФДмакс}}$ або $U_{\text{ФДмін}}$.

Отриманий вираз (7) є оптимальним за швидкодією законом керування в системі ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегровальною ланкою. Відповідно до (7) керуюча дія $u_{\text{фд}}(t)$ повинна мати не більш, ніж одне перемикання. Це положення відповідає теоремі А.А. Фельдбаума про n -інтервалів, так як за будь-яких початкових умов ψ_{10} і ψ_{20} виразу, що стоїть в круглих дужках співвідношення (7), може змінити знак не більше одного разу [5].

Узагальнюючи отримані результати графоаналітичних досліджень [5] сформулюємо закон формування керуючої дії $u_{\text{фд}}(t)$ у вигляді наступного рівняння:

$$u_{\text{фд}}(t) = U_{\text{ФДекстр}} \cdot \text{sign} \sigma(\varphi, \omega), \quad (8)$$

де $\sigma(\varphi, \omega)$ – функція перемикання. Задля досягнення максимальної швидкодії в системі ФАПЧ з інтегровальною ланкою зазначена в рівнянні (8) функція перемикання $\sigma(\varphi, \omega)$ має визначатися з урахуванням наступних умов:

$$\begin{cases} \sigma(\varphi, \omega) = \text{sign} \left(\frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi \cdot K_1 \right), \text{ у разі } \left| \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi \cdot K_1 \right| > 0; \\ \sigma(\varphi, \omega) = 0, \text{ у разі } \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi K_1 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Встановлений закон керування (8) з урахуванням умов (9), на відміну від результатів попередніх досліджень, враховує додаткове обмеження на формування керуючої дії $u_{\text{фд}}(t)$, яке експериментально визначено і представлено формулою (2). Зазначені обмеження обумовлюють необхідність продовження теоретичних досліджень з метою визначення їхнього впливу на функціонування системи автопідстроювання, а також синтезу структури оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з використанням оригінальних схемотехнічних рішень, сучасних апаратних засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

На першому етапі синтезу виконаємо імітаційні дослідження моделі системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегровальною ланкою, в якій реалізовано закон формування керуючої дії (8) з урахуванням умов (9). Для розроблення імітаційної моделі системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ будемо використовувати програми Simulink пакету MATLAB та модель, яку запропоновано в дисертаційній роботі [11]. В розробленій імітаційній моделі (рис. 3) модуль «Блок контролю» виконує обчислення виразу $\xi(t) = (\omega^2/2) \text{sign} \omega$, який стоїть після оператора sign в системі рівнянь (9). Для проведення часового аналізу сигналів використовується чотирьохпроменевий осцилограф «Score1», а проведення дослідження у просторі станів на фазовій площині здійснюється за допомогою графобудівника «XY Graph». Результати експериментальних досліджень сигналів в контрольних точках схеми для випадку, коли початкове значення фазової похибки $\varphi_0=1$, а початкове частотне розлаштування $\omega_0=0$, наведено на рис. 4.

На другому етапі синтезу оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ виконаємо графо-аналітичні дослідження, в процесі яких будемо враховувати обмеження на амплітуду керуючої дії $u_{\text{фд}}(t)$ типу «насичення» (3) та обмеження (2), які пов'язані з залежністю керуючої дії від миттєвої різниці фаз $\varphi(t)$. Відповідно до результатів досліджень статична

