

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Енергетика:  
надійність та  
енергоефективність**

№ 29 (1354) 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: Energy:  
Reliability and  
Energy Efficiency**

No. 29 (1354) 2019

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2019

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність** = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2019. — № 29 (1354) 2019. — 116 с. —ISSN2224-0349.

Видання присвячене питанням теоретичних та практичних результатів досліджень і розробок, пов'язаних з проблемами надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування, а також електроенергетичної системи в цілому. Розглядаються проблеми електроспоживання, енергозбереження і підвищення якості електричної енергії.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі енергетики, надійності та ефективності роботи енергетичного устаткування .

The publication is devoted to the issues of theoretical and practical results of research and development associated with problems of reliability and efficiency of power equipment and power system as a whole. The problems of electricity consumption, energy saving and improvement of the quality of electric energy are considered.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of energy, reliability and efficiency of power equipment

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України №1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії*

У квітні 2013 р. Вісник НТУ«ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

Засновник

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Головний редактор**

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

**Заст. головного редактора**

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Секретар**

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

**Редакційна колегія серії**

*Відповідальний редактор:*

Гурин А. Г., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

*Відповідальний секретар:*

Федорчук С. О., НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Бондаренко В.Є., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Безпрозванних Г. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., директор ННІ ЕЕЕ, Україна

Гриб О. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Семдерович Г. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Лазуренко О. П., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Махотило К. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Довгалюк О.М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Editor-in-chief**

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

**Deputy editor-in-chief**

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

**Secretary**

Gorbunov K.O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

**Editorial staff**

*Associate editor:*

Gurin A. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

*Executive secretary:*

Fedorchuk S.O., NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Bondarenko V.E., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Bezprozvannyh G.V., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskii R. S., director SEI EEE, Ukraine

Gryb O.G., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Semerovich G. A., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Lazurenko O.P., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Makhotylo K.V., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Shevchenko S. Yu., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Dovgalyuk O.M., Professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 11 від 27 грудня 2019 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019

*С. О. БАНДУРОВ, Р. С. ЛОЖКІН, Г. О. ШИШКІН*

### **АНАЛІЗ ОБЛАСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СЕРЕДНЬО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОНІВ**

У статті представлені результати проведеного аналізу застосування середньо-енергетичних лінійних прискорювачів електронів у різних галузях промисловості. Мета даної роботи полягала у виявленні перспективних напрямів удосконалення прискорювачів електронів, з урахуванням особливостей технологічних процесів в кожній з галузей їх застосування. Проведений аналіз науково-технічної літератури показав, що найбільш перспективним напрямком застосування прискорювачів можуть бути технологічні процеси радіаційної модифікації полімерних оболонок. В даний час широке застосування знайшли вироби, які стискаються під дією температури: плівки і трубки, торцеві заглушки, шланги та інше. Електронні пучки середньої енергії знайшли застосування в технологічних процесах радіаційної вулканізації окремих частин автомобільних покришок, а також виробів з латексу натурального каучуку. Радіаційні технології застосовуються для: обробки продуктів харчування; інгібування овочів; дезінсекції зернових культур; глибокої стерилізації продуктів харчування для продовження терміну їх зберігання тощо. В результаті проведеного аналізу визначено, що для забезпечення більшої продуктивності процесу радіаційної обробки різних матеріалів необхідно: розробляти додаткові пристрої для підвищення продуктивності роботи прискорювачів; вдосконалення систем управління пучком електронів і систем захисту прискорювачів. Окреслені перспективні вдосконалення прискорювачів дозволять підвищити якість опромінення продукції і надійність роботи прискорювачів.

**Ключові слова:** прискорювачі електронів, радіаційні технології, опромінювання, іонізуюче випромінювання.

*С. О. БАНДУРОВ, Р. С. ЛОЖКИН, Г. А. ШИШКИН*

### **АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДНЕ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ**

В статье представлены результаты проведенного анализа применения средне-энергетических линейных ускорителей электронов в различных отраслях промышленности. Цель данной работы заключалась в выявлении перспективных направлений совершенствования ускорителей электронов, с учетом особенностей технологических процессов в каждой из отраслей их применения. Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что наиболее перспективным направлением применения ускорителей могут быть технологические процессы радиационной модификации полимерных оболочек. В настоящее время широкое применение нашли изделия, которые сжимаются под действием температуры: пленки и трубки, торцевые заглушки, шланги и прочее. Электронные пучки средней энергии нашли применение в технологических процессах радиационной вулканизации отдельных частей автомобильных покрышек, а также изделий из латекса натурального каучука. Радиационные технологии применяются для: обработки продуктов питания; ингибирования овощей; дезинсекции зерновых культур; глубокой стерилизации продуктов питания для продления срока их хранения, и др. В результате проведенного анализа установлено, что для обеспечения большей производительности процесса радиационной обработки различных материалов необходимо: разрабатывать дополнительные устройства для повышения производительности работы ускорителей; совершенствование систем управления пучком электронов и систем защиты ускорителей. Указанные перспективные совершенствования ускорителей позволят повысить качество облучения продукции и надежность работы ускорителей.

**Ключевые слова:** ускорители электронов, радиационные технологии, облучение, ионизирующее излучение.

*S. O. BANDUROV, R. S. LOZHKIN, G. O. SHYSHKIN*

### **ANALYSIS OF AREAS OF APPLICATION OF MEDIUM-ENERGY ELECTRON ACCELERATORS**

This work presents the results of an analysis of the most common areas of application of medium-energy linear electron accelerators. The accelerators are most widely used in the electrical, automotive, agricultural and medical industries. The purpose of this work is to identify promising areas for improving electron accelerators, taking into account the characteristics of the technological processes of each of the areas. The article describes the basic materials and products that are subjected to radiation treatment to improve their quality in specific production areas. The conducted analysis showed that most often electron accelerators are used in the technological process of radiation modification of polymer insulation shells of cable-conductor products. Quite widely, electronic processing is used to obtain products that are compressed by temperature: thermally compressible films and tubes, end caps, hoses, and much more. Medium-energy electron beams have found application in the technological processes of radiation vulcanization of individual parts of car tires, as well as products from natural rubber latex. Radiation technologies have recently been increasingly used to process agricultural and food products to inhibit vegetables; grain disinfestations; sterilization of spices, spices, etc.; deep sterilization of food to extend their shelf life, etc. The application of electron accelerators in the sterilization of medical devices is considered: thin-walled packaged medical devices, suture threads, pharmaceutical substances and other medical materials. As a result of the analysis, it was determined that to ensure greater productivity of the radiation processing of various materials, it is necessary: the development of additional devices to increase the performance of accelerators; improvement of electron beam control systems; improvement of accelerator protection systems. The indicated promising improvements of accelerators will improve the quality of product irradiation and increase the reliability of accelerators.

**Keywords:** electron accelerators, radiation technologies, irradiation, ionizing radiation.

**Вступ.** Електронні пучки середньої та високої енергії знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості. В роботі [1] авторами наведено такі статистичні дані застосування прискорювачів за галузями технологій радіаційного

зшивання: провідники та кабелі – 35%; поверхнева вулканізація – 35%; термоусадочні плівки – 15%; автомобільні шини – 4%; послуги – 6%; інше – 5%. Питанням промислового застосування прискорювачів електронів активно займаються як вітчизняні, так і

© С. О. Бандуров, Р. С. Ложкін, Г. О. Шишкін, 2019

зарубіжні вчені. Значний внесок у вивчення і розвиток фундаментальних основ взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною і біологічними об'єктами внесли вчені А. Н. Фрумкін, В. І. Спіцин, А. В. Топчієв, Г. І. Буджер, В. І. Гольданський, А. М. Кузин, А. К. Пікаєв, В. Л. Тальрозе та ін. [2]. В рамках вирішення науково-практичних проблем з радіаційної стерилізації медичних виробів та радіаційної обробки полімерних матеріалів і виробів присвячено великий обсяг робіт узбецькими (М. Ю. Ташметов, Б. Ю. Юлдашев, Ш. Махкамов), китайськими (L. Najie, Z. Mingsheng), польськими (Z. Zimek, I. M. Kaluska), американськими (C. S. Numan, M. R. Cleland, R. W. Hamm), англійськими (G. Burt), індійськими (D. Kanjilal), японськими (K. Takayama, S. Igarashi) та іншими фахівцями [3].

Результати наукових досліджень провідних вчених світу в галузі радіаційної технології, в свою чергу ставлять перед виробниками прискорювальної техніки все нові технічні завдання для задоволення потреб промисловості. Прискорювальна техніка, яка сьогодні експлуатується на більшості виробничих ліній, вимагає розробки додаткових технічних пристроїв та постійного вдосконалення систем контролю, автоматизації і захисту.

**Метою статті** є проведення аналізу науково-технічної літератури, дисертаційних досліджень, наукових досліджень опублікованих за останні роки, а також систематизація досвіду для визначення перспективних напрямків застосування середньо-енергетичних прискорювачів електронів в електротехнічній, автомобільній, харчовій, медичній та сільськогосподарській промисловості. Даний аналіз корисний для виявлення шляхів вдосконалення та розробки систем управління лінійних прискорювачів електронів з енергіями 300 кеВ–4 МеВ, а також додаткових технічних пристроїв, які підвищують енергоефективність технологічних процесів.

#### **Виклад основного матеріалу.**

**Провідники та кабелі.** Практична значущість обробленого за допомогою радіаційної технології («зшитого») поліетилену була доведена Доулом у 1948 році [4, 5]. Перше промислове виробництво радіаційно-обробленого поліетилену кабельно-провідникової продукції було здійснено компанією General Electric (США) у 1954 році. Отриманий ними кабель вигідно відрізнявся підвищеною механічною міцністю, тепло і термостійкістю. Ґрунтуючись на більш якісні характеристики кабельно-провідникової продукції багато виробничих компаній різних країн почали освоювати новий напрямок обробки поліетилену. І вже у 60-х роках минулого століття кабельні вироби з радіаційною обробкою поліетилену досягли промислових об'ємів [6].

Для зшивання поліетилену (ПЕ) найбільш відомі дві технології – радіаційна і хімічна. Обидві технології дозволяють проводити «зшивання» полімеру кабелю. Однак, радіаційні технології мають значні переваги за рахунок можливості збільшення струмового навантаження кабелів і більш тривалої роботи при

високій температурі [7]. Радіаційне зшивання ПЕ, здійснюється за допомогою іонізуючого  $\beta$  і  $\gamma$  випромінювання [6, 8]. У разі необхідності обробки значної товщини полімерного матеріалу використовується  $\gamma$  випромінювання, оскільки воно має високу проникаючу здатність, а в разі обробки малої товщини –  $\beta$  випромінювання. У якості джерела  $\gamma$  випромінювання зазвичай використовується ізотоп кобальту  $^{60}\text{Co}$ , період напіврозпаду якого дорівнює 5,2 роки.

Більшого застосування в кабельно-провідниковій промисловості знайшли джерела іонізаційного випромінювання – прискорювачі електронів. Вибір на користь прискорювачів електронів обумовлений їх радіаційною безпекою в процесі експлуатації, оскільки при їх виключенні повністю відсутнє випромінювання, що в свою чергу дозволяє практично відразу зупинити процес радіаційної модифікації матеріалу. На практиці значною популярністю користуються прискорювачі електронів типу ІЛП з енергіями пучка електронів  $E = 0,7\text{--}2,5$  МеВ і потужністю пучка  $P = 20\text{--}25$  кВт, а також прискорювачі ЕЛВ з енергією пучка електронів  $0,4\text{--}2,5$  МеВ і потужністю пучка  $P = 25\text{--}100$  кВт.

У процесі опромінення електронним пучком у поліетилені утворюються вільні радикали, які сприяють формуванню рідкісних поперечних зв'язків. При більш тривалому опроміненні зростає кількість поперечних зв'язків, що призводить до утворення просторової структури [9]. Більш детально радіаційно-радикальний механізм зшивання радіаційно-хімічним методом описано у низці наукових робіт [8, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Радіаційний метод зшивання ПЕ дозволив підвищити механічну міцність і хімічну стійкість полімерної ізоляції, а також поліпшити електроізоляційні характеристики і збільшити її термостійкість, що сприяє розширенню можливості застосування кабелів і дротів.

Переважають модифікують ізоляцію виготовлену з поліетилену і полівінілхлориду. Однак завдяки розвитку технологій, розробці, як нових полімерів, так і включенню в них різних домішок, що поліпшують якість продукції – стало можливим збільшити перелік якісних ізоляційних матеріалів та зменшити дози радіаційного поглинання. В свою чергу, це дозволило зменшити витрати на виробництво кабельної продукції.

Кабельна продукція займає основне місце на ринку серед матеріалів, які отримують за допомогою радіаційних технологій. Залежно від товщини кабелів при опроміненні використовують прискорені електрони з енергією від 0,5 МеВ до 4 МеВ, при цьому доза опромінювання, що поглинається становить 0,1–0,5 МГр. Немалий внесок у розвиток технології радіаційної модифікації полімерів кабельних виробів внесли вітчизняні вчені НТУ «Харківський політехнічний інститут» на базі єдиної в Україні кафедри «електроізоляційної та кабельної техніки» на чолі з завідувачем кафедри А. Г. Гурином [16, 17].

Радіаційною обробкою кабелю на основі поліолефінів займався С. В. Скрозніков [9]. Проведенню ґрунтового аналізу дослідження електричної ізоляції для кабелів середньої напруги на основі зшитого ПЕ низької щільності присвячена робота Г. К. Новікова [18].

Питання технології опромінення ізоляції провідникової продукції розглянуті в роботі А. В. Безпрозваних, І. А. Мірчука [19]. У даній роботі авторами було отримано оптимальні режими опромінення ізоляції провідникової продукції з перетином жили 1 мм<sup>2</sup> при енергії прискорених електронів 0,5 МеВ. В результаті проведеного авторами дослідження було вивчено вплив коефіцієнта опромінення електронним пучком (ЕП) на механічні та електричні характеристики кабелю ізоляції на основі безгалогенної композиції. Також даними авторами в роботі [20] представлені результати дослідження розподілу поглиненої дози по периметру і довжині полімерної оболонки суднового кабелю на основі безгалогенного матеріалу в залежності від технологічної дози опромінення. Авторами відзначена існуюча проблема нерівномірності розподілу дози по периметру і довжині кабелю. У зв'язку, з чим було знайдено оптимальні фізико-механічні характеристики оболонки при опроміненні дозами 160–170 кГр з енергією прискорених електронів 1,2 МеВ.

Рішенням проблем пов'язаних з нерівномірністю розподілу дози в процесі опромінення силових кабелів присвячена робота авторів Н. К. Куксанова, С. Н. Фадєєва, Р. А. Салимова, І. Г. Голубенко, Д. А. Когут, А. І. Корчагіна, А. В. Лаврухіна, П. І. Немитова, Е. В. Домарова, А. І. Семенова [21]. У даній роботі автори запропонували використовувати розроблені ними системи кільцевого, двостороннього і чотиристороннього опромінення кабелю ізоляції з метою підвищення рівня однорідності поглиненої дози. Реалізована авторами система кільцевого опромінення дозволяє організувати рівномірне за азимутом опромінення ізоляції дроту діаметром до 50 мм за допомогою поворотних електромагнітів, які спрямовують пучок електронів по заданій траєкторії руху. В результаті зміни конфігурації магнітного поля, можливо, отримати систему двостороннього опромінення при багаторазовому проходженні більш тонкого дроту діаметром до 10 мм через робочу зону прискорювача.

Запропонована авторами чотиристороння система опромінення на сьогоднішній день є найбільш популярною при радіаційній модифікації кабелю і провідникової продукції. Робота даної системи полягає в особливій організації розкладки кабелю, при якій після двох проходів кабелю під випускним вікном прискорювача відбувається опромінення з чотирьох сторін.

В роботі Н. І. Громова, М. Н. Громова, А. І. Ройха, М. Н. Степанова, Н. К. Куксанова, Р. А. Салимова [22] висвітлено практичний досвід використання прискорювачів серії ЕЛВ в складі чотиристоронньої системи опромінення кабелю і провідникової продукції. Використання даної системи опромінення, як

стверджують автори, дозволило повністю відійти від розроблених раніше систем опромінення, що в свою чергу не тільки підвищило рівномірність опромінення, а й збільшило продуктивність в цілому.

Варто зазначити, що сьогодні в Україні лідер із застосуванням радіаційних технологій в процесі виробництва кабелю і провідникової продукції є вітчизняна компанія ТОВ «Азовська кабельна компанія», яка розташована в м. Бердянськ. Підприємство в своїх технологічних потребах використовує промислові прискорювачі електронів серії ЕЛВ-1 та ЕЛВ-2. На базі даного підприємства виробляється досить широка номенклатура продукції зі «зшитого» поліетилену, а саме: кабелі для атомних електростанцій; кабелі суднові вогнестійкі. Також підприємство виготовляє бортові проводи спеціального призначення з ізоляцією з опроміненого фторопласта та ін. Як видно, використання радіаційних технологій дозволяє отримати кабелю і провідникової виробу з підвищеними експлуатаційними характеристиками та вимогами до пожежної безпеки.

### Термоусадочні плівки і трубки.

Прискорювальна техніка досить активно використовується для «зшивання» полімерних матеріалів, що підлягають модифікації: термоусадочні плівки і трубки, стрічки та ін. При виробництві даних матеріалів враховується ефект пам'яті – здатність радіаційно-зшитих полімерів «запам'ятовувати» вихідну форму. В процесі виготовлення термоусадочних трубок (ТУТ) ефект пам'яті «зшитих» полімерів дозволяє при нагріванні трубки до температури вище за температуру плавлення збільшити діаметр опромінених трубок потоком повітря, а при наступному швидкому охолодженні зафіксувати дану форму. В результаті трубка будучи «надіта», наприклад, на пошкоджену ділянку кабелю, після нагрівання до температури, при якій відбуваються зміни її кристалічної структури, щільно обжимає кабель і забезпечує необхідний механічний та хімічний захист, а також електричну ізоляцію кабелю. Зазвичай енергія електронів для «зшивання» ТУТ залежить від товщини полімерного матеріалу і лежить в діапазоні від 0,5 МеВ до 4 МеВ при дозах 100–250 кГр.

Детально питання радіаційної обробки полівінілхлоридних ТУТ досліджено Н. Б. Ісаматовим в дисертаційній роботі [3]. Автором роботи знайдено оптимальний режим опромінення ТУТ з полівінілхлориду, знайдено залежність механічної міцності ізоляційної трубки від поглиненої дози, а також залежність відносного подовження трубок.

Практичний досвід радіаційної обробки ТУТ був отриманий на підприємстві – ТОВ «Азовська кабельна компанія». Сьогодні компанією успішно відпрацьована і освоєна технологія опромінення ТУТ на основі кабелю і провідникової продукції марки поліетилену 153-10К, 102-10К, основна галузь застосування яких – ізоляція пошкоджених ділянок кабелю і провідникової мереж. Основні характеристики ТУТ склали: кратність усадки – до 2,5; міцність при розриві – не менше 100 кгс/см; відносне подовження при розриві – не менше 200 %; подовження

усадка – не більше 10–15 %; робочий температурний режим від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ; електрична міцність не менше 30 кВ/мм.

Поряд з освоєнням технології опромінення ТУТ підприємством була освоєна технологія опромінення торцевих заглушок з термічною усадкою (ЗТТ), які призначені для забезпечення електричної ізоляції і створення задовільного ущільнення, водонепроникності і стійкості до хімічної корозії кінців, як силових кабелів, так і кабелів зв'язку переважно під час їх транспортування. Енергія для обробки ЗТТ залежить від товщини матеріала ЗТТ, але зазвичай вона лежить в діапазоні 1–4 МеВ, при дозах 100–150 кГр.

Варто зазначити, що на сьогоднішній день також досить активно використовується радіаційна модифікація плівок з термічною усадкою для упаковок, а також стрічок для гідроізоляції сталевих трубопроводів. Енергія пучка електронів для обробки даних виробів лежить в діапазоні 0,5–1 МеВ, а доза становить 50–150 кГр. Також активний розвиток отримала радіаційна модифікація шлангів, труб, манжет з термічною усадкою, які широко застосовуються в промисловості, будівництві, електроенергетиці та інших галузях.

**Автомобільні покришки.** В теперішній час на початковому циклі процесу виробництва автомобільних покришок, перед формуванням і термічною вулканізацією деякі з елементів майбутньої шини (протекторів, каркаса, бічних стінок і т.д.) обробляють пучком електронів з низькою дозою опромінення 5–20 кГр та енергією електронів 0,5–3 МеВ. У роботах [2, 7] описано перспективи використання автомобільних покришок з радіаційною вулканізацією каучуку.

Обробка елементів шин дозволяє досягти:

- покращення експлуатаційних характеристик протектора;
- підвищення зносостійкості, збільшення зчіпних властивостей з дорожнім покриттям різного типу, зниження гістерезисних втрат на кочення;
- зниження втоми гумовокордних деталей шин (каркас, брекер);
- підвищення зносостійкості на 10–15 %;
- зниження використання дорогих добавок до гумових сумішей: каталізаторів вулканізації, диспергаторів, пом'якшувачів, пластифікаторів, олів та смол, знижуючи загальну тривалість виготовлення покришок на 20 %;
- зниження частки використання дорогих синтетичних і натуральних каучуків;
- зниження частки браку продукції і відходів виробництва.

Також радіаційної вулканізації можуть підлягати вироби з тонкого каучуку, які обробляються прискореними електронами з енергією 0,5–3 МеВ та дозою опромінювання 50–300 кГр. Це можуть бути вироби з латексу натурального каучуку, наприклад рукавички для роботи з радіаційними матеріалами та ін.

**Радіаційна обробка сільськогосподарських продуктів.** Останнім часом фахівці в галузі харчового

виробництва приділяють багато уваги обробці харчових продуктів електронними пучками високої енергії. Порівняно невеликі дози опромінювання використовують для: інгібування проростання картоплі, цибулі, моркви та інших овочів (0,05–0,15 кГр); дезінсекції зерна, крупи, борошна, сухофруктів (0,15–1 кГр); затримки дозрівання свіжих фруктів (0,2–1,0 кГр); збільшення терміну придатності фруктів, овочів, м'яса, риби (0,5–3 кГр); зберігання харчових продуктів таких як – рибні пресерви, м'ясні напівфабрикати (2,5–4,5 кГр); неповної стерилізації спецій, прянощів, сухофруктів (5–12,0 кГр); глибокої стерилізації продуктів дієтичного харчування, індивідуального раціонного харчування, харчування космонавтів (30–50 кГр) [23]. При цьому енергія електронів може становити 1–2 МеВ, що дає можливість обробляти овочеву продукцію та унеможливує ризик наявності остаточної радіації.