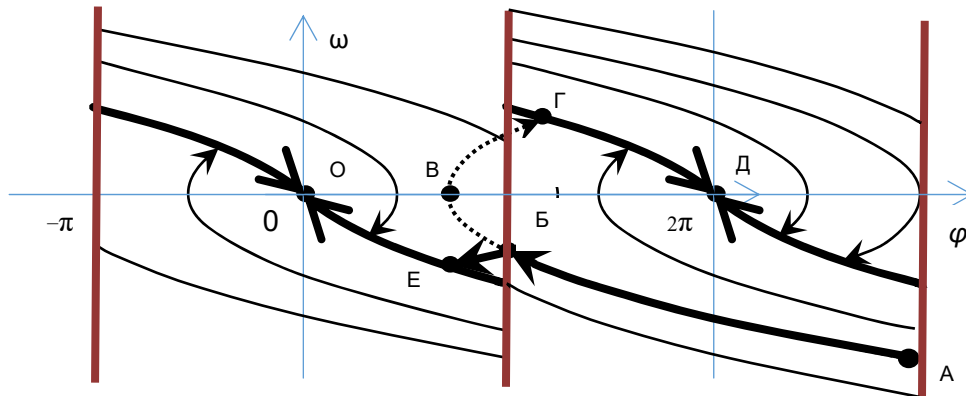


Рис. 5

Для аналітичного визначення умов, за яких в оптимальній за швидкодією системі ФАПЧ з інтегрувальною ланкою відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики ФД, скористаємося формулами обчислення тривалості перехідного процесу $\Theta_{\text{ОПТ}}$ [5]. З урахуванням введеного позначення $\Omega_K = S_{KE} U_{\text{ФДекстр}}$ і значення миттєвої частоти ω_1 в кінці першого інтервалу оптимального руху відображаючої точки на координатній площині (φ, ω) отримано рівняння для визначення тривалості перехідного процесу $\Theta_{\text{ОПТ}}$ в оптимальній за швидкодією системі ФАПЧ з інтегрувальною ланкою та адаптивним цифровим ФД

$$\Theta_{\text{опт}} = \left| -\frac{T_{\phi}}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_{\phi}}{\Omega_K} \omega_1 \right|. \quad (12)$$

Враховуючи те, що $\omega(t) = d\varphi(t)/dt$, можна записати умови, за яких буде відсутній вплив на оптимальний перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики адаптивного цифрового ФД

$$\left| -\frac{T_{\phi}}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_{\phi}}{\Omega_K} \omega_1 \right| < \frac{2\pi}{\omega(t)}. \quad (13)$$

За умови виконання нерівності (13) оптимальні за швидкодією перехідні процеси будуть закінчуватися не більше, ніж за два інтервали постійності керуючої дії (не більше, ніж одна зміна знаку) і виконуються умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

Отримані результати досліджень на основі теорії оптимального керування з використанням принципу максимуму Л.С. Понтрягіна використано під час розроблення структури і відповідних схемотехнічних рішень оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегрувальною ланкою. В розробленій на основі принципу максимуму системі реалізуються екстремальні керуючі дії, що максимізують функцію Гамільтона, а також умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про n -інтервалів. Формування алгоритмів керування виконується за допомогою мікроконтролера, а використання адаптивного цифрового фазового дискримінатора, побудованого на базі програмованої логічної інтегральної схеми CYCLONE IV, дає можливість створення дворівневої ієрархічної системи автопідстроювання. Розроблене вперше джерело опорного сигналу ПБМССЧ (рис. 1) з синтезованою системою ФАПЧ, в якій протікання перехідних процесів здійснюється згідно встановленого закону керування (8) та з урахуванням умов нерівності (13), забезпечує оптимальне за швидкодією автопідстроювання частоти.

4. Експериментальні дослідження пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем з оптимальним за швидкодією фазовим автопідстроюванням частоти. З метою перевірки отриманих аналітичних, графічних та імітаційних результатів досліджень виконано розроблення експериментального зразка ПБМССЧ SMART Grid енергосистем з джерелом опорного сигналу, який реалізовано на основі оптимізованої за швидкодією системи ФАПЧ. В процесі експериментальних досліджень виконано виміри відхилення часових інтервалів ВЧІ синхросигналу джерела опорного сигналу ПБМССЧ з оптимальною за швидкодією системою ФАПЧ. Виміри виконано з використанням супутникової навігаційної системи GPS, стандарту частоти кварцового СЧК-103, цифрового генератора з програмованою фазовою

модуляцію, персонального комп'ютера та вимірювача часових інтервалів ВЧВ-2002. Результати вимірів залежності від часу ВЧІ (Time Interval Error) синхросигналу, який формується джерелом опорного сигналу ПБМССЧ з оптимальною за швидкодією системою ФАПЧ, наведено на рис. 6.