В роботі А. С. Алімова, У. А. Близнюк, П. Ю. Борщеговской [24] наведені результати дослідження ефективності використання прискорювача електронів з енергією пучка 1 МеВ для радіаційної обробки картоплі з метою пригнічення проростання і продовження термінів її зберігання. Аналіз результатів проведених досліджень довів ефективність використання потоків електронів з енергією 1 МеВ при дозі 0,2 кГр. Також авторами підкреслено, що дози 0,4 кГр і більше, повністю припиняють подальше проростання картоплі. В роботі [7] також описується факт ефективності використання пучків електронів з дозою 50–150 Гр з метою запобігання проростання картоплі протягом 5–10 місяців.

**Стерилізація виробів медичного призначення.**

Радіаційні технології знаходять все більше застосування в радіаційній стерилізації виробів медичного призначення. В роботі [3] досить докладно описані результати досліджень радіаційної стерилізації: шовної нитки кетгут, що розсмоктується, а також шовкової нитки; стерилізації латексних рукавичок одноразового застосування; стерилізації сировини фармацевтичних препаратів та інших медичних матеріалів.

Варто відзначити, що зазвичай для радіаційної обробки медичних матеріалів використовують прискорювачі електронів з енергією ЕП 5–10 МеВ тому, що електрони з такою енергією мають значну глибину проникнення. Однак часткове залучення прискорювачів з більш низькою енергією електронів, наприклад серії ЕЛВ-2, в цьому напрямку перспективно для обробки упакованих тонкошарових медичних виробів.

**Опис отриманих науково-технічних результатів.** Спираючись на проведений аналіз та наш особистий досвід роботи – з метою збільшення якісного показника, рівномірності опромінення, та продуктивності технологічного процесу радіаційної модифікації кабельно-провідникової продукції загалом, нами була розроблена концепція додаткової автоматизованої поворотної системи ЕП на  $180^{\circ}$  для прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2. На

сьогоднішній день задля забезпечення запобігання аварійних ситуацій, нами було розроблено та зібрано удосконалену систему швидкого захисту при високовольтних пробоях для прискорювачів серії ЕЛВ-1, ЕЛВ-2 [25]. Дана система захисту дозволяє в швидкому режимі (за час  $\tau \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$  с) відключати прискорювач не тільки у разі виникнення пробойів в високовольтному випрямлячі, а й при надходженні аварійних сигналів з других блоків та систем прискорювача, що дозволяє за короткий проміжок часу припинити процес радіаційної обробки різноманітних матеріалів та продуктів при виникненні аварії. Також нами була проведена робота з розробки та конструювання удосконаленої системи захисту від пропалювання фольги випускного вікна промислових прискорювачів серії ЕЛВ-1 [26]. Дана система дозволяє завдяки зв'язку з описаною вище системою швидкого захисту вимикати прискорювач в швидкому режимі під час процесу радіаційної обробки матеріалів у разі виникнення аварій в котушках системи відхилення ЕП. У разі виходу з ладу однієї з котушок порушується розподіл ЕП по фользі випускного вікна прискорювача, що в свою чергу суттєво впливає на радіаційно-технологічний процес, а згодом стає і причиною пропалювання фольги випускного вікна.

**Висновки.** Проведений аналіз використання прискорювачів електронів у промисловості та технологічних процесах показав, що за останні роки електронні пучки знаходять все більшу область застосування. Перевагою середньо-енергетичних прискорювачів електронів є їх безпека для навколишнього середовища. В процесі роботи вони не утворюють ризиків появи наведеної радіації, забезпечують високу продуктивність і економічну ефективність виробництва, а також безпечні для обслуговуючого персоналу при дотриманні відповідних норм безпеки.

Широке використання прискорювачів електронів у різноманітних технологічних процесах диктує й необхідність розробки додаткових пристроїв, що розширить можливості їх практичного застосування. Однією з актуальних проблем є вдосконалення систем захисту прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2, що застосовуються для різних технологічних цілей, з метою виключення можливості їхньої роботи в режимах аварійних ситуацій. Запобігання тривалій роботи прискорювача в аварійних режимах сприятиме зниженню витрат на його ремонт та мінімізує брак продукції в радіаційно-технологічному процесі. Дана проблема є метою наших подальших досліджень.

#### Список літератури

1. Robert W. Hamm, Marianne E. Hamm. Industrial Accelerators and their Applications. Edited by: (R&M Technical Enterprises, California, USA), 2012, ch. 3, p. 114.
2. Ершов Б. Г. Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения. Вестник российской академии наук, 2013, том 83, № 10, с. 885-895.
3. Исаматов Н. Б. Разработка технологий обработки медицинских, полимерных изделий и сырья фармацевтических препаратов на базе радиационно-технологического комплекса. Дис. канд. тех. наук. Ташкент, 2018, С. 142.

4. Marshedian J., Hoseinpour P. M. Polyethylene Cross-linking by Two-step, Silane method: A Review. Iranian Polymer Journal. 2009. № 18 (2). p. 103-128.
5. Peacock A. J. Handbook of Polyethylene, structures properties, and applications. New-York: Marcel Dekker, 2000, 534 p.
6. Иванов В. С. Радиационная химия полимеров. Химия, 1988, 320 с.
7. Абрамян Е. А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 248 с.
8. Сирота А. Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов. Химия, 1984, 150 с.
9. Скрозников С. В. Закономерности формирования структурно-механических свойств сшитых полиолефинов для кабельной техники. Москва, 2015, 148 с.
10. Чарлзби А., пер. с англ. под ред. Мокульский М. А., Финкель Э. Э. Ядерные излучения и полимеры. М.: Издательство иностранной литературы, 1962, 522 с.
11. Финкель Э. Э., Карпов В. Л., Берлянт С. М. Технология радиационного модифицирования полимеров. М.: Энергоатомиздат, 1983, 48 с.
12. Пьянков Т. Н. [и др.]. Радиационная модификация полимерных материалов. Киев: Техника, 1969, 229 с.
13. Фетесс Е., пер. с англ. под ред. З. А. Роговина. Химические реакции полимеров. М.: Мир, 1967. Том 2. 536 с.
14. Махлис Ф. А. Радиационная физика и химия полимеров. М.: Атомиздат, 1972, 328 с.
15. Гордиенко В. П. Радиационное модифицирование композиционных материалов на основе полиолефинов. К.: Наука думка, 1985, 76 с.
16. Гурин А. Г., Корнилов Е. А., Ложкин Р. С. Перспективы применения сильноточных электронных пучков для радиационной сшивки полиэтилена. Электротехника та електромеханіка. № 4. Харків, 2013, С. 47-51.
17. Гурин А. Г., Корнилов Е. А., Ложкин Р. С. Перспективы применения сильноточных импульсно-периодических индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции. Вісник НТУ «ХП». Харків: НТУ «ХП», 2016. № 3 (117), «Енергетика: надійність та енергоефективність». С. 47-59.
18. Новиков Г. К. Влияние радиационной сшивки в электрическом газовом разряде на механическую прочность полиэтиленовой кабельной изоляции. Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2017. Vol. 4, no. 2. С. 39-42.
19. Беспрозванных А. В., Мирчук И. А. Корреляция между электрическими и механическими характеристиками кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией на основе безгалогенной полимерной композиции. 2018. № 4. С. 54-57.
20. Bezprozvannyh G. V., Mirchuk I. A. Distribution of absorbed dose by the perimeter and the length of the polymeric protective sheath at radiaciously irradiation of the ship cable. PAST. 2019. № 5 (123), p. 44-48.
21. Куksанов Н. К., Фадеев С. Н., Салимов Р. А. и др. Технические средства улучшения качества облучения материалов ускорителями ЭЛВ. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11. № 5 (198), С. 950-957.
22. Gromov N. I., Roikh A. I. и др. 35-летний опыт инноваций радиационных технологий на заводе «Подольскабель». NDT World, 2018, v. 21, no. 1, pp. 52-55 DOI: 10.12737/article\_5aaf\_998e73ab65. 78306131.
23. Кобялко В. О., И. В. Полякова, В. Я. Саруханов и др. Радиационная обработка пищевых продуктов животного происхождения в целях обеспечения продовольственной безопасности военнослужащих. Международная науч.-прак. конференция, памяти В. М. Горбатова. Изд.-во: "Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова" РАН (Москва). №1, 2018, С.106-110.
24. Алимов А. С., Близнак У. А., Борщевская П. Ю. и др. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов. Серия физическая, 2017, том 81, № 6, С. 820-82.
25. Пат. 131551 UA, МПК (2018.01) H05H 15/00 G21K 1/00. Система швидкого захисту при високовольтних пробоях для прискорювачів електронів ЕЛВ-1, ЕЛВ-2 / С. О. Бандуров, u201806193; Заяв. 04.06.2018; Опубл. 25.01.2019, Бюл. № 2.

26. Bandurov S. O., Lozhkin R. S., Shishkin G. O. Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil. *BAHT*. 2019. № 4 (122). p. 169-173.

#### References (transliterated)

Robert W. Hamm, Marianne E. Hamm. *Industrial Accelerators and their Applications*. Edited by: (R&M Technical Enterprises, California, USA), 2012, ch. 3, p. 114.

2. Ershov B. G. *Radiacionnye tehnologii: vozmozhnosti, sostoyaniye i perspektivy primeneniya*. Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2013, tom 83, № 10, s. 885-895.

3. Isamatov N. B. *Razrabotka tehnologij obrabotki medicinskih, polimernih izdelij i syrya farmacevticheskikh preparatov na baze radiacionno-tehnologicheskogo kompleksa*. Dis. kand. teh. nauk. Tashkent, 2018, S. 142.

4. Marshedian J., Hoseinpour P. M. *Polyethylene Cross-linking by Two-step, Silane method: A Review*. Iranian Polymer Journal. 2009. № 18 (2). p. 103-128.

5. Peacock A. J. *Handbook of Polyethylene, structures properties, and applications*. New-York: Marcel Dekker, 2000. 534 p.

6. Ivanov V. S. *Radiacionnaya himiya polimerov*. L.: Himiya, 1988, 320 s.

7. Abramyan E. A. *Promyshlennyye uskoriteli elektronov*. M.: Energoatomizdat, 1986, 248 s.

8. Sirota A. G. *Modifikatsiya struktury i svoystv poliolefinov*. L.: Himiya, 1984, 150 s.

9. Skroznyk S. V. *Zakonomernosti formirovaniya strukturno-mehaniicheskikh svoystv sshitykh poliolefinov dlya kabelnoj tehniki*. Dis.kand. teh. nauk. Moskva, 2015, 148 s.

10. Charlzbi A., per. s angl. pod red. Mokulskij M. A., E. E. Finkel. *Yadernyye izlucheniya i polimery*. M.: Izdatelstvo inostrannoj literatury, 1962, 522 s.

11. Finkel E. E., Karpov V. L., Berlyant S. M. *Tehnologiya radiacionnogo modifikirovaniya polimerov*. M.: Energoatomizdat, 1983, 48 s.

12. Pyankov T. N., [i dr.]. *Radiacionnaya modifikatsiya polimernyh materialov*. Kiev : Tehnika, 1969, 229 s.

13. Fetess E. per. s angl. pod red. Rogovina Z. A. *Himicheskie reakcii polimerov*. M.: Mir, 1967. Tom 2. 536 s.

14. Mahlis F. A. *Radiacionnaya fizika i himiya polimerov*. M.: Atomizdat, 1972, 328 s.

15. Gordienko V. P. *Radiatsionnoe modifikirovaniye kompozitsionnykh materialov na osnove poliolefinov*. K.: Nauka dumka, 1985, 176 s.

16. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S.. *Perspektivy primeneniya silnotochnykh elektronnykh puchkov dlya radiacionnoj sshivki*

*polietilena*. Elektrotehnika ta elektromehanika. № 4. Harkiv 2013, S. 47-51.

17. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S. *Perspektivy primeneniya silnotochnykh impulsno-periodicheskikh indukcionnykh uskoritelej elektronov v proizvodstve kabelno-provodnikovoy produkcii*. Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI», 2016. № 3 (1175), Energetika: nadijnist ta energoefektivnis. S. 47-59.

18. Novikov G. K. *Vliyanie radiacionnoj sshivki v elektricheskomo gazovom razryade na mehanicheskuyu prochnost polietilenovoy kabelnoj izolyatsii*. Russian Internet Journal of Electrical Engineering. 2017. Vol. 4, no. 2. S. 39-42.

19. Besprozvannyh A. V., Mirchuk I. A. *Korreljatsiya mezhdru elektricheskimi i mehanicheskimi harakteristikami kabeley s radiatsionno-modifikirovannoy izolyatsiey na osnove bezgalogennoj polimernoy kompozitsii*. Elektrotehnika I Elektromehanika. 2018. № 4. S. 54-57.

20. Bezprozvannyh G. V., Mirchuk I. A. *Distribution of absorbed dose by the perimeter and the length of the polymeric protective sheath at radiacinous irradiation of the ship cable*. PAST. 2019. № 5 (123), p. 44-48.

21. Kuksanov N. K., Fadeev S. N., Salimov R. A. i dr. *Tehnicheskoe sredstva uluchsheniya kachestva obluheniya materialov uskoritelyami ELV*. Pisma v EChAYa. 2014. T. 11. № 5 (198), S. 950-957.

22. Gromov N. I., Gromov M. N., Roykh A. I. i dr. *35-letnij opyt innovacij radiacionnykh tehnologij na zavode «Podol'skkabel'»*. NDT World, 2018, v. 21, no. 1, pp. 52–55 DOI: 10.12737/article\_5aaf998e73ab65.78306131.

23. Kobyal'ko V. O., Polyakova I. V., Saruhanov V. Ya. i dr. *Radiacionnaya obrabotka pishevykh produktov zhivotnogo proishozhdeniya v celyah obespecheniya prodovolstvennoj bezopasnosti voennosluzhashih*. Mezhdunarodnaya nauch.-prak. konferenciya, pamyati V. M. Gorbatova. Izd.–vo: "Federalnyj nauchnyj centr pishevykh sistem im. V. M. Gorbatova" RAN (Moskva). №1, 2018, S. 106-110.

24. Alimov A. S., Bliznyuk U. A., Borshegovskaya P. Yu. i dr. *Primenenie puchkov uskorennykh elektronov dlya radiatsionnoj obrabotki produktov pitaniya i biomaterialov*. Izvestiya RAN. Ceriya fizicheskaya, 2017, tom 81, № 6, S. 820–82.

25. Pat. 131551 UA, MPK (2018.01) H05H 15/00 G21K 1/00. *Sistema shvidkogo zahistu pri visokovoltnih probayah dlya priskoryuvachiv elektroniv ELV-1, ELV-2*. S. O. Bandurov, u201806193; Zayav. 04.06.2018; Opubl. 25.01.2019, Byul. № 2.

26. Bandurov S. O., Lozhkin R. S., Shishkin G. O. *Improved burning down protection system of industrial electron accelerators outlet window foil*. VANT. 2019. № 4 (122). p. 169-173.

Надійшла (received) 18.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бандуров Сергій Олегович (Бандуров Сергей Олегович, Bandurov Sergey Olegovich)** – аспірант кафедри фізики та методики навчання фізики, Бердянський державний педагогічний університет; м. Бердянськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0377-985X>; e-mail: [sbandurov91@gmail.com](mailto:sbandurov91@gmail.com)

**Ложкін Руслан Сергійович (Ложкин Руслан Сергеевич, Lozhkin Ruslan Sergeevich)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5049-514X>; Україна; e-mail: [rslozhkin@gmail.com](mailto:rslozhkin@gmail.com)

**Шишкін Геннадій Олександрович (Шишкин Геннадий Александрович, Shyshkin Gennadiy Aleksandrovich)** – доктор педагогічних наук, доцент, Бердянський державний педагогічний університет, професор кафедри фізики та методики навчання фізики; м. Бердянськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2617-6699>; e-mail: [ur3qugs@gmail.com](mailto:ur3qugs@gmail.com)



*Г. В. БЕЗПРОЗВАННИХ, О. Г. КЕССАЄВ, І. Ю. ГАВРИЛЮК*

### **СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З ВІЗУАЛІЗАЦІЮ ПРОЦЕСУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АКТИВНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ**

Розроблено стенд для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації та визначення діелектричних втрат в зразках конденсаторів з пасивним і активним діелектриком. Лабораторний стенд включає джерело змінного струму, цифровий двоканальний осцилограф з програмним забезпеченням, ноутбук, професійний портативний вимірювач індуктивності, опору і ємності. Виконано тестування лабораторного стенду з обов'язковим калібруванням осцилографа. Отримано осцилограми напруженості електричного поля, поляризації і петлі діелектричного гістерезису для зразків конденсаторів з активним діелектриком. Показано, що залежності істотно відрізняються для різних матеріалів, що застосовуються в якості діелектрика конденсатора. Виконано дослідження частотних залежностей ємності і тангенса кута діелектричних втрат конденсаторів з пасивним і активним діелектриком.

**Ключові слова:** активні діелектрики, сегнетоелектрики, домени, спонтанна поляризація, петля діелектричного гістерезису, діелектричні втрати, діелектрична проникність, ємність, стенд, тестування, калібрування, конденсатор, частотні залежності.

*А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ, А. Г. КЕССАЕВ, И. Ю. ГАВРИЛЮК*

### **СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛЯРИЗАЦИИ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Разработан стенд для исследования электрических свойств с возможностью визуализации процесса поляризации и определения диэлектрических потерь в образцах конденсаторов с пассивным и активным диэлектриком. Лабораторный стенд включает источник переменного тока, цифровой двухканальный осциллограф с программным обеспечением, ноутбук, профессиональный портативный измеритель индуктивности, сопротивления и емкости. Выполнено тестирование лабораторного стенда с обязательной калибровкой осциллографа. Получены осциллограммы напряженности электрического поля, поляризации и петли диэлектрического гистерезиса для образцов конденсаторов с активным диэлектриком. Показано, что зависимости существенно отличаются для различных материалов, применяемых в качестве диэлектрика конденсатора. Выполнены исследования частотных зависимостей емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов с пассивным и активным диэлектриком.

**Ключевые слова:** активные диэлектрики, сегнетоэлектрики, домены, спонтанная поляризация, петля диэлектрического гистерезиса, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, емкость, стенд, тестирование, калибровка, конденсатор, частотные зависимости.

*G. BEZPROZVANNYCH, O. KIESSAIEV, I. HAVRYLYUK*

### **PECULIARITIES INVESTIGATION OF THE USING ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS AT THE TRADERS WORK ON THE ENERGY MARKET OF UKRAINE**

A stand has been developed for studying electrical properties with the ability to visualize the polarization process and determine the dielectric loss in samples of capacitors with a passive and active dielectric. The laboratory bench includes an AC source, a digital two-channel oscilloscope with software, a laptop, a professional portable meter of inductance, resistance and capacitance. The laboratory bench was tested with the required calibration of the oscilloscope. Oscillograms of the electric field strength, polarization, and dielectric hysteresis loop for samples of capacitors with an active dielectric are obtained. It is shown that the dependences are significantly different for different materials used as a dielectric of a capacitor. The frequency dependences of the capacitance and the tangent of the dielectric loss angle of capacitors with a passive and active dielectric are studied.

**Keywords:** active dielectrics, ferroelectrics, domains, spontaneous polarization, dielectric hysteresis loop, dielectric loss, permittivity, capacitance, stand, testing, calibration, capacitor, frequency dependencies.

**Вступ.** Для сучасної техніки важливе значення набувають властивості твердих діелектричних матеріалів, що дозволяє використовувати їх для перетворення енергії або інформації. Широко використовується так звані активні діелектрики, параметри яких можна регулювати, змінюючи, наприклад, напруженість електричного поля, температуру, механічне напруження [1 - 3].

На відміну від пасивних діелектриків, від яких вимагається стабільність властивостей, вимоги до активних абсолютно протилежні: чим сильніше змінюються його властивості при зовнішніх впливах, тим краще активний елемент може виконувати функції управління енергією або її перетворення. Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, посилення, модуляцію електричних і оптичних

сигналів, а також запам'ятовування і перетворення інформації [1 - 5].

Слід зазначити, що чіткої межі між активними і пасивними діелектриками не існує. Іноді один і той же матеріал в різних умовах експлуатації може виконувати пасивні функції (ізолятора, конденсатора) або активні функції елемента керування, перетворення [6 - 9].

До числа активних діелектриків відносять: пьезо-, піро-, сегнетоелектрики; електрети; рідкі кристали; матеріали лазерної електроніки; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями і інші матеріали. Властивостями активних діелектриків можуть володіти не тільки тверді, але також рідкі і

навіть газоподібні речовини (наприклад, активне середовище газових лазерів) [1 - 3].

Так, наприклад, п'єзокераміка застосовується в малогабаритних мікрофонах, телефонах, гучномовцях (високочастотних), детонаторах (для зброї), різних пристроях підпалу в газових системах. П'єзокерамічні елементи можна використовувати в якості датчиків тиску, деформацій, прискорень і вібрацій. Подвійне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки) покладено в основу роботи п'єзореzonансних фільтрів, ліній затримки і п'єзотрансформаторів [1 - 3].

Особливістю кристалічних активних діелектриків, в котрих іони різного знаку розташовані в певному порядку, є прояв поляризації навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. [В лінійних діелектриках така поляризація не відбувається, тому що внутрішнє електричне поле, що створюється зв'язаними зарядами, компенсується полем вільних зарядів [7 - 9].] Порушення такої компенсації, що призводить до часової появи електричного поля в кристалі, відбувається в п'єзоелектриках (при відповідних деформаціях) та в піроелектриках (при змінній температурі кристалу).

Наведена в зовнішньому полі поляризація може довго зберігатися в діелектриках (наприклад, в полімерах та кераміці) після зняття електричного поля (так звані електрики) [1 - 3].

При використанні таких активних матеріалів необхідне знання комплексу їх властивостей, що дозволяють використовувати їх при різних умовах експлуатації.

**Проблема дослідження електричних властивостей активних діелектриків. Особливості структури сегнетоелектриків.** Сегнетоелектрики є різновидністю піроелектриків, що володіють в певному інтервалі температур спонтанною поляризацією, а також нелінійною залежністю поляризації від напруженості прикладеного електричного поля [2, 4].

При відсутності зовнішнього електричного поля окремі ділянки структури сегнетоелектриків мають власні електричні моменти, викликані зміщенням іонів або полярних груп атомів. Моменти сусідніх ділянок взаємно орієнтуються в одному напрямку в межах макроскопічної області, званої доменом. Лінійні розміри доменів складають від 1 мкм до 1 мм [2, 4]. Напрямок електричних моментів у різних доменів різний. В результаті сумарний вектор поляризації зразка в цілому дорівнює нулю. Звичайні (пасивні) діелектрики не мають таких областей. Тільки дуже дрібні кристали можуть бути одно доменними [2, 4].

Зовнішнє електричне поле змінює напрямок електричних моментів доменів, відбувається процес зародження і зростання нових доменів за рахунок зміщення доменних меж. В результаті відбувається переорієнтація вектора спонтанної поляризації в напрямку зовнішнього поля. Це створює ефект дуже сильної поляризації і обумовлює надвисокі значення діелектричної проникності сегнетоелектриків (до сотень тисяч) [2, 4]. Залежність поляризації  $P$  від напруженості електричного поля  $E$  – нелінійна і при циклічній зміні  $E$  має вигляд петлі діелектричного

гістерезису. Напруженість поля  $E_c$ , при якій відбувається зміна напрямку вектора поляризації, є коерцитивної силою. Діелектричний гістерезис зумовлений незворотним зміщенням доменних меж під дією поля і свідчить про додаткові витрати енергії, пов'язаних з орієнтацією доменів [2, 4]. Залишкова поляризація  $P_r$  і коерцитивна сила  $E_c$  залежать від природи діелектрика і визначаються факторами, що впливають на рух доменних стінок, – розміром кристалітів, наявністю домішок і дефектів [5]. Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Сегнетоелектрики характеризуються великим значенням тангенса кута діелектричних втрат ( $tg \delta \geq 0.1$ ) [2, 4].

Наявність петлі діелектричного гістерезису є основною властивістю сегнетоелектриків, що відрізняє їх від інших класів діелектриків [2, 4].

Іншим характерним параметром сегнетоелектриків є сегнетоелектрична точка Кюрі – температура  $T_c$ , при якій виникає (при охолодженні) або зникає (при нагріванні) спонтанна поляризація, а діелектрична поляризація досягає свого максимального значення [2, 4]. Після досягнення точки Кюрі доменна структура розпадається і сегнетоелектрик переходить в пароелектричний стан. Це супроводжується різким зменшенням  $tg \delta$ , оскільки зникають втрати на гістерезис [2, 4]. У цій точці відбувається фазовий перехід з полярного стану в неполярний. Величина спонтанної поляризації зазвичай сильно залежить від температури в області фазового переходу і в самій точці переходу зникає або стрибком (фазовий перехід першого роду, наприклад в титанаті барію  $BaTiO_3$ ), або безперервно (фазовий перехід другого роду, наприклад в сегнетовій солі) [2, 4]. З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність різко зростає. Сильна температурна залежність (в полярній і неполярній фазах) спостерігається не тільки у діелектричній проникності, а і у п'єзоелектричних та інших термодинамічних коефіцієнтів сегнетоелектриків. З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність  $\epsilon$  різко зростає. При температурах вище точки Кюрі залежність діелектричної проникності від температури підкоряється закону Кюрі-Вейсса [2, 4].

Для характеристики властивостей сегнетоелектриків в різних умовах роботи застосовують статичну діелектричну проникність та диференційну діелектричну проникність, котра залежить від значення напруженості зовнішнього поля [2, 4]. В лінійних діелектриках статична і диференційна діелектрична проникність не залежать від напруженості електричного поля (за певних умов: в області сильних електричних полів) і дорівнюють одна одній [7, 8].

Сегнетоелектрики застосовуються для виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю; діелектричних підсилювачів, модуляторів та інших керованих пристроїв на основі нелінійної залежності поляризації; в лічильно-обчислювальній техніці в якості елементів пам'яті; використання кристалів

сегнето- і антисегнетоелектриків для модуляції і перетворення лазерного випромінювання; виготовлення п'єзо- і піроелектричних перетворювачів [2, 4].

**Метою статті** є розробка стенду для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації осцилографічним методом та визначенням діелектричних втрат в зразках конденсаторів з активним діелектриком.

**Характеристика стенду.** Конструктивно лабораторний стенд складається з двоканального осцилографа VDS OWON; ноутбука (PC) з програмним забезпеченням; джерела змінної напруги В-4; вимірювача ємності і тангенса кута діелектричних втрат RLC Meter DE-5000; з'єднувальних кабелів; зразків конденсаторів з лінійним і активним діелектриком.

Розроблений стенд забезпечує візуалізацію залежності між напругою, що прикладається до зразка активного діелектрику, та електричним зарядом, тобто між напруженістю електричного поля та вектором поляризації (рис. 1); отримання частотних залежностей електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат в зразках конденсаторів з активним (нелінійним) та пасивним (лінійним) діелектриком [10].

Випрямляч В-24 здійснює перетворення змінного електричного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В в змінний струм з плавно регульованою напругою від 0 до 30 В і силою струму до 10 А, а також в випрямлений струм з плавно регульованою напругою від 0 до 24 В і силою струму до 10 А. Максимальна потужність, споживана випрямлячем, може досягати 500 Вт.

Цифровий вимірювач RLC являє собою високоточний вимірювач параметрів LCR з подвійним дисплеєм і працює в режимі автоматичного вибору діапазону повного опору змінного струму та опору постійного струму. Параметри вимірюються на частоті: 100 Гц; 120 Гц; 1 кГц; 10 кГц; 100 кГц. Виміряні дані можна передавати в комп'ютер через опціональний повністю оптично-ізолюваний інфрачервоний інтерфейс USB-IR.

Спостереження кривої поляризації відбувається за допомогою відомої схеми Соєра – Тауєра [7-8].

Блок-схема стенду по дослідженню електричних властивостей діелектриків представлено на рис. 1.

Розроблений стенд дозволяє візуалізувати залежність заряду від напруги  $q(U)$  (вектора поляризації від напруженості електричного поля  $P(E)$ ) осцилографічним методом. На перший канал осцилографа (розгортка по вертикалі (вхід «Y»)) подається напруга  $U_x$ , пропорційна величині заряду  $q$  (або поляризації  $P$ ). На другий канал (розгортка по горизонталі) (вхід «X») – напруга  $U_y$ , пропорційна величині напруги  $U_c$ , на конденсаторі, що досліджується (рис. 2).

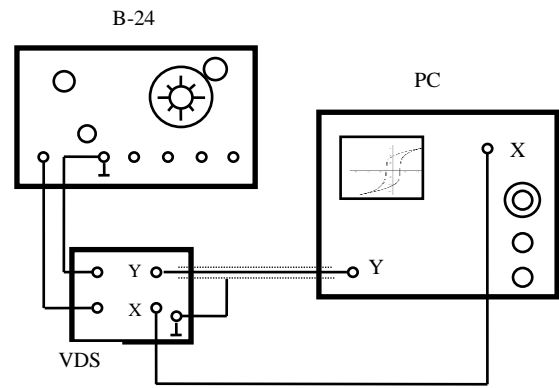


Рис. 1 – Блок-схема стенду по дослідженню петлі діелектричного гістерезису активних діелектриків

Конденсатор  $C$ , що досліджується, з'єднаний послідовно з іншим конденсатором  $C_e$  (рис. 2) з лінійним (пасивним) діелектриком, наприклад, конденсаторним папіром.

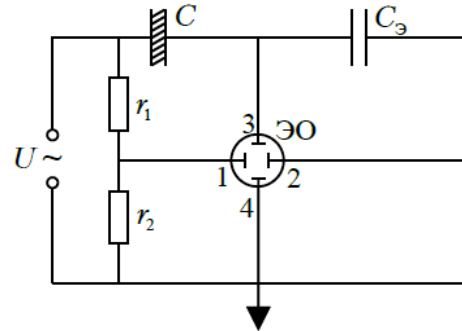


Рис.2 – Принципова схема стенду

У конденсаторів з пасивним діелектриком ємність (відносна діелектрична проникність) не залежить від прикладеної напруги, що справедливо для області слабких електричних полів [7, 8]. Ємність конденсатора  $C_e$  постійна і значно більша ємності конденсатора  $C$ . Змінна напруга  $U\sim$  подається на послідовно з'єднані конденсатори  $C$  (досліджувані зразок) і  $C_e$ . Оскільки величина ємності  $C_e \gg C$ , то  $U_C \gg U_e$ , і можна вважати, що  $U_C \approx U\sim$

Напруженість електричного поля в зразку становить

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1)$$

де  $d$  – відстань між пластинами конденсатора  $C$ , що досліджується. Відповідно до (1) на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа (позначено PC – рис. 1 або ЭО – рис. 2) (канал 1) подається напруга  $U_x$ , пропорційна напруженості електричного поля  $E$  в досліджуваному конденсаторі  $C$ .

На вертикально відхиляючі пластини 3 – 4 (канал 2) подається напруга  $U_y$  з еталонного конденсатора  $C_e$ , пропорційно величині поляризації  $P$ . Так як ємності  $C$  і  $C_e$  з'єднані послідовно, то

$$q = CU_x = C_e U_e, \quad (2)$$

де  $q$  – заряд на пластині конденсатора.

З (1) визначається напруга на еталонному конденсаторі  $C_e$

$$U_e = \frac{C \times U_x}{C_e} = \frac{q}{C_e} \cdot C \quad (3)$$

Враховуючи, що  $q = \sigma S$ , де  $\sigma$  – поверхнева щільність заряду,  $S$  – площа пластин конденсатора  $C$ , то:

$$U_e = U_y = \frac{\sigma \times S}{C_e} \cdot C \quad (4)$$

Враховуючи, що вектор поляризації  $P$  і поверхнева щільність зарядів дорівнюють одне одному  $P = \sigma$  [6], (4) запишеться у вигляді

$$U_e = U_y = \frac{S}{C_e} \times P \quad (5)$$

Таким чином, з каналу 2 (вертикальна розгортка) подається напруга, пропорційна поляризації діелектрика  $P$ .

На екрані ноутбука при повному циклі зміни напруженості поля  $E$  спостерігається (у відповідному масштабі) залежність вектора поляризації від напруженості електричного поля  $P = f(E)$ , тобто петля діелектричного гістерезису.

**Апробація стенду по візуалізації петлі діелектричного гістерезису.** Перед кожним проведенням вимірів проводиться обов'язкове калібрування осцилографа.

На рис. 3 приведена осцилограма каліброваної напруги прямокутної форми.

На рис. 4 наведено осцилограму – залежність заряду (поляризації) від напруги (напруженості електричного поля) для конденсатора K75 з лінійним діелектриком: залежність між поляризованістю і напруженістю електричного поля – лінійна (верхня частина екрану монітора ноутбука). Підтвердженням лінійності застосовуваних діелектриків в конденсаторах є ідентичність часових залежностей між поляризацією і напруженістю електричного поля (показання каналу 1 і каналу 2) відповідно.

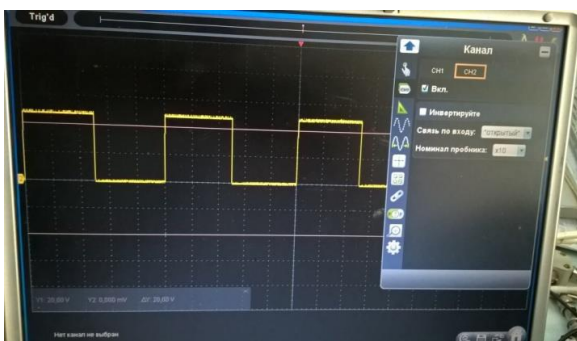


Рис. 3 – Калібрувальний сигнал



Рис. 4 – Типова залежність між поляризацією та напруженістю електричного поля для конденсатора з лінійним діелектриком

При підключенні зразка конденсатора з активним діелектриком (сегнетоелектриком) проявляється нелінійна залежність між поляризацією і напруженістю електричного поля (відставання вектору поляризації від прикладеної напруги, що обумовлено доменною структурою матеріалу конденсатора) (рис. 5).

При збільшенні прикладеної напруги (рис. 6) спостерігається зміна залежності заряду (поляризації) (дивись рис. 7). При деякому значенні напруженості електричного поля всі домени будуть поляризовані в напрямку поля, і поляризація матиме значення насичення. Подальше збільшення поля призведе до лінійного росту поляризації за рахунок індукованої поляризації (індукована поляризація – поляризація, яка виникає завдяки зрушенню іонів відносно один одного, деформації електронних оболонок окремих атомів, молекул, іонів і таке інше).



Рис. 5 – Типова залежність між поляризацією і напруженістю електричного поля для конденсатора з активним діелектриком



Рис. 6 – Показання вольтметра джерела постійної напруги

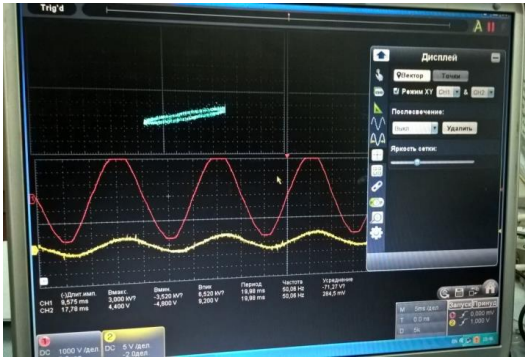


Рис. 7 – Характер петлі діелектричного гістерезису при збільшенні прикладеної напруги до конденсатора з активним діелектриком

На рис. 8 приведені осцилограми для зразка конденсатора з активним діелектриком, структура і властивості якого відрізняються від попереднього: петля діелектричного гістерезису має трапецієдальну форму.



Рис. 8 – Трапецієдальна форма петлі діелектричного гістерезису зразка конденсатора з активним діелектриком

За допомогою перемикача вибирається паралельна схема заміщення при вимірюванні ємності і тангенса кута діелектричних втрат. Значення результатів вимірювань ємності за паралельної  $C_p$  і послідовної  $C_s$  схемами заміщення може істотно відрізнятися для конденсаторів з діелектриками, втрати в яких значні [11]:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \text{tg}^2 \delta^2} \quad (6)$$

На рис. 9 – рис. 11 приведені частотні залежності ємності, тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів, що виміряні при температурі 25 °С. Криві 1 – 3 відповідають зразкам конденсаторів з

активним діелектриком, крива 4 – конденсатору КБГ–0,25 мкФ з паперовим діелектриком.

Порівняння частотних залежностей ємності зразків показує, що для зразка під номером 1 з активним діелектриком найбільшою мірою виражена частотна залежність. Для конденсатора з паперовим діелектриком ємність не змінюється в достатньо широкому діапазоні частот (крива 4).

Для зразків конденсаторів з активним діелектриком характерні більш високі значення тангенса кута діелектричних втрат в порівнянні з лінійним діелектриком (порівняй, наприклад, криві 1 і 4): відмінність більш ніж в 10 і 100 разів в залежності від частоти.

**Висновки.** Розроблено стенд для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації осцилографічним методом та визначенням діелектричних втрат в зразках конденсаторів з пасивним та активним діелектриком.

Стенд включає джерело змінного струму В-24, цифровий двоканальний осцилограф VDS з програмним забезпеченням, ноутбук, професійний портативний вимірювач ємності і тангенса кута діелектричних втрат.

Виконано тестування стенду з обов'язковим калібруванням осцилографу для підвищення точності спостереження петлі діелектричного гістерезису.

Отримано осцилограми напруженості електричного поля, поляризації та петлі діелектричного гістерезису для зразків конденсаторів з активним діелектриком. Показано, що залежності суттєво відрізняються для різних матеріалів, що застосовуються в якості діелектрика конденсатора.

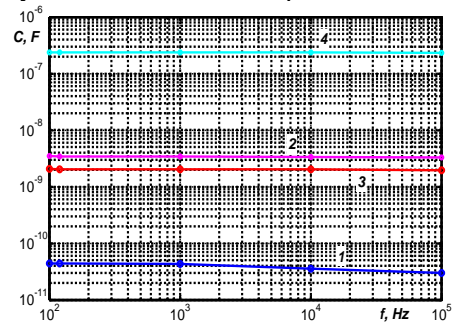


Рис. 9 – Частотні залежності ємності зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

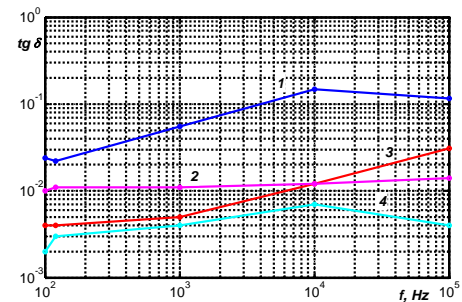


Рис. 10 – Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

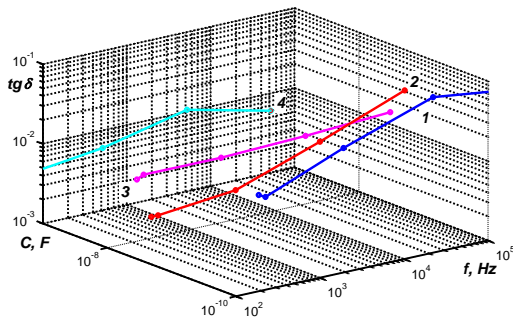


Рис. 11 –  $C - tg\delta$  діаграма частотної залежності тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

Виконанні дослідження частотних залежностей ємності конденсаторів доводять, що для зразка конденсатора з паперовим діелектриком ємність (діелектрична проникність) не змінюється в діапазоні частот 100 Гц – 100 кГц. Для зразків конденсаторів з активним діелектриком в більшій мірі спостерігається залежність ємності (діелектричної проникності) в указаному діапазоні частот в залежності від діелектрика конденсатора.

На основі аналізу частотної залежності тангенсу кута діелектричних втрат зразків конденсаторів встановлено, що діелектричні втрати в конденсаторах з активним діелектриком більше ніж в 10 разів вище, ніж в конденсаторі з паперовим діелектриком, який є пасивним полярним матеріалом. Так, на частоті 10 кГц тангенс кута діелектричних втрат становить 15% і 0,6% для конденсаторів з активним та пасивним діелектриком відповідно.

#### Список літератури

1. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики (основные свойства и применение в электронике). – М.: Радио и связь, 1989. 288с.
2. Физика активных диэлектриков: учебное пособие / под ред. Сахненко В.П. / Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Раевский И.П. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 480 с.
3. Электреты / Под ред. Сеслерра Г. – М.: Мир. – 1983. – 487 с.

4. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981.

5. Лучицкий Р. М., Галушак М. О. Физика твердого тела: Навч. посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 250 с.

6. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // Техническая электродинамика. – Київ, 2010. – № 6. – С. 23 – 29.

7. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Издательство иностранной литературы: Ред. литературы по вопросам техники, 1960. – 439 с.

8. Сканави Г. И. Физика диэлектриков, область слабых полей. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. – 500 с.

9. Сканави Г. И. Физика диэлектриков, область сильных полей. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.

10. Беспрозванных Г.В., Гаврилюк І.Ю. Стенд для дослідження властивостей активних діелектриків // Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції. – 2019, Ч. II. с.134.

11. Беспрозванных А. В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А. В. Беспрозванных, Б. Г. Набока // Навчальний посібник. – Харків, НТУ «ХП». – 2012. – 108 с.

#### References (transliterated)

1. Res I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics (basic properties and applications in electronics). - M.: Radio and communication, 1989. 288p.
2. Physics of active dielectrics: a textbook / ed. Sakhnenko VP / Poplavko Yu.M., Pereverzev L.P., Raevsky IP - Rostov N / A: Publishing House of the SFU, 2009. – 480 p.
3. Electrets / Ed. Cesslerra G. – M.: The World. - 1983. - 487 p.
4. Lines M., Glass A. Ferroelectrics and Related Materials. - M.: Mir, 1981.
5. Luchitsky R.M., Galushchak M.O. Solid state physics: Nauch. manual. – Ivano-Frankivsk: Torch, 2008. - 250 p.
6. Besprozvannykh A.V. Strong electric field and partial discharges in multicore cables // Technical electrodynamic. - Kiev, 2010. – no 6. – pp. 23 - 29.
7. Hippel A.R. Dielectrics and waves. – M.: Publishers of Foreign Literature: Ed. Literature on Engineering, 1960. – 439 p.
8. Skanavi G.I. Physics of dielectrics, the field of weak fields. - M.; L.: GITTL, 1949. – 500 p.
9. Skanavi G.I. Physics of dielectrics, the field of strong fields. - M.: GIFML, 1958. – 907 p.
10. Besprozvannykh G.V., Gavriluk I.Yu. A stand for the study of the properties of active dielectrics // Abstracts of the XXVIII International Scientific-Practical Conference. – 2019, N. II. p.134.
11. Besprozvannykh G.V. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyatsionnykh konstruksiy/ G.V.Besprozvannykh, B.G.Naboka // Navchal'nyy posibnik. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2012. – 108 p.

Надійшло (received) 28.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Безпрозваних Ганна Вікторівна (Безпрозванных Анна Викторовна, Ganna Bezprozvannych)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, тел. (057) 707 – 60-10; e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua.

**Кессаєв Олександр Геннадійович (Кессаев Александр Геннадьевич, Olexandr Kiessaiev)** – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри теоретичних основ електротехніки, тел. (057) 707 – 69-61; e-mail: akess@ukr.net

**Гаврилюк Ігор Юрійович (Гаврилюк Игорь Юрьевич, Igor Havrylyuk)** – магістр за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. (057) 707 – 60-10;.