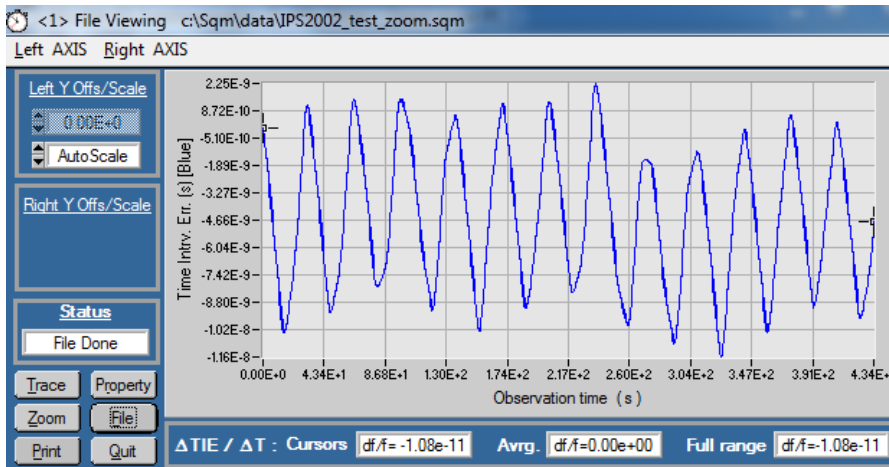


Рис. 6

З рисунка видно, що флуктуації фази синхросигналу, які обумовлені зоною нечутливості релейного елемента системи автопідстроювання частоти, знаходяться в межах від -11,6 нс до +2,25 нс. Значення максимального ВЧІ (MTIE) та девіації часового інтервалу (TDEV), які отримано в результаті статистичної обробки даних вимірів, в результаті порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 462-4 дають можливість зробити висновок про виконання

зазначених норм із значним запасом.

В процесі експериментальних досліджень виконано перевірку технічних характеристик ПБМССЧ щодо його використання для контролю показників якості двох синхросигналів SMART Grid енергосистем з різними номінальними значеннями частот у режимі реального часу відносно опорного сигналу, який синхронізується від супутникової навігаційної системи GPS. Разом з цим, проведено апробацію на діючих IP-мережах процесу одночасного моніторингу синхросигналів пристроєм ПБМССЧ з використанням програмного забезпечення P4000winXP, текстовий та графічний фрагмент даних вимірів яких представлено на рис. 7.

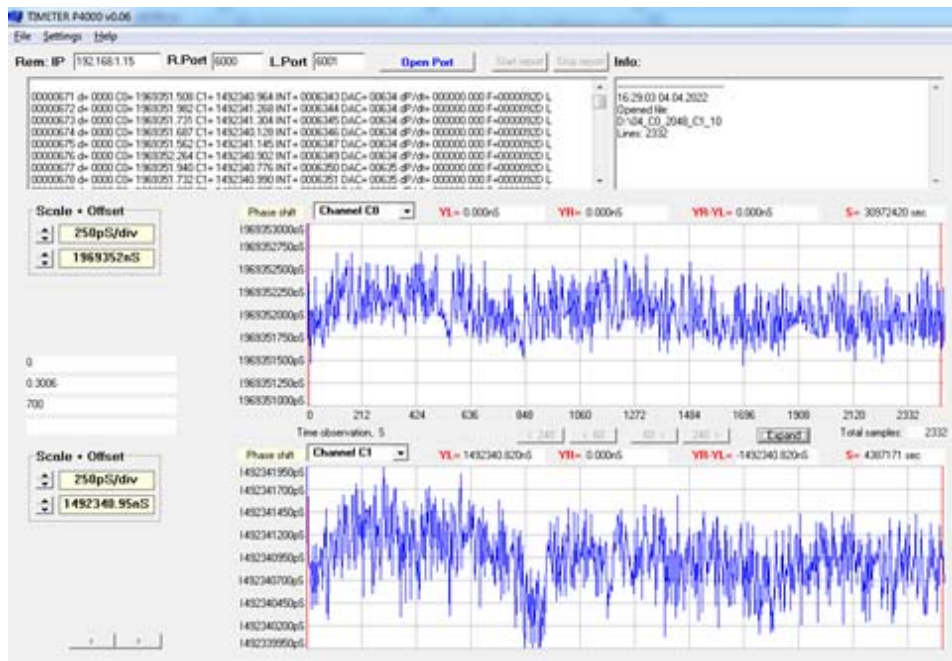


Рис. 7

Реалізована багатоканальність в ПБМССЧ розширює його функціональні можливості щодо оперативного вибору диспетчером синхросигналів, які можуть підключатися для проведення вимірювань, перетворення результатів вимірів у цифрові дані та їхнє передавання IP-мережами. Одночасне підключення до ПБМССЧ двох і більше контрольованих синхросигналів забезпечує

підвищення його продуктивності у два рази і більше у порівнянні з аналогічними одноканальними пристроями.

Висновки

1. Запропоновано апаратну і програмну реалізацію системи багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем з фазовим автопідстроюванням частоти, яка забезпечує можливість формування синхросигналів із заданою якістю, підвищеною надійністю і достовірністю.

2. Проведено аналітичні дослідження та імітаційне моделювання з використанням програми Simulink пакету MATLAB оптимальної за швидкістю системи фазового автопідстроювання частоти пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем.

3. Отримано формули для визначення умов, за яких в оптимальній за швидкістю системі фазового автопідстроювання частоти з інтегрованою ланкою відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики фазового дискримінатора і виконуються умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

4. Синтезовано структуру оптимальної за швидкістю системи ФАПЧ джерела опорного сигналу пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу з урахуванням кількості змін знаку керуючої дії на інтервалі керування згідно теореми А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

5. Розроблено пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, проведено його експериментальні дослідження та апробацію на діючих IP-мережах.

6. Експериментальні дослідження на діючих IP-мережах розробленого пристрою підтвердили адекватність запропонованого способу реалізації багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу з оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти та розрахунку параметрів перехідних процесів. Зокрема, експериментальним шляхом встановлено виконання пристроєм, який реалізовано на основі оптимальної за швидкістю системи фазового автопідстроювання, норм європейського стандарту ETS 300 462-4 за максимальним відхиленням (MTIE) та девіацією часових інтервалів (TDEV).

7. Використання пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу забезпечує підвищення надійності і достовірності формування синхросигналів SMART Grid енергосистем. Перспективним є використання розробленого пристрою на об'єктах високотехнологічних галузей економіки та безпеки країни.

Роботу виконано за бюджетною темою «Науково-технічні засади відновлення та керованості електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи (ENTSO-E)» (шифр «Фенікс»), КПКБК 6541030.

1. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>

2. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Трач І.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.

3. Dynamic of synergetic systems. Edited by H. Haken. Berlin: Springer, 1980. 271 p.

4. Time Synchronization in the Electric Power System. NASPI Technical Report. North American Synchronphasor Initiative. March 2017. URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/tstf_electric_power_system_report_pnml_26331_march_2017_0.pdf (accessed at 05.05.2022).

5. Коваль В.В., Самков О.В., Блінов І.В., Ламеко О.Л., Трач І.В., Поліщук С.Й., Вакась В.І., Чопик В.В., Осінський О.Л. Автоматизований моніторинг сигналів синхронізації часу енергосистем. К.: Видавничий центр НУБіПУ, 2021. 380 с.

6. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47 – 48.

7. Allnutt J., Anand D., Arnold D., Goldstein A., Noseworthy R., Subramaniam R., Weiss M., Li-Baboud Y., Nguyen C., Martin A. Timing challenges in the smart grid. NIST Special Publication 1500-08: National Institute of Standards and Technology, 2017. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-08>

8. Aweya J., Al Sindi N. Role of time synchronization in power system automation and smart grids. IEEE

international conference on *industrial technology* (ICIT). Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013. ID: 13484744. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505875>

9. Todescato M., Carli R., Schenato L., Barchi G. Smart Grid State Estimation with PMUs Time Synchronization Errors. *Energies*. 2020. Vol. 13. No 19. 5148. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195148>

10. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. М.: Мир, 2003. 456с.