*В. М. БЕЗРУЧКО, Р. О. БУЙНИЙ, В. І. ТКАЧ*

## **ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖАХ 6-35 кВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ SMART GRID В УКРАЇНІ**

Виникнення однофазних замикань на землю в електричних мережах напругою 6-35кВ, що працюють з ізольованою нейтраллю, призводять до утворення ненормального режиму роботи. У такому режимі підвищується ймовірність утворення міжфазного короткого замикання та знееструмлення споживачів. Тому час визначення місця однофазного замикання на землю та його усунення важливо звести до мінімуму. Для цього пропонується використовувати запропонований пристрій, що має розміщуватися на кожній опорі повітряної лінії та передавати координати опори повітряної лінії, де виникає замикання на землю, в диспетчерський центр через GSM-мережу стільникового зв'язку. Запропонований пристрій не містить акумуляторного джерела живлення, а живиться лише від струму замикання та не працює без наявності замикання на землю, що обумовлює його високу надійність. Описана його спрощена конструкція та принцип дії, надані рекомендації по реалізації пристрою. Розглянута можливість інтеграції такого пристрою у існуючі інформаційно-керуючі системи автоматизації, що вже використовуються або впроваджуються в мережах обленерго України. Як правило у майже всіх обленерго впроваджено та використовуються автономно одна від іншої, такі системи автоматичного управління мережами, як SCADA-система та GIS-система. Рекомендовано надавати інформацію від пристрою до обидві зазначені системи: в SCADA-систему для архівації даних у журналі подій, а до GIS-системи для підвищення зручності при координації дій під час усуненні пошкоджень. Розглянуто обладнання, яке потрібно використовувати для інтеграції запропонованого пристрою до вищезазначених систем та надано рекомендації з їх доопрацювання для підвищення зручності використання отриманої інформації оперативним персоналом. Проаналізовані заходи по кіберзахисту такої системи від стороннього впливу через публічність GSM-мережі. Проаналізована робота експлуатаційного персоналу по усуненню замикань на землю при отриманні інформації від пристрою. Показано, що при встановленні запропонованого пристрою показники надійності електропостачання SAIDI, SAIFI та ENS вдасться покращити: SAIDI з 1,2 до 0,95 год/(рік-відкл); SAIFI з 0,015 до 0,0075 разів/(рік-км); ENS 46,3 до 26,3 МВт-год/рік.

**Ключові слова:** електричні мережі 6-35кВ, електричні мережі з ізольованою нейтраллю, однофазні замикання на землю, пошук місця замикання, SCADA-система, GIS-система

*В. М. БЕЗРУЧКО, Р. О. БУЙНИЙ, В. И. ТКАЧ*

## **ІННОВАЦІЙНИЙ ПОДХІД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТА ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35кВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID В УКРАИНЕ**

Возникновение однофазных замыканий на землю в электрических сетях напряжением 6-35кВ, работающих с изолированной нейтралью, приводит к ненормальному режиму работы сети. В таком режиме повышается вероятность образования межфазного короткого замыкания и обесточивания потребителей. Поэтому время определения места однофазного замыкания на землю и его устранение важно свести к минимуму. Для этого предлагается использовать инновационное устройство, которое должно находиться на каждой опоре воздушной линии и передавать координаты опоры воздушной линии, где возникает замыкание на землю в диспетчерский центр через GSM-сеть сотовой связи. Предлагаемое устройство не содержит аккумуляторного источника питания, питается от тока замыкания и не работает без наличия замыкания на землю, что обуславливает его высокую надежность. Описана его упрощенная конструкция и принцип действия, даны рекомендации по реализации устройства. Рассмотрена возможность интеграции такого устройства в существующие информационно-управляющие системы автоматизации, которые уже используются или внедряются в сетях обленерго Украины. Как правило во многих обленерго используются или уже внедряются такие системы автоматического управления сетями, как SCADA-система и GIS-система. Хотя системы работают изолированно друг от друга, рекомендуется передавать информацию от устройства в обе указанные системы: в SCADA-систему – для архивации данных в журнале событий, а в GIS-систему – для повышения удобства при координации действий во время устранения повреждений. Рассмотрено оборудование, которое должно использоваться для интеграции предлагаемого устройства в вышеупомянутых системах и даны рекомендации по их доработке для повышения удобства использования информации оперативным персоналом. Проанализированы меры по защите от киберугроз такой системы от постороннего влияния через публичную GSM-сеть. Проанализирована работа эксплуатационного персонала по устранению замыканий на землю при получении информации от устройства. Показано, что при установке предлагаемого устройства показатели надежности электроснабжения SAIDI, SAIFI и ENS удастся улучшить: SAIDI с 1,2 до 0,95 ч / (год-откл) SAIFI с 0,015 до 0,0075 раз / (год-км) ENS 46,3 до 26,3 МВт-ч / год.

**Ключевые слова:** электрические сети 6-35кВ, электрические сети с изолированной нейтралью, однофазные замыкания на землю, поиск места замыкания, SCADA-система, GIS-система

*V. M. BEZRUCHKO, R. O. BUINYI, V. I. TKACH*

## **INNOVATIVE APPROACH TO DETERMINING LOCATION OF THE SINGLE-PHASE-TO-EARTH FAULTS IN 6-35KV POWER NETWORKS AT THE IMPLEMENTATION OF THE SMART GRID CONCEPT IN UKRAINE**

When a single-phase-to-earth fault takes place in 6-35kV electrical networks that operate with insulated neutral, the network switches to an abnormal mode of operation. In this mode, the probability of a phase-to-phase fault through ground and a blackout of consumers is increased. Therefore, it is important to minimize the time to find the location of a single-phase-to-earth fault and repair this fault. For this, it is proposed to use a new device, which should be on each support of the overhead line. This device transmits the coordinates of the overhead line support, where a single-phase-to-earth fault takes a place, to the control center using a GSM cellular network. The proposed device is powered by a fault current, does not contain a battery and does not work without a single-phase-to-earth fault on this support, which makes it highly reliable. Its simplified design and principle of operation are described and recommendations for the implementation of the device are given. The possibility of integrating such a device into existing information control systems that are already used or implemented in the networks of regional power companies of Ukraine is considered. As a rule, in many regional

power companies used (or are being introduced) such automatic network control systems like SCADA-system and GIS-system, which autonomous from each other. It is recommended to provide information from the device to both of these systems. Into the SCADA system for archiving data in the event log and into the GIS-system to improve convenience in coordinating actions during the repair of fault. The equipment that should be used to integrate the proposed device in the above systems is considered. Recommendations for existing systems to improve the usability of information by operational personnel are given. Analyzed are steps to protect against cyber threats of such a system from extraneous influence through a public GSM network. The work of the operating staff to eliminate fault when receiving information from the device is analyzed. It is shown that when installing the proposed device, the reliability indicators of power supply SAIDI, SAIFI and ENS can be improved: SAIDI from 1.2 to 0.95 h / (year-off) SAIFI from 0.015 to 0.0075 times / (year-km) ENS 46.3 to 26.3 MWh / year.

**Key words:** middle-voltage power networks, power networks with insulated neutral, single-phase-to-earth faults, search for a fault location, SCADA-system, GIS

**Вступ.** В Україні електричні мережі середньої напруги (6-10 кВ) працюють в режимі ізольованої нейтралі. Це дозволяє забезпечити високу надійність електропостачання за рахунок того, що мережа може працювати навіть з однофазним замиканням на землю (ОЗЗ).

Однак, коли мережа працює з ОЗЗ, величина фазної напруги на двох непошкоджених фазах може зрости до лінійного значення. Збільшення напруги на штирьовій ізоляції збільшує ймовірність утворення міжфазного короткого замикання, а, як наслідок, призведе до відключення споживачів [1,2]. Якщо повторне включення не буде успішним, багато споживачів залишаться без електропостачання до тих пір, поки оперативно-виїзна бригада (ОВБ) не усуне пошкодження на повітряній лінії (ПЛ). Для зменшення зони знеструмлення можна застосовувати секціонування електричної мережі комутаційними пристроями, що дозволить покращити показники надійності електропостачання SAIDI, SAIFI та ENS [3]. Також покращити показники надійності можна за рахунок зменшення тривалості визначення місця ОЗЗ в мережі та зменшення тривалості його усунення.

**Існуючі методи розв'язання задачі.** В даний час в Україні застосовують декілька способів пошуку місць ОЗЗ. Найбільшого поширення здобув метод пошуку, заснований на аналізі електромагнітного поля вздовж траси повітряної лінії. Однак, якщо лінія електропередавання протяжна та складнорозгалужена, ОВБ може витратити значний час на пошук місця замикання.

Для прискорення пошуку місць ОЗЗ електропостачальними компаніями поряд із «традиційними» пристроями («Поиск», «Спектр», «Зонд», «Волна», «Квант») використовуються сучасні:

- «індикатор короткого замикання» [4]. Такий пристрій встановлюється на кожному відгалуженні ПЛ та дозволяє фіксувати лише факт наявності короткого замикання на відгалуженні, а також ОЗЗ, у випадку його переведення у міжфазне замикання, закорочуванням непошкодженої фази, що лише звужує зону пошуку до виявленого відгалуження та призводить до протікання великих струмів короткого замикання через електрообладнання електричних мереж. Даний пристрій живиться від акумулятора, який також потребує обслуговування;

- «фіксатор короткого замикання» [5]. Такі пристрої встановлюються на відгалужувальних опорах ПЛ і працюють так само, як і попередні. Вони мають схожий принцип дії та аналогічні недоліки. Їх відмінністю є те, що вони живляться від фотоелектричних модулів, а також у своїй конструкції

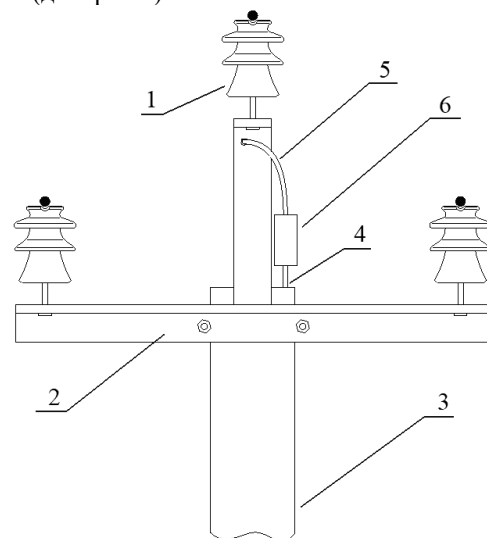
мають акумулятор, який також потребує обслуговування;

- «комплект ІКЗ-33У» [6]. Такий пристрій складається з трьох індикаторів короткого замикання, що розміщуються на проводах ПЛ. Вони живляться від акумуляторів та встановлюється на кожному відгалуженні ПЛ, та мають вищезазначені недоліки.

Усі вищеперераховані пристрої дозволяють лише звужити зону пошуку до певного відгалуження від основної магістралі ПЛ. Після цього місце пошкодження визначається «традиційними» способами, коли ОВБ виконує обхід ПЛ з візуальним оглядом.

**Мета роботи.** Огляд запропонованого авторами інноваційного способу виявлення місця ОЗЗ, яке утворюється через пробій штирьової ізоляції на опорі ПЛ 6-10кВ та його інтеграція у існуючі системи автоматичного управління мережами.

**Виклад основного матеріалу.** Авторами запропоновано пристрій, який встановлюється на металевих заземлюючих спусках кожної опори ПЛ 6-10 кВ (див. рис.1).



1 - штирьовий ізолятор, 2 - траверса,  
3 - залізобетонна стійка опори ПЛ,  
4 - арматура заземлення, 5 - сталевий стрижень,  
6 - запропонований пристрій, герметизований компаундом

Рисунок 1 – Опора ПЛ електропередавання із запропонованим пристроєм

У нормальному режимі роботи електричної мережі струм ОЗЗ через опору ПЛ відсутній, тому запропонований пристрій не має живлення, що підвищує його конструктивну надійність, яка також має забезпечуватися герметизацією пристрою компаундом для забезпечення вологостійкості.



У [7] показано, що понад 47% ОЗЗ відбувається через штифтовий ізолятор, тому таке розміщення ідентифікатора дозволить відстежувати більшість пошкоджень.

На рис. 2 зображено підключення пристрою до арматури заземлення опори ПЛ.

Пристрій має трансформатор струму на своєму вході, через який і передбачається живлення пристрою під час ОЗЗ. Трансформатор струму виконується на тороїдальному осерді, первинною обмоткою якого є стрижень заземлення, вторинна обмотка підключається до блоку живлення пристрою. Така схема підключення пристрою не змінює систему заземлення опори.

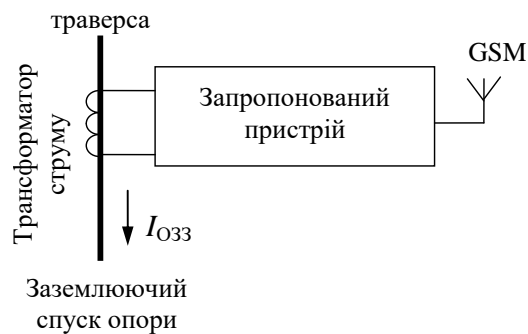


Рисунок 2 – Схема приєднання пристрою

У разі виникнення ОЗЗ через штифтову ізоляцію на одній з опор ПЛ струм замикання протікає через ізолятор, траверсу та заземлюючий спуск опори в землю. Як правило, значення цього струму для діючих в Україні електричних мереж 6-10 кВ знаходиться в межах від 0,5 до 20 Ампер. Цей струм протікаючи через трансформатор струму запропонованого пристрою живить вбудований накопичувач енергії. Накопивши достатню кількість енергії, запропонований пристрій відправляє повідомлення про пошкодження в диспетчерський центр управління. Повідомлення надсилається через канал стільникового зв'язку GSM-мережі.

Слід зазначити, що повідомлення надсилається не в той утворення ОЗЗ, а тільки після накопичення достатньої енергії у акумулюючому елементі пристрою. Це може зайняти кілька хвилин. Час накопичення залежить від значення струму ОЗЗ.

Детальну інформацію про принцип дії, побудову, специфіку використовуваних та розрахунки можна знайти у статті [8].

Прототип запропонованого пристрою був побудований і його випробували в лабораторії та на існуючій лінії електропередавання АТ «Чернігівобленерго». Зовнішній вигляд прототипу пристрою показано на рис. 3. Цей пристрій був запатентований [9].

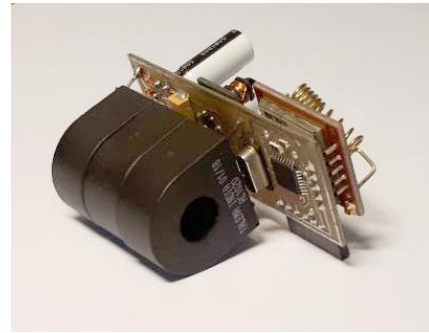


Рисунок 3 – Прототип запропонованого пристрою

Створений прототип пристрою показав, що він може акумулювати енергію та відправляти повідомлення про пошкодження на диспетчерський пункт за 5-10 хвилин за струму ОЗЗ понад 2А. Зі збільшенням струму ОЗЗ час ідентифікації пошкодження зменшується.

Для визначення зони чутливості пристрою слід визначити значення струму ОЗЗ через штифтову ізоляцію в електричній мережі 6-10 кВ. Струм ОЗЗ можна обчислити за формулою, отриманою методом еквівалентного генератора:

$$I_{OЗЗ} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + \left( \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_{ПЛ}} \right)^2}}, \quad (1)$$

де  $U_{Л}$  – діюче значення номінальної лінійної напруги ліній електропередачі;  $R$  – опір в місці пробію ізоляції;  $\omega$  – кутова частота;  $C_{ПЛ}$  – сумарна ємність електрично зв'язаних ПЛ, що включені від однієї секції шини центру живлення.

З наведеної формули видно, що найбільше значення струму ОЗЗ  $I_{OЗЗ}$  буде при  $R = 0$ . Однак, як правило, всі пробію через ізолятор ПЛ 6-10кВ мають певний опір. На рис. 4 показано, як змінюється струм ОЗЗ в місці пошкодження, коли опір змінюється від нуля до високих значень.

Запропонований пристрій може виявити місце ОЗЗ, але він матиме певну зону низької чутливості (ця зона показана на рис. 4). Якщо струм ОЗЗ малий, час виявлення ОЗЗ буде довгим.

Слід зазначити, що ОЗЗ в мережі з ізолюваною нейтраллю можуть носити нестійкий характер. У випадку достатньо тривалого пошуку ОЗЗ «традиційними» способами пошкодження може самоусунутися, а потім виникнути повторно через деякий час, що, як правило, призводить до затягування тривалості пошуку та збільшення витрат часу та ресурсів ОВБ.

Запропонований авторами ідентифікатор дозволяє виявити вищезазначені несправності, але для цього може бути витрачений невизначений час, особливо при замиканні з великим перехідним опором. Як видно з рис. 4, зона низької чутливості починається за  $R > 11,5$  кОм.

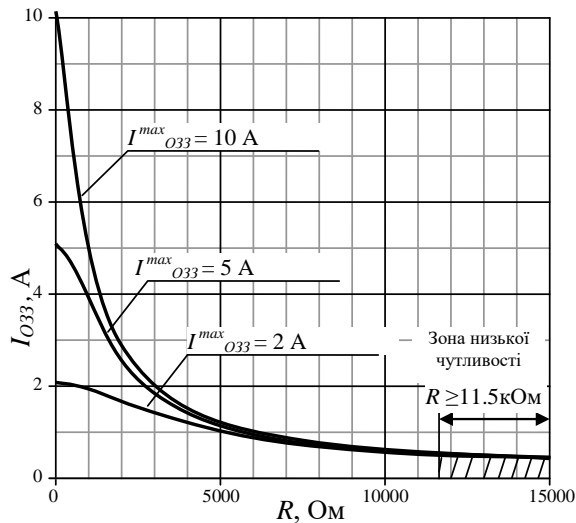


Рисунок 4 – Залежність струму відмови від опору несправності

В даний час у більшості операторів систем розподілу в Україні знаходяться в експлуатації інформаційно-керуючі системи управління технологічними процесами. Зокрема в АТ «Чернігівобленерго» на сьогодні існує кілька ізольованих одна від одної систем:

- автоматизована система комерційного обліку електроенергії. Ця система використовується лише для комерційного обліку енергії;

- SCADA-система, яка використовується для контролю стану енергомережі та відповідних вимірювань, а також для виконання необхідних комутаційних дій, сигналізації, тощо. SCADA-система складається з трьох рівнів. Перший рівень – це рівень станцій та ліній електропередавання, де розташоване обладнання для контролю та вимірювання. Другий рівень – це рівень місцевого центру управління. Тут розміщені пульт управління (диспетчерська району електричних мереж) та локальний сервер, до якого підключені інформаційні лінії з обладнання підстанцій та ліній електропередавання. Третій рівень – це рівень основного центру управління (диспетчерська області), до якого підключено багато інформаційних ліній з місцевих центрів. Усі центри управління використовують програмне забезпечення MicroSCADA Pro від компанії ABB. Аналогічна структура SCADA-системи є характерною для більшості обленерго в Україні;

- ГІС-система – геоінформаційна комп'ютерна система для збору, зберігання, перевірки та відображення даних, пов'язаних з положеннями електромережних об'єктів на поверхні Землі з прив'язкою до їх координат. У Чернігівській області майже всі ПЛ 6-10кВ зі своїми підстанціями 10(6)/0,4кВ вже додано до бази даних ГІС з її координатами та розташуванням на лініях. Ця система використовується для швидкої координації операцій під час експлуатації електромереж.

Авторами пропонується інтеграція ідентифікатора ОЗЗ до основних інформаційно-керуючих систем АТ «Чернігівобленерго». Інформація

від ідентифікатора ОЗЗ повинна надходити на сервер SCADA-системи другого рівня, де розміщене обладнання місцевого центру управління, який знаходиться в районі, оскільки саме районні служби займаються експлуатацією мереж. Надалі інформація про пошкодження може, за необхідністю, передаватися на верхній рівень.

Для підключення ідентифікатора ОЗЗ до існуючих інформаційно-керуючих систем слід використовувати наступне обладнання GSM-модем, підключений до програмованого логічного контролера (ПЛК). Запропонована схема показана на рис. 5.

Повідомлення, яке запропонований пристрій надсилає серверу, складається з унікального коду для пристрою. Цей код повинен знаходитися в базі даних і мати еквівалентну опору на лінії електропередач. Коли цей код надходить на сервер центру управління, відбувається дешифрація, де саме сталося ОЗЗ. Після цього дані можуть бути надіслані на основний сервер SCADA-системи, де вони будуть зберігатися у журналі подій.

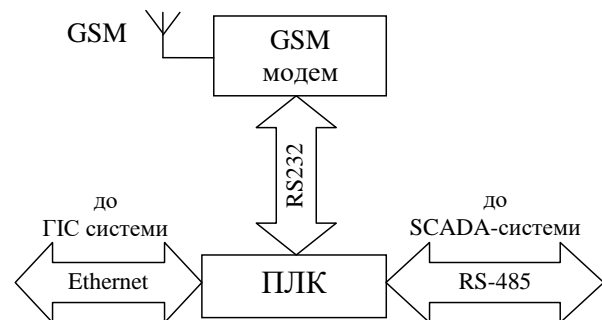


Рисунок 5 – Схема інтеграції пристрою в існуючі системи

Дані також мають надходити до ГІС. Ця система може бути використана для візуального представлення даних про ОЗЗ та його місце знаходження. Експлуатаційний персонал може використовувати його для навігації під час виїзду на ремонтні роботи.

Після спрацювання сигналізації про ОЗЗ на підстанції за «традиційного» пошуку місця пошкодження диспетчер електромереж визначає пошкоджену лінію та фазу на ній та оформлює усі необхідні допуски ОВБ на пошук пошкодження. ОВБ має «пройти» вздовж ПЛ та знайти пошкодження. При цьому ГІС використовується лише для навігації по місцевості, побудови маршруту для бригади, аналізу під'їзних шляхів тощо.

Якщо запропоновані пристрої будуть встановлені в мережі, процес усунення ОЗЗ передбачається наступний. Диспетчер оформлює усі необхідні допуски ОВБ на пошук пошкодження. За цей час, що займає не менше 10 хвилин, повідомлення від ідентифікатора надійде до ГІС-системи, на якій буде вказане точне місце пошкодження, з точністю до опори. Отримана від ГІС інформація дозволить ОВБ суттєво скоротити час пошуку та оперативно усунути пошкодження.

На рис. 6 показана частина плану смт. Ріпки з існуючої ГІС-системи з трасою ПЛ 10 кВ з усіма опорами та прикладом повідомлення про ОЗЗ на опорі №53 від запропонованого авторами ідентифікатора.