11. Кальян Д.О. Автоматизация процесса контролю показателей качества устройств синхронизации цифровых сигналов багатомономенклатурного виробництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2020. 284 с

12. Koval V.V., Osinskiy O.L., Lysenko V.P., Samkov O.V., Khudyntsev M.M. Infocommunication technologies and networks for multichannel monitoring of synchronization signals of SMART grid and microgrid electrical systems. IEEE international scientific-practical conference on *Problems of Infocommunications. Science and Technology* (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, October 8-11, 2019. Pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061443>

MULTICHANNEL CLOCK SIGNAL MONITORING APPLIANCES FOR SMART GRID NETWORKS WITH SPEED-OPTIMAL PHASE-LOCKED LOOP

O.V. Samkov¹, V.V. Koval², V.P. Lysenko², D.O. Kalian², O.B. Rybina¹, O.L. Osinskiy¹

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

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oborony str., Kyiv, 03041, Ukraine.

E-mail: v.koval@nubip.edu.ua

The paper discusses a multichannel monitoring device with a speed-optimal phase-locked loop system, which, by performing simultaneous measurements of several clock signals against the reference one, processing and transmitting measurement results by an IP-network in real time, increases the accuracy and precision of providing time synchronization signals for SMART Grid energy system. Analytical expressions were established to determine the conditions under which in the optimal system of phase-locked loop has no influence on the transient process of limiting the periodic static characteristic of the phase discriminator. Experimental studies have confirmed meeting the norms of the European standard ETS 300 462-4 for the time parameters of the reference signal generated by the phase-locked loop system, which is optimal in terms of speed, and also demonstrated the effectiveness of the proposed implementation of the device for multi-channel monitoring of time synchronization signals for SMART Grid of power systems. References 12, figures 7.

Keywords: SMART Grid systems, clock signal monitoring, phase-locked loop.

1. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052> (Ukr)

2. Bazyuk T.M., Blinov I.V., Butkevych O.F., Goncharenko I.S., Denysyuk S.P., Zhujkov V.Y., Kyrylenko O.V., Lukyanenko L.M., Mykolaets D.A., Osypenko K.S., Pavlovskiy V.V., Rybina O.B., Stelyuk A.O., Tankevych S.E., Trach I.V. Intelligent electrical networks: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p. (Ukr).

3. Dynamic of synergetic systems. Edited by H. Haken. Berlin: Springer, 1980. 271 p.

4. Time Synchronization in the Electric Power System. NASPI Technical Report. North American Synchrophasor Initiative. March 2017. URL: https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/tsf_electric_power_system_report_pnnl_26331_march_2017_0.pdf (accessed at 05.05.2022).

5. Koval V.V., Samkov O.V., Blinov I.V., Lameko O.L., Trach I.V., Polischuk S.J., Vakas V.I., Chopyk V.V., Osinskiy O.L. Automated monitoring of time-synchronization signals of power systems. Kyiv: Vydavnychiy tsentr Natsionalnoho universytetu bioresursiv ta pryrodokorystuvannya Ukrainy, 2021. 380 p. (Ukr)

6. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevych S.E. Smart Grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 47–48. (Ukr)

7. Allnutt J., Anand D., Arnold D., Goldstein A., Noseworthy R., Subramaniam R., Weiss M., Li-Baboud Y., Nguyen C., Martin A. Timing challenges in the smart grid. NIST Special Publication 1500-08: National Institute of Standards and Technology, 2017. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-08>

8. Aweya J., Al Sindi N. Role of time synchronization in power system automation and smart grids. IEEE international conference on *industrial technology* (ICIT). Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013. ID:

13484744. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505875>

9. Todescato M., Carli R., Schenato L., Barchi G. Smart Grid State Estimation with PMUs Time Synchronization Errors. *Energies*. 2020. Vol. 13. No 19. 5148. <https://doi.org/10.3390/en13195148>

10. Breni S. Synchronization of digital communication networks. Moskva: Mir, 2003. 456 p.

11. Kalian D.O. Automation of the process of monitoring quality parameters of digital signal synchronization devices of flexible manufacturing system: diss. for obtaining a scientific degree of the candidate of tech. sciences: 05.13.07. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv. 2020. 284 p. (Ukr)

12. Koval V.V., Osinskiy O.L., Lysenko V.P., Samkov O.V., Khudyntsev M.M. Infocommunication technologies and networks for multichannel monitoring of synchronization signals of SMART grid and microgrid electrical systems. IEEE international scientific-practical conference on *Problems of Infocommunications. Science and Technology* (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, October 8-11, 2019. Pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061443>

Надійшла 17.05.2022

Остаточний варіант 05.08.2022