Як видно, опора з ОЗЗ позначена червоним кольором, а в інформаційному вікні наведено унікальний код пристрою, номер опори та диспетчерське найменування лінії.

В результаті запропонований пристрій підвищить надійність електропостачання та покращить показники SAIDI, SAIFI та ENS, які згідно з [10] можуть бути розраховані за формулами:

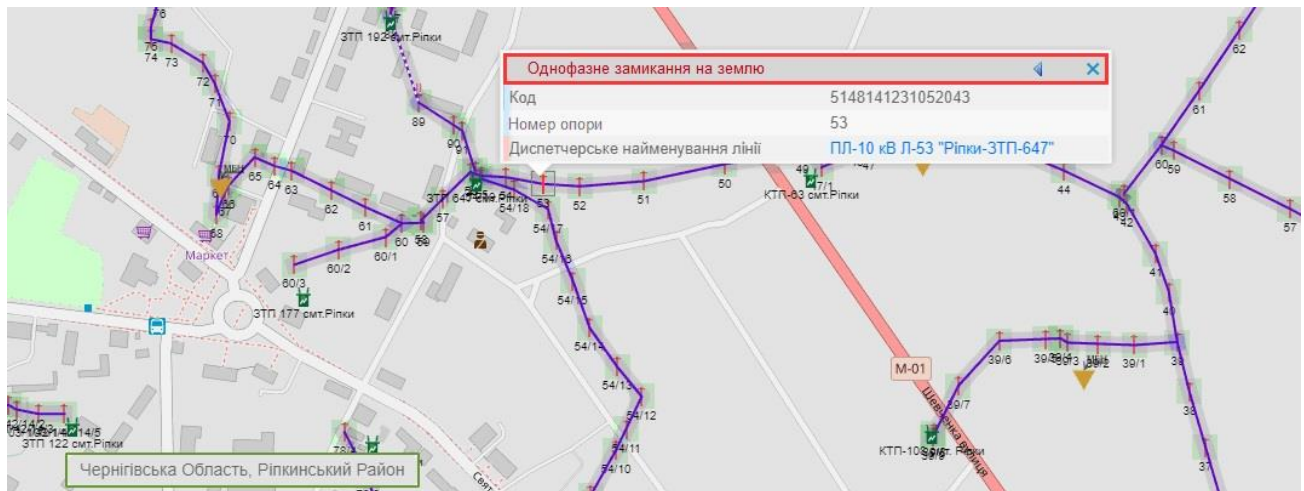


Рисунок 6 – Скріншот із системи ГІС із прикладом повідомлення про несправність

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n}; \quad (2)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}; \quad (3)$$

$$ENS = \sum_{i=1}^k P_i \cdot t_i, \quad (4)$$

де  $t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні;  $n_i$  – кількість точок продажу електроенергії у результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні;  $n$  – загальна кількість точок продажу електроенергії;  $k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;  $P_i$  – середнє навантаження, яке було відключене внаслідок  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні.

Так, згідно з [7], по компанії АТ «Чернігівобленерго»:

– величина  $SAIDI$ , викликана тільки ОЗЗ, складає біля 1,2 год/(рік-відкл);

– величина  $SAIFI$  із-за ОЗЗ знаходиться в діапазоні 0,015 разів/(рік-км), з яких 46,8% припадає на пошкодження штирєвої ізоляції ПЛ 6-10кВ.

– величина  $ENS$  із-за пошкодження штирєвої ізоляції ПЛ 6-10кВ складає 21,263 МВт-год/рік, або 45,9% від загального недовідпуску електроенергії, який викликаний короткими замиканнями, які викликані переходом ОЗЗ у міжфазні замикання.

У випадку масового запровадження запропонованого авторами пристрою у розподільні мережі 6-10 кВ АТ «Чернігівобленерго» слід очікувати

поліпшення показників надійності із за пошкоджень, викликаних ОЗЗ:

– величина  $SAIDI$  може бути зменшена до 0,95 год/(рік-відкл);

– величина  $SAIFI$  – до 0,0074 разів/(рік-км);

– величина очікуваного недовідпуску електроенергії  $EENS$  – до 29,326 МВт-год/рік.

Оскільки запропонований варіант інтеграції пристрою для ідентифікації ОЗЗ у інформаційно-керуючу систему використовує публічну GSM-мережу стільникового зв'язку, яка вразлива до зовнішнього несанкціонованого втручання, то це потребує додаткових захисних заходів. Автори рекомендують обов'язковий наступний захід – всі запропоновані пристрої повинні мати унікальне VPN-з'єднання з обладнанням районного диспетчерського центру, яке є шифрованим.

**Висновки.** Запропоновано пристрій для визначення розташування ОЗЗ в розподільних електромережах 6-10кВ, що базується на інноваційному підході та дозволяє ідентифікувати пошкодження навіть у випадку замикання через перехідний опір до 11,5кОм.

Запропоновано шляхи інтеграції даного пристрою до існуючих SCADA та GIS-систем обленерго, що дозволить не тільки архівувати дані у журналі подій, але і підвищити зручність при координації дій персоналу під час усуненні пошкоджень. Це дозволить знизити час усунення пошкоджень до мінімально можливого.

Результатом впровадження запропонованого пристрою стане поліпшення показників надійності електропостачання споживачів SAIDI, SAIFI та ENS.

#### Список літератури

1. Bayliss C.R., Hardy B.J. Transmission and Distribution Electrical Engineering. – Third Edition. – Elsevier Ltd, 2007. – 1040p.

2. Das D. Electrical Power Systems. – New Age International Publishers, 2006. –484p.
3. Буйний Р.О., Діхтярук І.В., Зорін В.В. Автоматичне секціонування розподільних електричних мереж напругою 6–10кВ із застосуванням роз'єднувачів нового покоління // Технічна електродинаміка. – 2014. – №3. – С.70-75.
4. Кучерявенков А.А., Карпашев А.С. Устройство для определения местоположения и вида повреждений воздушной линии электропередач. Патент России на полезную модель №126144, 2013.
5. Пат. № 64352 А України, МКИ 7 0011131/08, Фіксатор короткого замикання. М.М. Черемісін, В.М. Зубко, В.О. Коробка, Г.А. Сідоров, А.А.Пироженко №2003054513; Заявлено 20.05.2003; Опубл. 16.02.2004, Бюл. №2.
6. A3 Group, “Kit of faulted circuit indicators,” OHL Fault Indicators Lodestar CL25. [Online]. URL: <https://www.a3.energy/products-bottom/ohl-fault-locator/lodestar-cl25-detail>. (дата звернення:10.11.2019)
7. Ткач, В.І. Вплив однофазних замикань на землю на експлуатаційні показники надійності повітряних ліній 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» / В. І. Ткач, В. М. Безручко, Р. О. Буйний // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2019. – № 1. – С. 120-126. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14
8. Безручко В.М., Буйний Р.О., Строгий А.Ю., Ткач В.І. Використання GSM технології при ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю зі штирьовою ізоляцією. Технічна електродинаміка. 2018. № 5. С. 96-99. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.096>
9. Безручко В.М., Буйний Р.О., Строгий А.Ю., Ткач В.І. Пристрій для ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, заявка на патент України № 2018 03974.
10. Billinton, R. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation / R. Billinton, P. Wang // Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings. – 1998. – Vol. 145. – pp. 149-153. – doi: 10.1049/ip-gtd:19981828.

## References (transliterated)

1. Bayliss, C.R., Hardy, B.J. Transmission and Distribution Electrical Engineering. Third Edition. Elsevier Ltd, 2007, 1040p.
2. Das, D. Electrical Power Systems. New Age International Publishers, 2006, 484p.
3. R. Buinyi, I. Dikhtyaruk, V. Zorin, “The automatic sectionalization of the distributing networks with high voltage of 6 10 kV with application the disconnectors of new generation,” Tekhnichna elektrodynamika, Issue 3, pp.70-75, 2014.
4. A.A. Kucheryavenkov, A.S. Karpashev, “Device for determining the location and type of damage to the overhead power line,” Russia Patent for utility model №126144, 2013.
5. M.M. Cheremisin, V.M. Zubko, V.O. Korobka, H.A. Sidorov, A.A. Pyrozhenko, “Short-circuit lock,” Ukraine Patent №64352 A, 2004.
6. A3 Group, “Kit of faulted circuit indicators,” OHL Fault Indicators Lodestar CL25. [Online]. Available: URL: <https://www.a3.energy/products-bottom/ohl-fault-locator/lodestar-cl25-detail> (Accessed: Dec. 10, 2018).
7. Tkach, V., Bezruchko, V., Buinyi, R. The effect of single-phase-to-ground faults on the operational reliability indicators of overhead lines 6-10 kV PJSC «Chernigivoblenreg». Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 120-126, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14.
8. V.M. Bezruchko, R.O. Buinyi, A.Y. Strogii, V.I. Tkach, “Application of GSM technology for identification of phase-to-ground faults in electric networks with isolated neutral and pin-type isolation,” Tekhnichna elektrodynamika, Issue 5, pp.96-99, 2018.
9. V.M. Bezruchko, R.O. Buinyi, A.Y. Strogii, V.I. Tkach, “Device for identification of signal phase-to-ground faults in electric networks with isolated neutral,” Ukraine Patent application № a 2018 03974.
10. Billinton, R., Wang, P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings, 1998, 145, 149-153, doi: 10.1049/ip-gtd:19981828.

Надійшла (received) 15.10.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Безручко Вячеслав Михайлович (Bezruchko Vyacheslav Mihailovich)** – кандидат технічних наук, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж, м. Чернігів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3705-8543> ; e-mail: [slavajm@meta.ua](mailto:slavajm@meta.ua)

**Буйний Роман Олександрович (Buinyi Roman Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж, м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0002-5432-2924; e-mail: [buinyiroman@gmail.com](mailto:buinyiroman@gmail.com)

**Ткач Володимир Іванович (Tkach Volodymyr Ivanovich)** – АТ «Чернігівобленерго», інженер відділу перспективного розвитку, м. Чернігів, Україна; e-mail: [v.tkach1972@gmail.com](mailto:v.tkach1972@gmail.com)

**И. И. БОРЗЕНКОВ, Д. А. ДАНИЛЬЧЕНКО, И. Л. ЛЕБЕДИНСКИЙ, В. Р. ОБУХОВ,  
О. В. СОБЧЕНКО, С. Ю. ШЕВЧЕНКО**

## **ОБЗОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Изоляторы воздушных линий электропередач играют важную роль в обеспечении транзита электрической энергии к потребителям. Правильный выбор и грамотный подход к диагностике и контролю электрических параметров изоляционных конструкций воздушных линий электропередач это залог эффективной и безаварийной работе сети. В данной статье проанализированы работы зарубежных авторов [1, 2] по методу косвенного измерения длины пути утечки в изоляторах воздушных линий электропередач, а также разработанного алгоритма по диагностике распределения напряжения и сопротивления гирлянд изоляторов, в средах с высоким уровнем загрязнения атмосферы, для дальнейшего обнаружения неисправных изоляторов. В работе рассмотрены методы диагностики изоляционных конструкций воздушных линий электропередач. Данные методы направлены на обеспечение повышения эффективного использования линий электропередач. Применяя метод оценки состояния изоляции согласно [2], можно на ранних стадиях развития дефекта изоляции предотвратить аварийное отключение линий электропередач. Полученные коллегами их Китая результаты измерений распределения напряжения по длине гирлянды изоляторов, вызывают интерес, поскольку все исследования подобных распределений дают несколько иные результаты. Определить достоверность данных приведённых в статье по ее материалам практически невозможно. По нашему мнению, такие результаты могут быть обусловлены методом измерения распределения напряжения по длине гирлянды изоляторов и сложностью определения момента определения приложенного напряжения. Если принять полученные в статье результаты за истину, то применяя методы диагностики [1, 2] к расчетам потерь энергии в изоляционных конструкциях, можно более точно произвести вычисления токов утечки по поверхности изоляторов в зависимости от степени загрязненности атмосферы и погодных условий при достоверном распределении напряжения и сопротивления изоляции гирлянд изоляторов.

**Ключевые слова:** длина пути утечки, ток утечки, сопротивление изоляции, изоляторы, распределение напряжения.

**І. І. БОРЗЕНКОВ, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, І. Л. ЛЕБЕДИНСЬКИЙ, В. Р. ОБУХОВ,  
О. В. СОБЧЕНКО, С. Ю. ШЕВЧЕНКО**

## **ОГЛЯД МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІЗОЛЯЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Ізолятори повітряних ліній електропередач грають важливу роль в забезпеченні транзиту електричної енергії до споживачів. Правильний вибір і грамотний підхід до діагностики та контролю електричних параметрів ізоляційних конструкцій повітряних ліній електропередач це запорука ефективної та безаварійної роботи мережі. В даній статті проаналізовані роботи зарубіжних авторів [1, 2] за методом непрямого вимірювання довжини шляху витоку в ізоляторах повітряних ліній електропередач, а також розробленого алгоритму з діагностики розподілу напруги і опору гирлянд ізоляторів, в середовищах з високим рівнем забруднення атмосфери, для подальшого виявлення несправних ізоляторів. В роботі розглянуті методи діагностики ізоляційних конструкцій повітряних ліній електропередач. Дані методи спрямовані на забезпечення підвищення ефективного використання ліній електропередач. Застосовуючи метод оцінки стану ізоляції згідно [2], можна на ранніх стадіях розвитку дефекту ізоляції запобігти аварійному відключенню ліній електропередач. Отримані колегами їх Китаю результати вимірювань розподілу напруги по довжині гирлянди ізоляторів, викликають інтерес, оскільки всі дослідження подібних розподілів дають дещо інші результати. Визначити достовірність даних наведених в статті за її матеріалами практично неможливо. На нашу думку, такі результати можуть бути обумовлені методом вимірювання розподілу напруги по довжині гирлянди ізоляторів і складністю визначення моменту визначення прикладеної напруги. Якщо прийняти отримані в статті результати за істину, то при застосуванні методів діагностики [1, 2] до розрахунків втрат енергії в ізоляційних конструкціях, можна більш точно зробити обчислення струмів витоку по поверхні ізоляторів в залежності від ступеня забрудненості атмосфери і погодних умов при достовірному розподілі напруги і опору ізоляції гирлянд ізоляторів.

**Ключові слова:** довжина шляху витоку, струм витоку, опір ізоляції, ізолятори, розподіл напруги.

**I. BORZENKOV, D. DANYLCHENKO, I. LEBEDINSKIY, V. OBUKHOV, O. SOBCHENKO,  
S. SHEVCHENKO**

## **OVERVIEW OF DIAGNOSTIC METHODS OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF INSULATION STRUCTURES OF ELECTRIC TRANSMISSION OVERHEAD POWER LINES**

Overhead power line insulators play an important role in ensuring the transit of electrical energy to consumers. The right choice and competent approach to the diagnosis and control of the electrical parameters of the insulating structures of overhead power lines is the key to effective and trouble-free operation of the network. In this article analyzes the works of foreign authors [1, 2] by the method of indirectly measuring the creepage distance in insulators of overhead power lines, as well as the developed algorithm for diagnosing the distribution of voltage and resistance of insulator strings in environments with a high level of atmospheric pollution, for further detection of malfunctioning insulators. The paper discusses methods for the diagnosis of insulating structures of overhead power lines. These methods are aimed at ensuring increased effective use of power lines. Using the method of assessing the state of insulation according to [2], it is possible to prevent an emergency shutdown of power lines in the early stages of the development of an insulation defect. The results of measurements of the distribution of voltage along the length of a string of insulators obtained by colleagues in China are of interest, since all studies of such distributions give somewhat different results. It is almost impossible to determine the reliability of the data given in the article on its materials. In our opinion, such results may be due to the method of measuring the voltage distribution along the length of the string of insulators and the difficulty in determining the moment of determining the applied voltage. If we accept the results obtained in the article as true, then applying the diagnostic methods [1, 2] to the calculation of energy losses in insulating structures, we can more accurately calculate the leakage currents on the surface of insulators depending on the degree of pollution of the atmosphere and weather conditions with a reliable voltage distribution and insulation resistance of garlands of insulators.

**Keywords:** leakage distance, leakage current, insulation resistance, insulators, voltage distribution.

**Введение.** Величина длины пути утечки изолятора является одним из конструктивных параметров, который влияет на безаварийную работу воздушных линий электропередач в процессе их эксплуатации. Он определяет конструкцию изоляционной детали и зависит от степени загрязнённости атмосферы в районе прохождения трассы воздушной линии. Этот параметр определяет кратчайшее расстояние между двумя электродами изолятора вдоль внешней поверхности изолирующего элемента при нормальном рабочем напряжении.

Определение длины пути утечки может быть выполнено двумя способами: непосредственными и удаленными измерениями [1]. Как правило, применяются непосредственные методы измерений, однако, они неприменимы в практических ситуациях из-за необходимости вывода оборудования из работы в ремонт и низкой их эффективности. С другой стороны, существуют определенные трудности с удаленными от объекта измерениями, которые отражены в следующие аспектах:

1 большинство используемых в настоящее время изоляторов на линиях электропередачи (ЛЭП) являются стеклянными;

2 изоляторы, расположенные на опоре ЛЭП, находятся на большом расстоянии от измерителя;

3 требуются датчики для бесконтактных измерений.

Для решения задачи определения длины пути утечки в работе [1] предлагается дистанционный-метод

измерения, который косвенным образом определяет тип изолятора путем расчета его структурных параметров и сопоставляя результаты с стандартными параметрами определяет тип и длину пути утечки изолятора.

Важными характеристиками эффективной работы ЛЭП являются: распределение напряжения вдоль гирлянд изоляторов и их электрическое сопротивление. Согласно [2] в нормальных условиях при низком уровне загрязнения атмосферы и низкой влажности распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов имеет вид U-образного распределения, а сопротивление изоляции показывает очень высокие значения, превышающие 20 ГОм. Однако данные диагностики [2], измеренные в полевых условиях, показали, что в средах с высоким уровнем загрязнения или высокой влажности распределение напряжения имеет пилообразные формы и смещение по сравнению с другими гирляндами, и при этом сопротивление изоляции значительно снижается. По этим причинам обычно используемые стандартные диагностические методы имеют тенденцию давать достаточно большие погрешности при описанных условиях.

**Дистанционный метод измерения длины пути утечки изоляторов.** Различные типы тарельчатых изоляторов обычно имеют разные электрические характеристики. На рисунке 1, в первом ряду показано четыре разных типа изолятора, во втором ряду красной линией очерчены контуры нижней части тарелки изолятора.

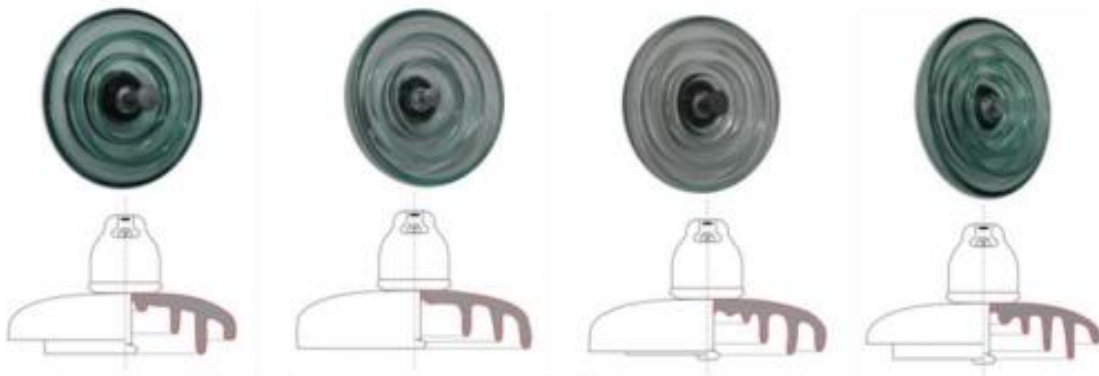


Рисунок 1 – Профили различных типов изоляторов

Поскольку тип изолятора определяет длину пути утечки, а структурные параметры различных типов изоляторов различаются, то тип изолятора можно определить путем расчета структурных параметров изолятора, после чего длина пути утечки определяется по справочнику [1].

В работе [1] предлагается дистанционный-метод измерения расстояния длины пути утечки изолятора,

который косвенным образом определяет тип изолятора путем расчета структурных параметров изоляторов на основе их геометрических характеристик, получая таким образом величину длины пути утечки. Алгоритм, лежащий в основе предлагаемого решения, изображен на рисунке 2.

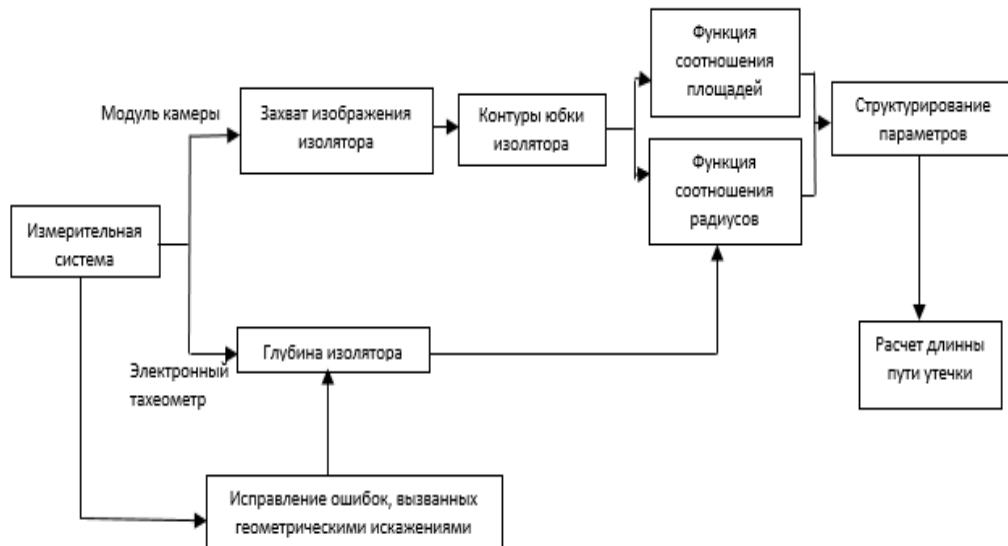


Рисунок 2 – Структурная блок-схема предлагаемого алгоритма измерения расстояния длины пути утечки изолятора.

В основе работы измерительного устройства лежит бесконтактная измерительная система, состоящая из электронного тахеометра и модуля камеры с телеобъективом. Модуль камеры с телеобъективом используется для захвата изображений изоляторов, а электронный тахеометр получает размер глубины изолятора с помощью лазера. Из изображения извлекаются контуры юбки изолятора, а затем получают абсолютные размеры конструктивных параметров изолятора на основе геометрических

характеристик отношения площадей и радиуса. В конце, этапа обработки выполняется структурирование параметров, для определения типа изолятора, а затем и длины пути утечки.

Ошибки, вызванные компоновкой измерительной системы, также устраняются для уточнения структурных параметров изолятора, благодаря этому достигается точное распознавание типов изолятора и получения длины пути утечки.

Для последующего проведения измерени

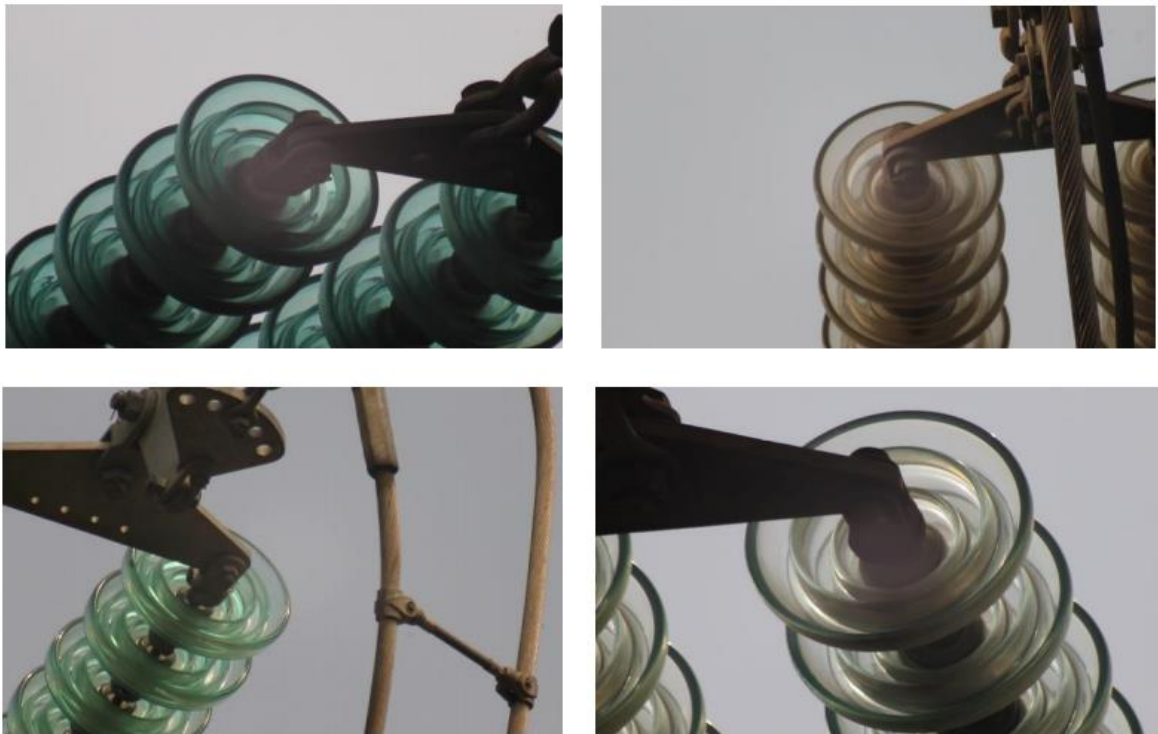


Рисунок 3 – Примеры гирлянд изоляторов различных типов

Результаты измерений [1] показали, что предлагаемая измерительная система с минимальной согласно [1] необходимо провести настройку и ряд тестов предлагаемого устройства, а именно:

1 Сбор данных: Настроить электронный тахеометр для точного попадания лазера в пестик изолятора, а затем захватить четкое изображение отдаленного изолятора, используя камеру с телеобъективом.

2 Параметры решения: Объединить измеренную глубину изолятора и захваченного изображение для погрешностью определила типы изоляторов и вычислила длину пути утечки. Данное решение имеет практическую применимость по определению типов изоляторов в гирлянде и длинны пути утечки без использования поверхностного осмотра.

**Алгоритм диагностики распределения напряжения и сопротивления гирлянд изоляторов.** В работе [2] метод измерения распределения напряжения основан на том факте, что отношение

дальнейшего расчета структурных параметров изолятора.

3 Измерение длины пути утечки: Получение результата сопоставления измеренных параметров с известными для типовых изоляторов, определение типа изолятора, а затем определение длины пути утечки.

После проведения ряда настроек и тестирования устройства, проводились измерения ряда гирлянд различных типов изоляторов на действующих ЛЭП Гуанчжоу, провинция Гуангдонг, Шанхай рисунок 3. напряжения возбуждения и распределения напряжения каждого изолятора остается постоянным [6]. В самом деле, когда напряжение 154 кВ подается на изолирующую колонну, состоящую из 12 изоляторов, и ее распределения напряжения измеряют в лаборатории, демонстрируется плавное U-образное распределение напряжения, как представлено на рисунок 4, и повторные испытания также дают почти те же результаты.



Рисунок 4 – Распределение напряжения от количества изоляторов составляющих гирлянду

На этой основе был предложен подход к измерению распределений напряжения по изоляторам, составляющим гирлянду, измеренные значения сохраняются в качестве основы для оценки, а измеренные в полевые условия значения распределения напряжения сравниваются с базовыми значениями для определения неисправности изоляторов [7]. Однако, когда распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов фактически измеряются на линии электропередачи 154 кВ, могут быть смещения в распределении напряжения, даже для гирлянд, которые состоят из одинакового количества изоляторов, из-за различий в емкости отдельных гирлянд изоляторов. Кроме того, влияние температуры, влажности и степени загрязнения изоляторов приводит к распределению U-образной формы с пилообразными формами [8], что делает практически невозможным применение описанного метода. На рисунке 5, который показывает примеры распределений напряжения вдоль гирлянд изоляторов, измеренных на линии электропередачи Чонджу 154 кВ, хорошо видно что распределение напряжения на

гирляндах может существенно отличаться от полученных в лаборатории.

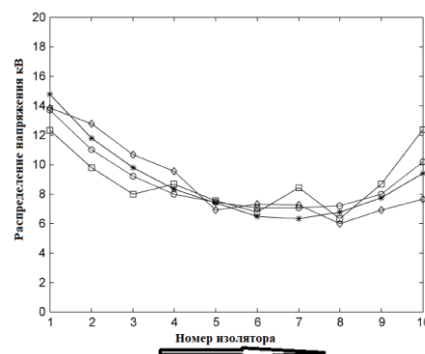


Рисунок 5 – Распределение напряжения вдоль гирлянд изоляторов на ЛЭП Чонджу 154 кВ

Ниже на рисунке 6 представлена структурная схема алгоритма диагностики распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов и сопротивления изоляции гирлянды с последующим выявлением дефектных изоляторов.



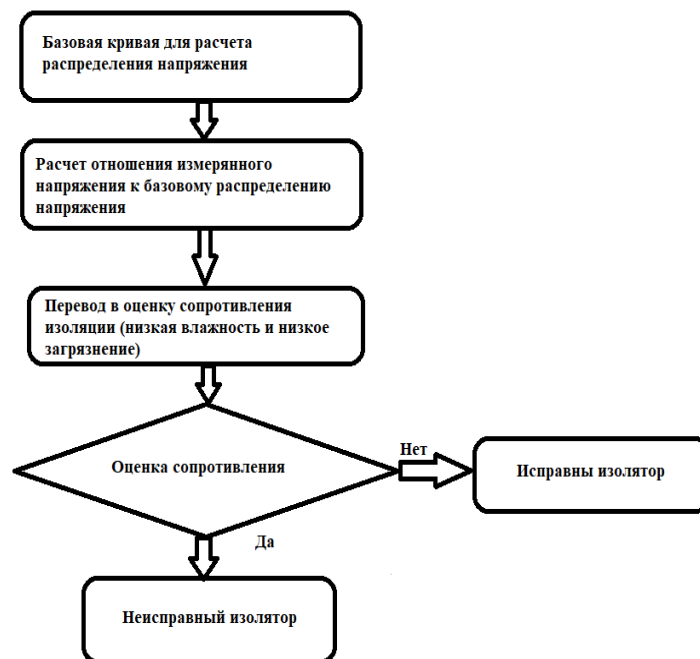


Рисунок 6 – Структурная блок-схема алгоритма диагностики распределения напряжения и сопротивления изоляции гирлянды

**Выводы.** В работе рассмотрены методы диагностики изоляционных конструкций воздушных линий электропередач. Данные методы направлены на обеспечение повышения эффективного использования линий электропередач. Применяя метод оценки состояния изоляции согласно [2], можно на ранних стадиях развития дефекта изоляции предотвратить аварийное отключение линий электропередач.

Полученные коллегами их Китая результаты измерений распределения напряжения по длине гирлянды изоляторов, вызывают интерес, поскольку все исследования подобных распределений дают несколько иные результаты.

Определить достоверность данных приведённых в статье по ее материалам практически невозможно.

По нашему мнению, такие результаты могут быть обусловлены методом измерения распределения напряжения по длине гирлянды изоляторов и сложностью определения момента определения приложенного напряжения

Если принять полученные в статье результаты за истину, то применяя методы диагностики [1, 2] к расчетам потерь энергии в изоляционных конструкциях, можно более точно произвести вычисления токов утечки по поверхности изоляторов в зависимости от степени загрязненности атмосферы и погодных условий при достоверном распределении напряжения и сопротивления изоляции гирлянд изоляторов.

#### Список литературы:

1. Jing Huang, Kejian Liu, Dan Zeng and Zhijiang Zhang An Online Measurement Method for Insulator Creepage Distance on Transmission Lines Energies 2018, 11, 1781; doi:10.3390/en11071781.
2. Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee, Byung-Hak Cho, and Ki-Yong Oh Development of Insulator Diagnosis Algorithm Using Least-Square Approximation IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 1, JANUARY 2012 pp. 3-12.
3. Шевченко С.Ю., Данильченко Д.О., Борзенков И.И. Определение токов утечки в изоляции воздушных линий электропередач Вісник Національного технічного університету «ХПИ», 2019 рік, стор. 49-53.
4. Han, Z.X.; Qiao, Y.H.; Sun, Y.; Li, W. Research on image recognition based insulator fault detection method for UVA transmission line. Mod. Electron. Tech. 2017, 40.
5. Wang, L.; Wang, H.G. A survey on insulator inspection robots for power transmission lines. In Proceedings of the 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), Jinan, China, 11–13 October 2016; pp. 1–6.
6. Yan, T.T.; Yang, G.D.; Yu, J.Z. Feature fusion based insulator detection for aerial inspection. In Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, China, 26–28 July 2017; pp. 10972–10977.
7. Koo, J.H.; Shin, W.J.; Oh, D.H.; Hwang, R.; Lee, B.W. Comparison of Surface Flashover Characteristics of Rod and Rib Type Post Insulator for Extra-High Voltage Superconducting Fault Current Limiter. IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017, 27, 1–5.
8. Kezunovic, M. Smart Fault Location for Smart Grids. IEEE Trans. Smart Grid 2011, 2, 11–22.
9. Saranya, K.; Muniraj, C. Separation of transmission line insulator flashover from a three phase fault using synchronous measurements for a Smart Grid. In Proceedings of the International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), Nagercoil, India, 7–8 April 2016; pp. 503–508.
10. Sun, X.L.; Zhong, H.H.; Xun, T.; Zhang, J. Effects of surface “micro-holes” on the flashover properties of a disk-type ceramic-vacuum insulator. Vac. J. Cit. Rep. 2017, 141, 124–129.
11. Pang, M.X.; Ye, X.N.; Ling, Z.H. Saliency Detection Based on Color and Gradient Boolean Feature. J. East China Univ. Sci. Technol. 2016, 42, 91–96.

#### References

1. Jing Huang, Kejian Liu, Dan Zeng and Zhijiang Zhang An Online Measurement Method for Insulator Creepage Distance on Transmission Lines *Energies* 2018, 11, 1781; doi:10.3390/en11071781.
2. Joon-Young Park, Jae-Kyung Lee, Byung-Hak Cho, and Ki-Yong Oh Development of Insulator Diagnosis Algorithm Using Least-Square Approximation *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 27, NO. 1, JANUARY 2012 pp. 3-12.
3. Shevchenko S., Danylchenko D., Borzenkov I. Opredelelyeniye tokov utechki v izolyatsii vozduzhnykh liniy elektropredach Vísnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPÍ», 2019, p. 49-53.
4. Han, Z.X.; Qiao, Y.H.; Sun, Y.; Li, W. Research on image recognition based insulator fault detection method for UVA transmission line. *Mod. Electron. Tech.* 2017, 40.
5. Wang, L.; Wang, H.G. A survey on insulator inspection robots for power transmission lines. In *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, Jinan, China, 11–13 October 2016; pp. 1–6.
6. Yan, T.T.; Yang, G.D.; Yu, J.Z. Feature fusion based insulator detection for aerial inspection. In *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, China, 26–28 July 2017; pp. 10972–10977.
7. Koo, J.H.; Shin, W.J.; Oh, D.H.; Hwang, R.; Lee, B.W. Comparison of Surface Flashover Characteristics of Rod and Rib Type Post Insulator for Extra-High Voltage Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017, 27, 1–5.
8. Kezunovic, M. Smart Fault Location for Smart Grids. *IEEE Trans. Smart Grid* 2011, 2, 11–22.
9. Saranya, K.; Muniraj, C. Separation of transmission line insulator flashover from a three phase fault using synchronous measurements for a Smart Grid. In *Proceedings of the International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, Nagercoil, India, 7–8 April 2016; pp. 503–508.
10. Sun, X.L.; Zhong, H.H.; Xun, T.; Zhang, J. Effects of surface “micro-holes” on the flashover properties of a disk-type ceramic-vacuum insulator. *Vac. J. Cit. Rep.* 2017, 141, 124–129.
11. Pang, M.X.; Ye, X.N.; Ling, Z.H. Saliency Detection Based on Color and Gradient Boolean Feature. *J. East China Univ. Sci. Technol.* 2016, 42, 91–96.

*Надійшла (received) 19.10.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Борзенков Ігорь Ігоревич (Борзенков Ігор Ігорович, Borzenkov Igor)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7775-9571>; e-mail: [i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua](mailto:i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua)

**Данильченко Дмитрій Алексеевич (Данильченко Дмитро Олексійович, Danylchenko Dmytro)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: [danylchenko.e@khp.edu.ua](mailto:danylchenko.e@khp.edu.ua).

**Лебединський Ігорь Леонідович (Лебединський Ігор Леонідович, Lebedinsky Igor)** – кандидат технічних наук, Сумської державний університет, завідує кафедрою електроенергетики; г. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2843-1032>; e-mail: [i.lebedinskiy@etech.sumdu.edu.ua](mailto:i.lebedinskiy@etech.sumdu.edu.ua)

**Обухов Валерій Романович (Обухов Валерій Романович, Obukhov Valeriy)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри передачі електричної енергії; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-0497>; e-mail: [prosto.valeriy.o@gmail.com](mailto:prosto.valeriy.o@gmail.com)

**Собченко Олег Вікторович (Собченко Олег Вікторович, Sobchenko Oleh)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри передачі електричної енергії; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0614-8829>; e-mail: [sob.oleg97@gmail.com](mailto:sob.oleg97@gmail.com)

**Шевченко Сергій Юрьевич (Шевченко Сергій Юрійович, Shevchenko Sergey)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідує кафедрою передачі електричної енергії; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: [syurik42@gmail.com](mailto:syurik42@gmail.com).

*Д. О. БОСИЙ, Д. Р. ЗЕМСЬКИЙ, В. Р. ХОМЕНКО*

## **АНАЛІТИЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ДВОМА СТАНДАРТАМИ У МЕРЕЖІ НЕТЯГОВОГО СПОЖИВАЧА ЗАЛІЗНИЦІ ЗМІННОГО СТРУМУ**

В Україні діють два стандарти, що визначають прийнятну якість електроенергії у мережах загального користування: ГОСТ 13109-97, який діє з 1999 року і застосовується в технічних регламентах; ДСТУ EN 50160: 2014, що набув чинності у 2014 році. Законодавство, що визначає правила українського ринку електроенергії, посилається на ДСТУ EN 50160:2014 у аспекті якості електропостачання. Стаття ставить на меті дослідити відмінності у вимогах стандартів щодо допустимих рівнів спотворень. Ця проблематика проаналізована декількома дослідниками, проте впливу вимог стандартів на обробку результатів вимірювання показників якості не приділено належної уваги. Вимірювання напруги для дослідження проводились в мережі нетягового споживача Одеської залізниці. Під час експерименту використані три режими живлення споживача. У першому режимі споживач отримував електроенергію від тягової підстанції Чубівка, у другому – одночасно від тягових підстанцій Чубівка та Слобідка, в третьому режимі – від підстанції Слобідка. Загальна тривалість експерименту становила 9 годин. Показники для відхилення, несиметрії та несинусоїдності напруги розраховані за використання різних інтервалів усереднення. Отримані показники якості досліджувались статистичними методами, результати яких наведено у вигляді полігонів функції розподілу та деякі числові статистичні характеристики для кожного режиму живлення. Встановлено, що на більшому інтервалі усереднення зменшується діапазон зміни значень показників якості електроенергії. Найбільший сталий вплив виявлено у значеннях показників, які характеризують ступінь несинусоїдності напруги мережі, розбіжність у значеннях коефіцієнта зворотної послідовності напруги знаходяться в межах до 5 %, різниці між відхиленнями напруги не виявлено.

**Ключові слова:** якість електроенергії, інтервал усереднення, нетягові споживачі, несиметрія напруги, відхилення напруги, несинусоїдність напруги

*Д. А. БОСЫЙ, Д. Р. ЗЕМСКИЙ, В. Р. ХОМЕНКО*

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ДВУМ СТАНДАРТАМ В СЕТИ НЕТЯГОВОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В Украине действуют два стандарта, определяющих приемлемое качество электроэнергии в сетях общего пользования: ГОСТ 13109-97, который действует с 1999 года и применяется в технических регламентах; ДСТУ EN 50160: 2014, который вступил в силу в 2014 году. Законодательство, определяющее правила украинского рынка электроэнергии, ссылается на ДСТУ EN 50160: 2014 в аспекте качества электроснабжения. Статья ставит целью исследовать различия в требованиях стандартов к допустимым уровням искажений. Эта проблематика проанализирована несколькими исследователями, однако влияния требований стандартов на обработку результатов измерения показателей качества не уделено должного внимания. Измерение напряжения для исследования проводились в сети нетягового потребителя Одесской железной дороги. Во время эксперимента использованы три режима питания потребителя. В первом режиме потребитель получал электроэнергию от тяговой подстанции Чубовка, во втором – одновременно от тяговых подстанций Чубовка и Слободка, в третьем режиме - от подстанции Слободка. Длительность эксперимента составляла 9 часов. Показатели для отклонения, несиметрии и несинусоидальности напряжения рассчитаны с использованием различных интервалов усреднения. Полученные показатели качества исследовались статистическими методами, результаты приведены в виде полигонов функций распределения и некоторых числовых статистических характеристик для каждого режима питания. Установлено, что на большем интервале усреднения уменьшается диапазон изменения значений показателей качества электроэнергии. Наибольший устойчивое влияние обнаружено в значениях показателей, характеризующих степень несинусоидальности напряжения, расхождение в значениях коэффициента обратной последовательности напряжения находится в пределах до 5%, разницы между отклонениями напряжения не выявлено.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, интервал усреднения, нетяговые потребители, несимметрия напряжения, отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения

*D. O. BOSYI, D. R. ZEMSKYI, V. R. KHOMENKO*

## **ANALYTICAL COMPARISON OF ELECTRICITY QUALITY INDICATORS IN NON-TRACTION CONSUMER POWER NETWORK WITH USE REQUIREMENTS OF TWO STANDARDS**

There are two standards defining acceptable power quality simultaneously in Ukrainian public networks: GOST 13109-97 has been in force since 1999 and is used in technical regulations; DSTU EN 50160: 2014 was entered into force in 2014. The legislation defining the rules of the Ukrainian electricity market refers to DSTU EN 50160: 2014 in terms of the electrical power quality. The aim of the study is to determine differences in the requirements of standards for acceptable levels distortion. Several researchers have studied this issue; however, they did not pay attention to the requirements impact of standards on the processing of quality measurement results. For the study, measurement is carried out in the non-traction consumer network of the Odessa Railway. During the experiment, three power supply modes were used. In the first mode, the consumer was received electricity from the traction substation Chubovka. In second mode, supply was realized from two substations. In the third mode the load was powered from the substation Slobidka. The total duration of the experiment was 9 hours. Indices of voltage variations, voltage unbalance and harmonic distortion were calculated with using different averaging intervals. Then, the obtained quality indicators were investigated by statistical methods. The cumulative distribution functions and some numerical statistical characteristics are given in the article for three modes of power supply. Variation range reduction of indexes have been established. Total harmonic distortion values were more susceptible than values other indicators. Voltage unbalance difference in the variance range to 5%. Difference in voltage variation indices was not found.

**Keywords:** power quality, averaging interval, non-traction customers, voltage unbalance, voltage variations, harmonic distortion.

**Вступ.** Дослідженнями проблем електромагнітної сумісності в електроенергетиці займається широке коло науковців [1-7]. Допустимі рівні електромагнітних перешкод, із якими гарантується оптимальна робота

© Д. О. Босий, Д. Р. Земський, В. Р. Хоменко, 2019

електрообладнання, визначаються у державних та міждержавних стандартах. В Україні з 2014 року вступив у дію ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [8], гармонізований із європейським стандартом EN 50160:2010. Нове законодавство, розроблене для лібералізованого ринку електроенергії, встановлює вимоги в якості гарантованих показників якості електроенергії. Так, зокрема, у пункті 11.4.6. Кодексу систем розподілу зазначається, що параметри якості електричної енергії в точках приєднання споживачів у нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення». Цим підвищується актуальність забезпечення якості електроенергії, оскільки у [9] визначені суми та принцип розрахунку компенсацій та порядок їх надання споживачам від постачальників та операторів систем розподілу електричної. У той же час, із прийняттям ДСТУ EN 50160:2014, не втратив чинність ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [10], на який продовжують посилаються інструкції та правила прийняті до 2014 року.

Аналізу розбіжностей, які має ДСТУ EN 50160:2014 у відношенні до ГОСТ 13109-97, присвячені роботи [11-13]. Загалом їх автори, обмежились співставленням нормативних значень відповідних показників якості електроенергії. Проте, менше уваги приділено вимогам до обробки результатів вимірювання. Зокрема, розмір інтервалу усереднення виміряних значень напруги, який у ГОСТ 13109-97 складає 3 або 60 с, у залежності від

розрахованого показника, а у ДСТУ EN 50160:2014 – 10 хв, може мати істотний вплив на результат оцінки якості електроенергії у системі.

Метою даної статті є порівняння вимог ДСТУ EN 50160:2014 та ГОСТ 13109-97 на підставі обробки виміряних значень напруги.

Методика вимірювання. Дослідження проводилось у колі вторинної напруги понижуючого трансформатору КТП, приєднаній до лінії «два проводи-рейка» Одеської залізниці. Для вимірювання та реєстрації використано портативні аналізатори якості електричної енергії SATEC EDL-175xr (рис. 1, а). Для вимірювання напруги, пристрій напряму підключається до виводів трансформатору, у мережу з номінальною напругою 0,38 кВ, як зображено на схемі (рис. 2). Реєстрація миттєвих значень струму у мережі здійснювалось за допомогою гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex (рис. 1, б).



Рисунок 1 – Вимірювальний пристрій: а – портативний аналізатор якості електричної енергії; б – струмові роз'ємні кліщі

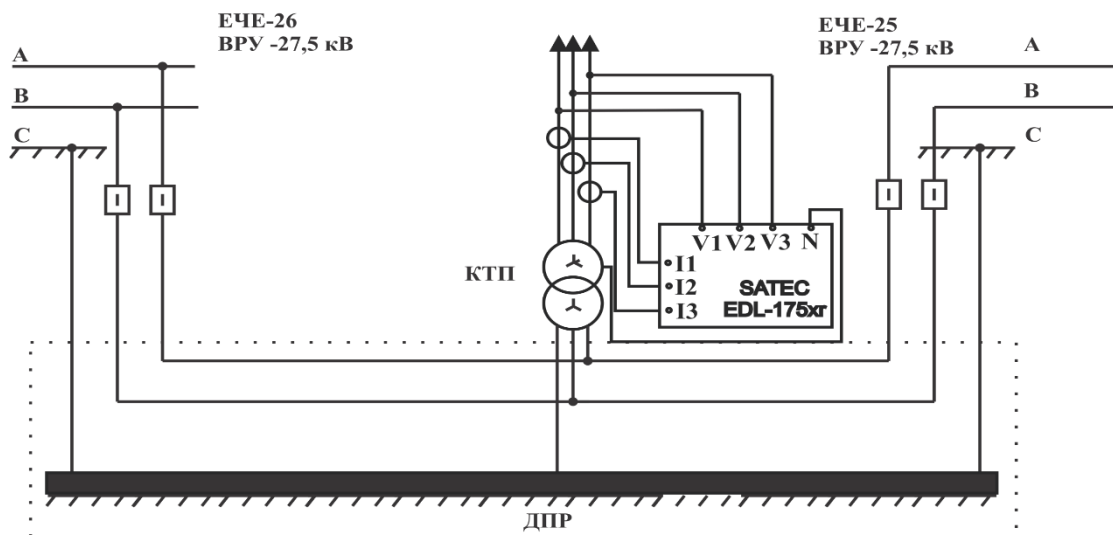


Рисунок 2 – Схема проведення вимірювань

Споживач за нормальної схеми отримувач живлення від лінії ДПР, що підключена до шин тягової підстанції Чувівка (ЕЧЕ-25) – основне живлення.

Додатково забезпечене резервування живлення від підстанції Слобідка (ЕЧЕ-26).

Зауважимо, що для лінії ДПР, яка живиться від названих підстанція, є технічна можливість реалізувати схему двостороннього живлення. Тому, під час експерименту споживач отримував живлення від двох підстанцій одночасно та по-черзі окремо від кожної підстанції.

Кожен режим живлення тривав протягом 3 годин. Загальна тривалість експерименту становила 9 годин.

В обох стандартах ДСТУ EN 50160:2014 та ГОСТ 13109-97 приведені три основних показника якості електроенергії: відхилення напруги або змінення напруги  $\delta U$ , коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги  $K_U$  або сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та коефіцієнт зворотної послідовності напруги  $K_{2U}$ , які визначаються за формулами:

$$\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100, \quad (1)$$

$$K_U = \text{СКГС} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100, \quad (2)$$

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (3)$$

де  $U$  – усереднене діюче значення міжфазної напруги, В;

$U_n$  – номінальне значення напруги, В.

$U_{(n)}$  – усереднене діюче значення  $n$ -ї гармоніки напруги, В;

$U_{(1)}$  – усереднене діюче значення напруги основної частоти, В;

$n$  – порядок гармоніки напруги;

$U_{1(1)}$  та  $U_{2(1)}$  – відповідно, напруги прямої та зворотної послідовності основної частоти, В.

За ГОСТ 13109-97 інтервал усереднення для приведених показників становить 3 с, крім відхилення напруги, де він збільшений до 60 с. Відповідно, у

ДСТУ EN 50160:2014 визначено інтервал у 10 хв для усереднення вимірних значень.

Зазначимо, що тривалість вимірювань за стандартами повинна скласти 24 години та 7 діб, відповідно, за ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014. Оскільки через технічні складнощі тривалість експериментальних вимірювань склала 9 годин, то дати вичерпну оцінку стану якості електроенергії у мережі відповідно до вимог стандартів неможливо. Проте отримані результати цілком придатні до аналізу впливу режиму живлення лінії на показники якості електроенергії та досягнення поставленої мети з порівняння вимог двох стандартів до усереднення вимірних даних.

**Результати вимірювань і аналіз отриманих результатів.** Виміряні миттєві значення фазних напруг у мережі споживача приведені на діаграмі (рис. 3).

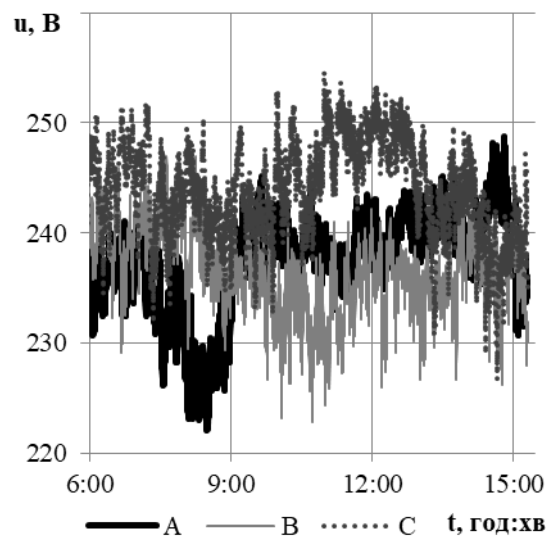


Рисунок 3 – Часова діаграма напруги живлення споживача

Виміряні дані усереднено на інтервалах, що регламентовані стандартами, для визначення кожного показника якості.

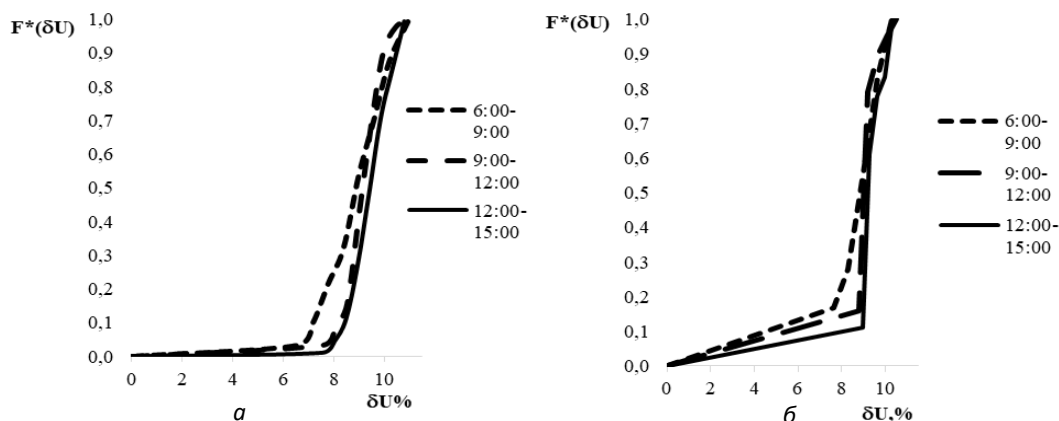


Рисунок 4 – Інтегральні функції розподілу ймовірності відхилення напруги: а – за вимогами ГОСТ 13109-97; б – за вимогами ДСТУ EN 50160:2014

Отримані значення показників якості електроенергії утворюють первину статистичну сукупність, яку далі досліджували методом аналізу інтервального варіаційного ряду. Визначення кількості часткових інтервалів для згрупованого статистичного ряду виконано за формулою Стерджеса. На основі отриманих даних побудовані полігони функції розподілу, що зображені на рис. 4-8, на яких  $\alpha$  – розраховані значення показників за вимогами ГОСТ 13109-97,  $\beta$  – за ДСТУ EN 50160:2014.

Отримані значення відхилення напруги перевищують встановлене нормально допустиме значення у 5 % за ГОСТ 13109-97, що також видно на рис. 4, а. І навпаки, згідно з ДСТУ EN 50160:2014, де нормоване значення встановлене на рівні 10 %, відсутні порушення вимог до якості напруги за цим показником.

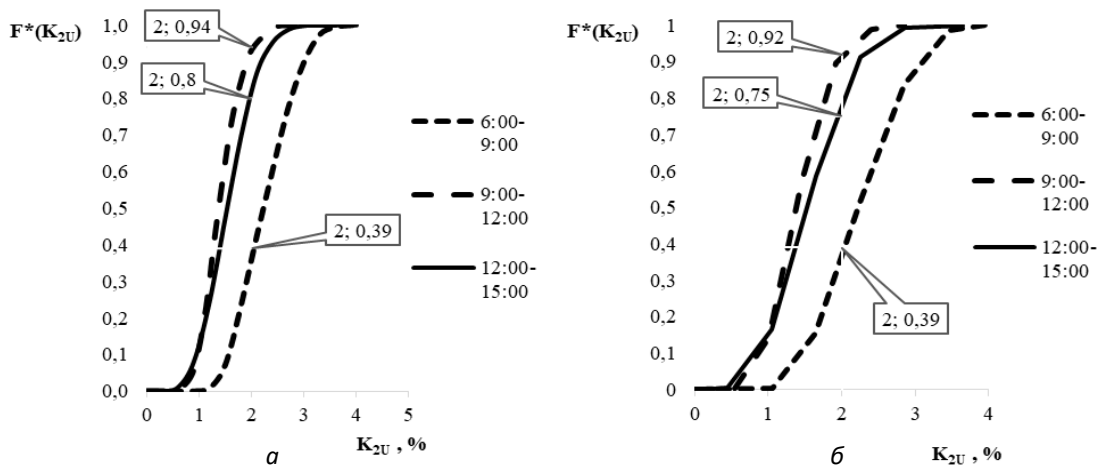


Рисунок 5 – Інтегральні функції розподілу ймовірності коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності: а – за вимогами ГОСТ 13109-97; б – за вимогами ДСТУ EN 50160:2014

Значення  $K_U$  та СКГС під час вимірювань практично не перевищували нормативного значення у 8 %. У напрузі  $U_{ab}$  (рис. 6, а) спостерігалось нетривале перевищення нормального допустимого значення на 0,4 %. Проте, при використанні інтервалу усереднення

у 10 хв, діапазон зміни СКГС виявився меншим за діапазон зміни  $K_U$  на 2-3 %. Спотворення напруг  $U_{bc}$  (рис. 7) та  $U_{ca}$  (рис. 8) у межах норми.

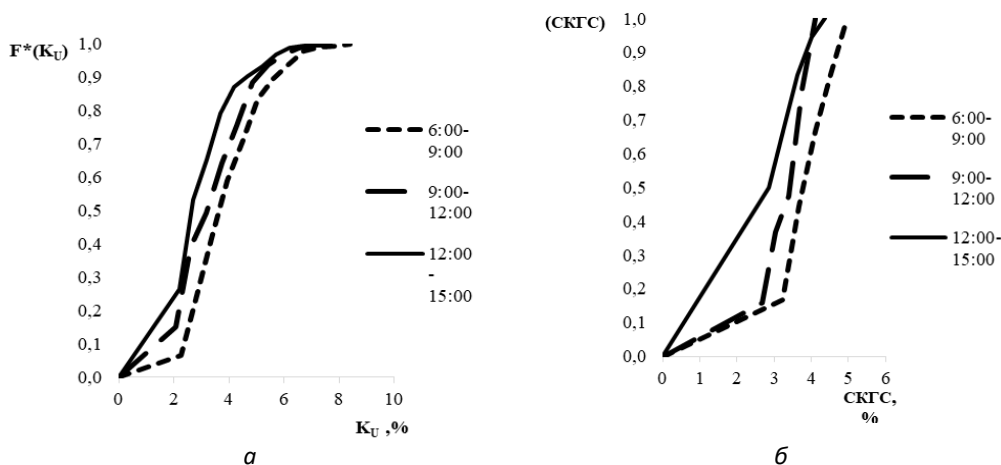


Рисунок 6 – Інтегральні функції розподілу ймовірності показника несинусоїдності напруги між фазами А та В: а – за вимогами ГОСТ 13109-97; б – за вимогами ДСТУ EN 50160:2014

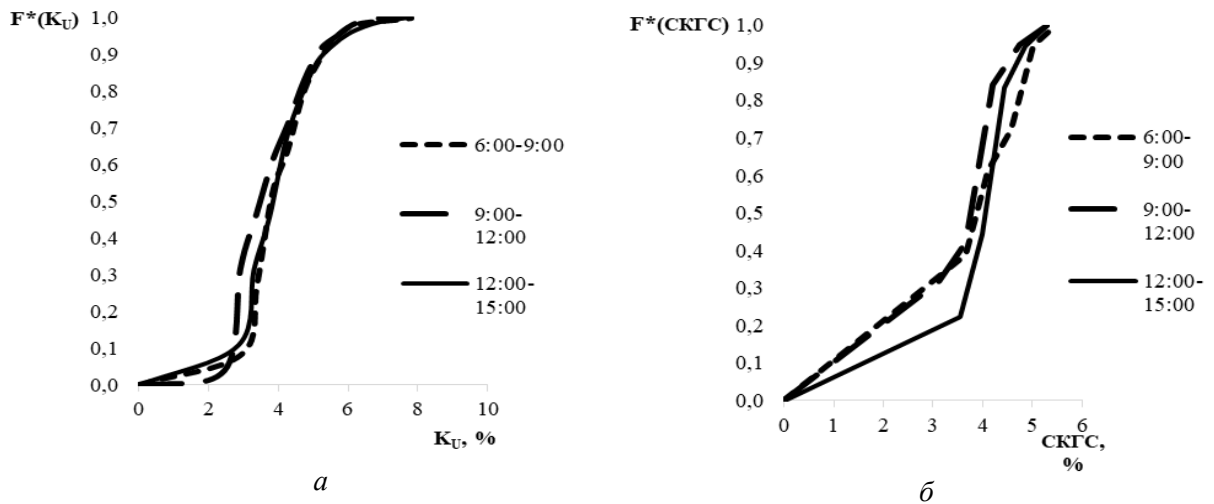


Рисунок 7 – Інтегральні функції розподілу ймовірності показника несинусоїдності напруги між фазами В та С: а – за вимогами ГОСТ 13109-97; б – за вимогами ДСТУ EN 50160:2014

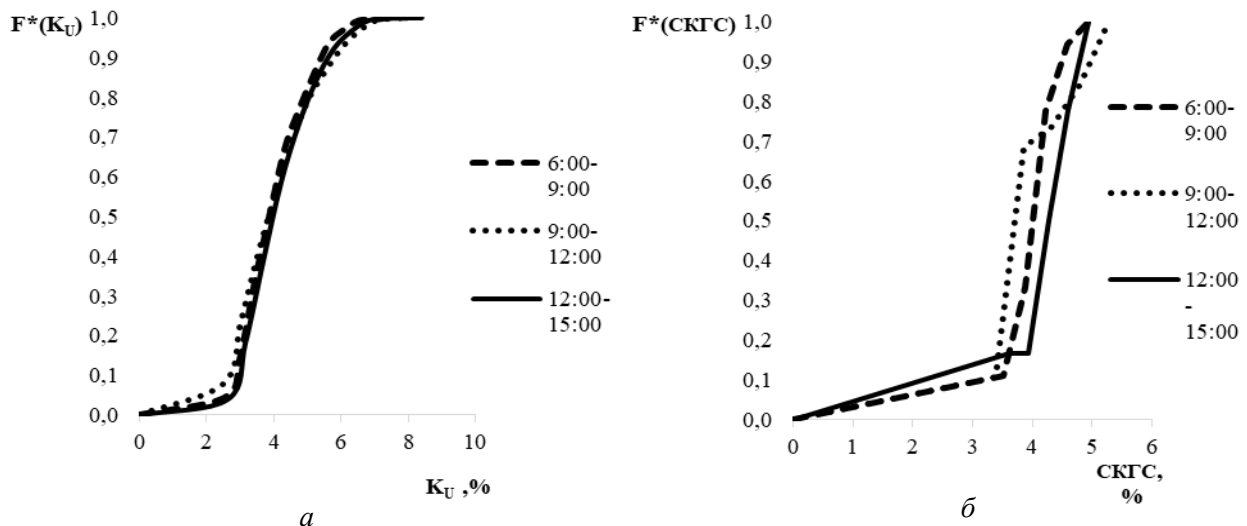


Рисунок 8 – Інтегральні функції розподілу ймовірності показника несинусоїдності напруги між фазами С та А: а – за вимогами ГОСТ 13109-97; б – за вимогами ДСТУ EN 50160:2014

Числові характеристики для показників якості електроенергії представлені у табл. 1 розраховані для різних режимів електропостачання. У таблиці представлені: найбільш ймовірніше значення (мода) відповідного показника якості, вибіркове середнє, мінімальне та максимальне значення. Чисельник відповідає значенню отриманого за ГОСТ 13109-97, знаменник, відповідно, – ДСТУ EN 50160, що дає можливість оцінити різницю у числових статистичних оцінках.

**Висновок.** В результаті виконаних досліджень встановлено, що на більшому інтервалі усереднення зменшується діапазон зміни значень показників якості електроенергії. Внаслідок використання різних вимог до обробки результатів вимірювання показників якості напруги, які визначені у чинних стандартах, можуть

бути отримані протилежні результати оцінки стану якості електроенергії у мережі. Найбільший сталий вплив виявлено у значеннях показника, що характеризує ступінь несинусоїдності напруги мережі, діапазон зміни якого зменшився на 2 %, у відношенні до діапазону зміни коефіцієнта несинусоїдності напруги, розрахованого за вимогами ГОСТ 13109-97. Розбіжність у значеннях коефіцієнта зворотної послідовності напруги знаходиться в межах до 5 %. Виконаний у статті аналіз не виявив різниці між відхиленнями напруги. Відповідно до ГОСТ 13109-97, відхилення напруги у точці мережі, де проводились вимірювання, перевищує нормоване, що пояснюється компенсацією спаду напруги до місця підключення обладнання споживача.

Таблиця 1 – Числові характеристики показників якості

Параметр	06:00-09:00				09:00-12:00				12:00-15:00			
	Мода, %	Мінімум, %	Максимум, %	Вибіркове середнє, %	Мода, %	Мінімум, %	Максимум, %	Вибіркове середнє, %	Мода, %	Мінімум, %	Максимум, %	Вибіркове середнє, %
$\delta U$	8,63/ 9,26	6,13/ 6,98	10,96/ 10,31	8,82/ 8,82	8,76/ 8,99	7,08/ 8,34	10,92/ 10,52	9,11/ 9,18	9,63/ 9,22	7,1/ 8,6	10,79/ 10,35	9,41/ 9,37
$K_{2U}$	1,95/ 1,92	0,05/ 0,73	3,94/ 3,78	2,25/ 2,25	1,46/ 1,23	0,06/ 0,69	2,75/ 2,45	1,39/ 1,41	1,64/ 1,57	0,03/ 0,45	3,93/ 3,63	1,62/ 1,55
$K_{Uab}$ (СКГС <sub>ab</sub> )	2,8/ 4,05	1,7/ 2,81	8,4/ 4,96	3,86/ 3,86	3,45/ 2,85	1,5/ 2,3	8,2/ 4,11	3,34/ 3,03	2,58/ 3,23	1,7/ 2,48	7,7/ 4,38	3,05/ 2,77
$K_{Ubc}$ (СКГС <sub>bc</sub> )	3,63/ 3,56	2,5/ 3,21	7,8/ 5,46	4,01/ 4,01	2,69/ 3,92	2/ 2,56	7,5/ 5,28	3,7/ 3,66	3,6/ 3,95	2,4/ 3,11	7,8/ 5,3	3,99/ 3,63
$K_{Uca}$ (СКГС <sub>ca</sub> )	3,31/ 4,3	2,1/ 3,17	7,4/ 4,94	3,99/ 3,99	3,20/ 3,65	2/ 2,91	8/ 5,28	4,07/ 3,70	3,7/ 4,35	2,1/ 3,28	8,4/ 4,94	4,14/ 3,76

## Список літератури

- Liang X. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. No 53(2), P. 855-866. doi: 10.1109/TIA.2016.2626253.
- Hadjimetriou L., Kyriakides E., Blaabjerg F. A robust synchronization to enhance the power quality of renewable energy systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. No 62(8), P. 4858-4868. doi: 10.1109/TIE.2015.2397871
- Гриб О. Г., Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Васильченко В. И. Качество электрической энергии. Том 3, Методы и средства повышения качества электрической энергии. Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. Т. 3. 292 с.
- Albu M., Sănduleac M., Stănescu C. Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. No 8(1), P. 485-492. doi: 10.1109/TSG.2016.2598547
- Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дніпропетровськ: Стандарт-Сервіс, 2015. 340 с.
- Zemskyi D. R., Bosyi D. O. Energy Efficient Modes of Distribution Power Supply Systems with Different Vector Group of Transformer. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. Conference proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2019. doi: 10.1109/ESS.2019.8764246. UPL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8764246>
- Земський Д. Р. Експериментальне дослідження якості електроенергії у споживачів, що живляться від лінії ДПР 27,5 кВ залізниць змінного струму Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 1 (136). С. 66-71.
- ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2014, 32 с.
- Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсації споживачам за їх недотримання: Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 12.06.2018 №375 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0375874-18> (дата звернення: 01.02.2019).
- ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев: Госстандарт Украины, 1999. 33 с.
- Трунова І. М., Мороз О. М. Деякі питання щодо застосування ДСТУ EN 50160:2014 Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. 2015. Вип. 15, Т. 2. С. 328-331.
- Трунова І. М., Лебедєва Я. А. Порівняльний аналіз основних нормативних документів щодо якості електричної енергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 165. С. 19-22.
- Хачатрян Л. А., Казанський С. В. Про невідповідність чинних стандартів України щодо показників якості електричної.

Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики. 2017. С. 156-158

## References (transliterated)

- Liang X. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. No 53(2), pp. 855-866. doi: 10.1109/TIA.2016.2626253.
- Hadjimetriou L., Kyriakides E., Blaabjerg F. A robust synchronization to enhance the power quality of renewable energy systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. No 62(8), P. 4858-4868. doi: 10.1109/TIE.2015.2397871
- Hryb O H., Sokol E. Y., Zharkyn A. F., Vasylychenko V. Y. Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 3, Metody i sredstva povysheniya kachestva elektricheskoy energii. [Electricity quality. Vol. 3, Methods and means of improving electricity quality]. Har'kov, "Graf-Iks" Publ., 2014. 292 p.
- Albu M., Sănduleac M., Stănescu C. Syncretic use of smart meters for power quality monitoring in emerging networks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. No 8(1), P. 485-492. doi: 10.1109/TSG.2016.2598547
- Sychenko V. H., Saienko Yu. L., Bosyi D. O. Yakist elektrichnoi enerhii u tiahovykh merezhakh elektrifikovanykh zaliznyts [Electricity quality in traction networks of electrified railways]. Dnipropetrovsk, Standart-Servis Publ., 2015. 340 p.
- Zemskyi D. R., Bosyi D. O. Energy Efficient Modes of Distribution Power Supply Systems with Different Vector Group of Transformer. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems. Conference proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc Publ, 2019. doi: 10.1109/ESS.2019.8764246. UPL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8764246>.
- Zemskyi D. R. Eksperymentalne doslidzhennia yakosti elektroenerhii u spozhyvachiv, shcho zhyvlyatsia vid linii DPR 27,5 kV zaliznyts zminnoho strumu [Experimental research of power quality at consumers getting electricity from the line TWR 27, 5 kV of alternating current railways] Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2018. № 1(136). pp. 66-71.
- DSTU EN 50160:2014. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrichnykh merezhakh zahalnoho pryznachennia (EN 50160:2010, IDT) [Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks (EN 50160:2010, IDT)]. Kyiv. UkrNDN Publ., 2014. p. 32.
- Pro zatverdzhennia Poriadku zabezpechennia standartiv yakosti elektropostachannia ta nadannia kompensatsii spozhyvacham za yikh nedotrymanna [On Approval of the Procedure for Ensuring Power Supply Quality Standards and Compensating Consumers for Non-Compliance] National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities Publ., Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0375874-18> (accessed 01.02.2019)
- GOST 13109-97 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Quality standards for electric



energy in public power supply systems]. Kiev. Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. p. 33

11. Trunova I. M. Deiakі pytannia shchodo zastosuvannia DSTU EN50160:2014 [Some questions regarding the application of DSTU EN50160:2014]. Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2015. Iss. 15. Vol. 2. pp. 328-331/

12. Trunova I. M. Lebedyeva Ja. A. Porivnialnyi analiz osnovnykh normatyvnykh dokumentiv shchodo yakosti elektrychnoi enerhii [Comparative analysis of the main normative documents on the quality of electricity]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho

universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka . 2015. № 165. pp. 19-22.

13. Khachatryan L. A., Kazanskyi S. V. Pro nevidpovidnist chynnykh standartiv Ukrainy shchodo pokaznykiv yakosti elektrychnoi [About the lack of official standards in Ukraine and the indicators of electrical power]. Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky. 2017. pp. 156-158

*Надійшла (received) 05.10.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Босий Дмитро Олексійович (Босый Дмитрий Алексеевич, Bosyi Dmytro Oleksiiovych)** – доктор технічних наук, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання»; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1818-2490> e-mail: [dbs@mm.st](mailto:dbs@mm.st).

**Земський Денис Романович (Земский Денис Романович, Zemskiy Denys Romanovych)** – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, аспірант, асистент кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання»; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-0727> e-mail: [d.zemskiy@ukr.net](mailto:d.zemskiy@ukr.net).

**Хоменко Валентина Романівна (Хоменко Валентина Романовна, Khomenko Valentyna Romanivna)** – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, магістрант кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання»; м. Дніпро, Україна.

УДК 620.179.16: 620.179.17

*БУССИ ЕП МИШЕЛ КАСАБЛИ САЛАМ, К. Л. НОЗДРАЧОВА, Г. М. СУЧКОВ, А. Ю. СЛОБОДЧУК***НОВИЙ БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Запропоновано новий метод ультразвукового безконтактного електромагнітно-акустичного або ємнісного контролю, який включає операції збудження і прийому пакетних зсувних ультразвукових імпульсів заданої частоти в металовиробах, фільтрацію завад в сукупності прийнятих сигналів, детектування прийнятих імпульсів, їх кореляційну обробку, обчислення спектра сумарної прийнятої реалізації, порівняння отриманого спектра зі спектром сукупності сигналів на бездефектній ділянці об'єкта контролю, прийняття рішення про наявність або відсутність дефектної ділянки. Вироби, в яких передбачається наявність дефектних ділянок відсортовуються, а остаточне рішення про якість металовиробу визначають додатково стандартними контактними методами. Ефективність розробленого методу підтверджена експериментально, при якому були застосовані ультразвукові імпульси тривалістю 5-7 періодів частоти заповнення пакетного імпульсу, частоти в діапазоні 1,5-4,5 МГц, частоти зондування до 1 кГц. Метод може бути застосований для безконтактного неруйнівного контролю (електромагнітно-акустичним або ємнісним методами) ультразвуковими пакетними імпульсами великих об'ємів металовиробів без зачистки поверхні.

**Ключові слова:** безконтактний ультразвуковий контроль, металовиріб, дефект, корозія, електромагнітно-акустичний, ємнісний, пакетний імпульс, прийнятий сигнал, кореляційний обробка, спектр, огинаюча спектра сумарного сигналу.

*БУССИ ЕП МИШЕЛ КАСАБЛИ САЛАМ, Е. Л. НОЗДРАЧЕВА, Г. М. СУЧКОВ, А. Ю. СЛОБОДЧУК***НОВИЙ БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Предложен новый метод ультразвукового бесконтактного электромагнитно-акустического или емкостного контроля, который включает операции возбуждения и приема пакетных сдвиговых ультразвуковых импульсов заданной частоты в металлоизделии, фильтрацию помех в совокупности принятых сигналов, детектирование принятых импульсов, их корреляционную обработку, вычисление спектра суммарной принятой реализации, сравнение полученного спектра со спектром совокупности сигналов на бездефектном участке объекта контроля, принятие решения о наличии или отсутствии дефектного участка. Изделия, в которых предполагается наличие дефектных участков отсортировываются, а окончательное решение о качестве металлоизделия определяют дополнительно стандартными контактными методами. Эффективность разработанного метода подтверждена экспериментально, при котором были применены ультразвуковые импульсы длительностью 5-7 периодов частоты заполнения пакетного импульса, частоты в диапазоне 1,5-4,5 МГц, частоты зондирования до 1 кГц. Метод может быть применен для бесконтактного неразрушающего контроля (электромагнитно-акустическим или емкостным методами) ультразвуковыми пакетными импульсами больших объемов металлоизделий без зачистки поверхности.

**Ключевые слова:** бесконтактный ультразвуковой контроль, металлоизделие, дефект, коррозия, электромагнитно-акустический, емкостной, пакетный импульс, принятый сигнал, корреляционная обработка, спектр, огинающая спектра суммарного сигнала.

*BUSSI EP MICHELLE CASSABLE SALAM, K. L. NOZDRACHOVA, G. M. SUCHKOV, A. YU. SLOBODCHUK***NEW NON-CONTACT METAL DEFECT DETECTION METHOD**

A new method of ultrasonic non-contact electromagnetic-acoustic or capacitive testing is proposed, which includes the operation of excitation and reception of packet shear ultrasonic pulses of a given frequency in the metal product, filtering interference in the totality of received signals, detecting received pulses, correlating them, calculating the spectrum of the total received implementation, comparing the received spectrum with the spectrum of the set of signals on the defect-free section of the object of testing, the decision on the availability or absence of a defective area. Products in which the presence of defective areas is supposed to be sorted, and the final decision on the quality of the metal product is determined additionally by standard contact methods. The effectiveness of the developed method was confirmed experimentally, in which ultrasonic pulses were applied with a duration of 5-7 periods of the filling frequency of the packet pulse, a frequency in the range of 1.5-4.5 MHz, and a sounding frequency of up to 1 kHz. The method can be applied to non-destructive testing (by electromagnetic-acoustic or capacitive methods) by ultrasonic packet pulses of large volumes of metal products without surface cleaning.

**Key words:** non-contact ultrasonic testing, metal products, defect, corrosion, electromagnetic-acoustic, capacitive, packet pulse, received signal, correlation processing, spectrum, envelope of the spectrum of the total signal.

**Вступ.** В усіх областях світової промисловості широко застосовуються ультразвукові методи вимірювань, контролю якості виробів і матеріалів, діагностики [1]. Виконують вимірювання розмірів виробів [1-2], швидкості поширення пружних хвиль різного типу [1, 3], пружних констант матеріалів [3], фізико-механічних характеристик (твердості, границі текучості і ін.) [1, 4]. При контролі якості виконують дефектоскопію [1, 5-6] і дефектометрію [1, 7], при яких виявляють внутрішні [1, 7-10] і поверхневі дефекти [1, 7-10], визначають їх місце розташування [1] форму і

розміри [1]. Застосування діагностики дає можливість розраховувати ресурс виробів і об'єктів [1, 11].

У переважній більшості випадків застосування традиційних височастотних методів ультразвукових вимірювань використовують контактний метод (із застосуванням контактної рідини, яку розміщують між п'єзоелектричним перетворювачем і об'єктом досліджень) [1]. При контролі контактним методом поверхню виробу покривають в'язкою, добре змащуючою рідиною (машинним або трансформаторним маслом, гліцерином і ін.). У разі вимірювань імерсійним і щільним способами

© Буссі Еп Мішел Касаблі Салам, К. Л. Ноздрачова, Г. М. Сучков, А. Ю. Слободчук, 2019

використовують деаеровану воду, звільнену від бульбашок повітря. Іноді в неї додають речовини (наприклад, спирт) для поліпшення змачуваності поверхні виробу і інгібітори (наприклад, азотнокислий натрій), що оберігають від корозії. При цьому необхідно захищати поверхню введення / прийому ультразвуку об'єкта від забруднень, окалини, фарби, пластикових і інших покриттів [1]. Тобто підготовка поверхні об'єкта досліджень (ОД) і значні витрати контактної рідини вимагає значних матеріальних і економічних витрат [12]. Слід зазначити, що деякі матеріали не допускають застосування контактної рідини [1].

У істотній мірі зменшити недоліки традиційних методів вимірювань можливо за рахунок застосування безконтактних способів збудження і прийому високочастотних ультразвукових імпульсів [7-10, 12] (без застосування контактної рідини), серед яких найбільш відомими є електромагнітно - акустичний [7-10] і ємнісний [13]. Електромагнітно - акустичний спосіб реалізується за рахунок застосування магнітного і електромагнітного полів [7-10, 14], а ємнісний - використовує електричні поля [13-14]. Однак, при своїх значних перевагах [15], електромагнітно - акустичний спосіб має істотний недолік, який проявляється при вимірах феромагнітних ОД, що випускаються в країні у величезних кількостях: труби, рейки, листи, заготовки та ін. Недолік обумовлений сильним притягненням електромагнітно - акустичного перетворювача до ОД, а також великими складнощами видалення налиплих на перетворювач металевих частинок і окалини.

Ємнісні перетворювачі (ЕП) не володіють недоліками ЕМА перетворювачів. Однак вважається, що вони мають недостатню чутливість.

В даний час величезна кількість виробів і обладнання експлуатується протягом довгого часу не в складних умовах. Незважаючи на широке застосування засобів захисту, ці об'єкти піддаються корозії і інших пошкоджень, як із зовнішньої, так і з внутрішньої сторони, рис. 1.

Очевидно, що багато пошкоджень такого типу виявляти складно. Крім того, як правило, необхідно проводити неруйнівний контроль великих об'ємів виробів. Потрібно застосовувати високопродуктивні методи контролю і обладнання. Отже, роботи в зазначеному напрямку є актуальними.

Метою роботи є розробка високопродуктивного недорогого методу виявлення корозійних і аналогічних уражень на прихованих поверхнях металовиробів з використанням ЕМАП або ЕП.

**Розробка, дослідження та аналіз результатів.** Традиційно для виявлення внутрішніх дефектів і поверхневих дефектів на протилежних збудженню поверхнях виробів застосовують короткі широкосмугові ультразвукові імпульси [1, 16], складномодульовані сигнали [1, 17] та інші. При реєстрації складних сигналів необхідно застосовувати відповідні методи обробки [18]. Устаткування для застосування згаданих розробок складне і використовує контактний метод ультразвукового контролю. У той же час спектральні методи ультразвукового контролю дають можливість з високою ймовірністю виявляти приховані дефекти металовиробів [16].



Рисунок 1 – Пошкодження на внутрішній поверхні газової труби (Харківська обл., Підприємство «Укргазвидобування»)

ЕМА і ємнісні методи мають підвищену чутливість за умови використання зондувальних пакетних радіоімпульсів [19]. Такі сигнали мають досить вузький спектр. При прямокутній обвідній зондування радіосигналу його спектр  $Sp(\omega)$  має вигляд [20]

$$Sp(\omega) = \frac{U \cdot t}{2} \left[ \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0)t}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0)t}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0)t}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0)t}{2}} \right],$$

де  $\omega_0$  - несуча частота збуджуючого сигналу;

$\omega$  - частоти сигналу;

$U$  - амплітуда збуджуючого імпульсу;

$t$  - тривалість зондування імпульсу.

Реальний пакетний імпульс, що збуджується ЕМА перетворювачем (ЕМАП), має згладжені фронти, кривизна яких залежить від багатьох випадкових факторів. Отже, спектральний склад сигналу, що збуджується може бути різний. У той же час основну частину спектру сигналу можна сформувати за рахунок збільшення тривалості імпульсу. При цьому може збільшитися «мертва зона» або неконтрольована

товщина виробу. Але в цьому випадку можна використовувати принцип накладення складових радіоімпульсів один на одного. Результуючий спектр буде спотворюватися за рахунок різного часу приходу компонент сигналу на ЕМАП. Різниця приходу

складових сигналу однозначно буде відбуватися при наявності корозії і аналогічних дефектів металовиробів.

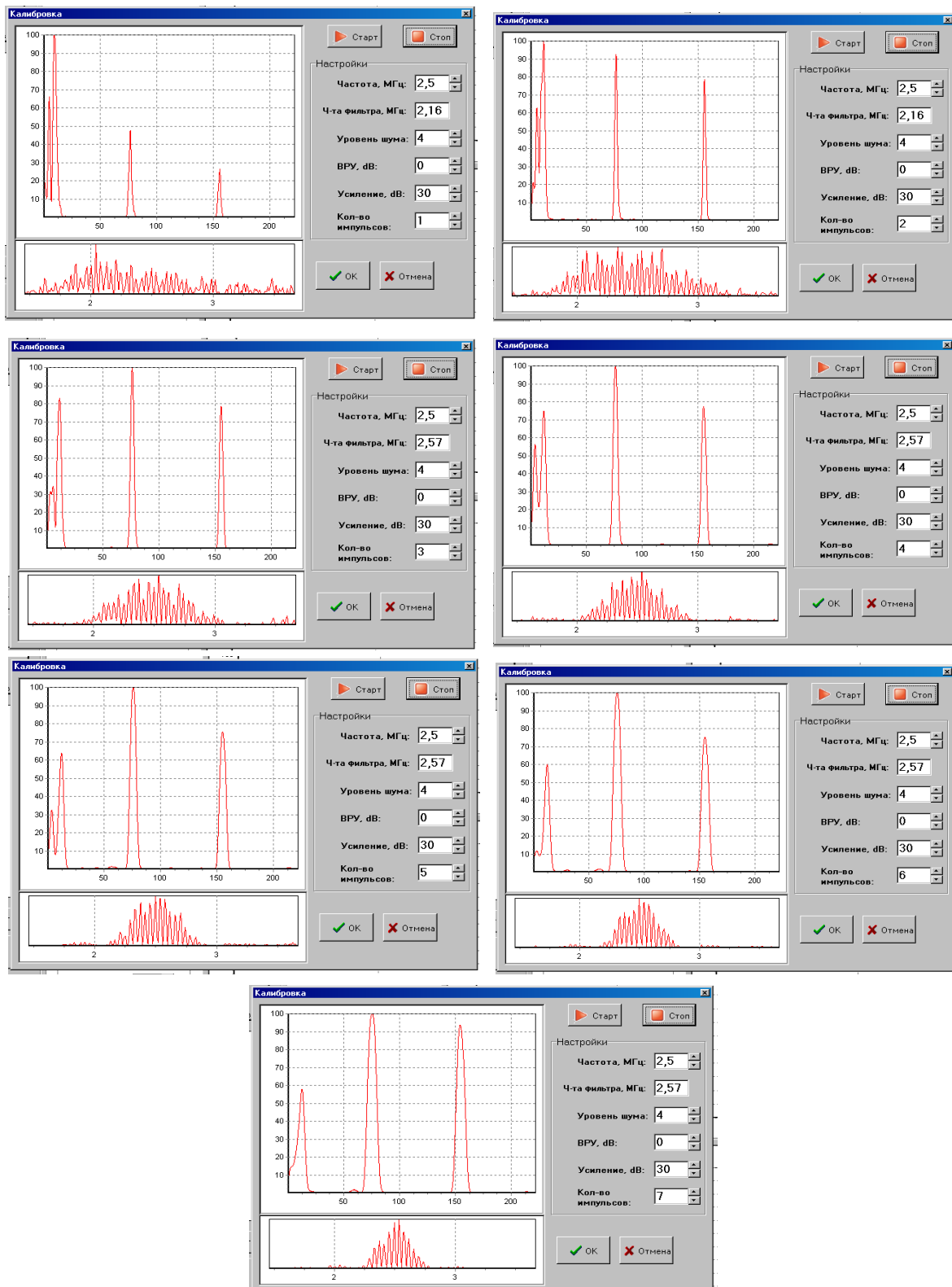


Рисунок 2 – Прийняті донні сигнали з тривалістю від 1 до 7 періодів частоти заповнення на бездефектній ділянці зразка зі сталі 09Г2С і їх спектри

Для перевірки можливості оперативного контролю використаний модернізований ультразвуковий дефектоскоп, виготовлений на основі приладу, описаного в статті [21]. Для досліджень застосовані суміщений прямий смуговий ЕМАП, описаний в роботі [22] або ЄП. Дефектоскоп дозволяє регулювати частоту ультразвукових коливань, що збуджуються в діапазоні 1 ... 5 МГц, тривалість імпульсів - у діапазоні 1 ... 10 періодів частоти заповнення пакетного імпульсу, що зондує імпульс пікового струму - до 200 А. Повітряний зазор між поверхнею металу (або товщина діелектричного покриття) і протектором ЕМА перетворювача - до 10 мм, ЄП - 0,2 мм. ЕМАП збуджувалися і приймалися імпульси зсувних лінійно поляризованих ультразвукових коливань, а ЄП - поздовжні хвилі.

Алгоритм роботи ультразвукового дефектоскопа був наступний. Збудження і прийом пакетних ультразвукових імпульсів, фільтрація прийнятих сигналів від перешкод, детектування імпульсів, кореляційна обробка і обчислення спектра результуючого сигналу. В якості базових сигналів використані донні імпульси.

Як об'єкт для досліджень використані зразки з феромагнітних сталей і алюмінієвого сплаву, в яких виконані моделі корозійних пошкоджень у вигляді свердлінь на стороні, протилежній розташуванню ЕМАП, а також зразки з натуральними ушкодженнями. Зачистка зразків на поверхні введення і прийому ультразвукових імпульсів не провадилась.

Оскільки спектр зареєстрованого сигналу, згідно вищенаведеної формули, залежить від його тривалості, на першому етапі дослідженні спектри донних імпульсів з метою вибору оптимальної тривалості. На рис. 2 наведені зображення донних імпульсів і їх спектри.

Аналіз експериментальних даних, наведених на рис. 2, підтверджує, що при збільшенні тривалості пакетного імпульсу спектр сигналу звужується, форма його огинаюча змінюється і стає близькою до дзвоноподібної. Це говорить про можливість використання форми обвідної для визначення наявності дефектних ділянок у виробі. Доцільно вибирати більш тривалий пакетний імпульс. На основі наведених результатів досліджень вирішено використовувати 6 ... 7 періодів частоти заповнення зонduючого сигналу.

З вищенаведеної формули також впливає залежність спектра сигналу від частоти заповнення зонduючого пакетного імпульсу. Результати експериментальних досліджень впливу частоти заповнення зонduючого імпульсу, з урахуванням смуги пропускання ЕМАП або ЄП, наведені на рис. 3.

Аналіз експериментальних даних, наведених на рис. 3 вказує, що форма обвідної спектрів в основному зберігає свій дзвоноподібний вид в діапазоні частот 2 ... 4 МГц. Незначні зміни обвідної спектрів прийнятих сигналів обумовлені нерівномірністю смуги пропускання перетворювачів, а також впливом завад.

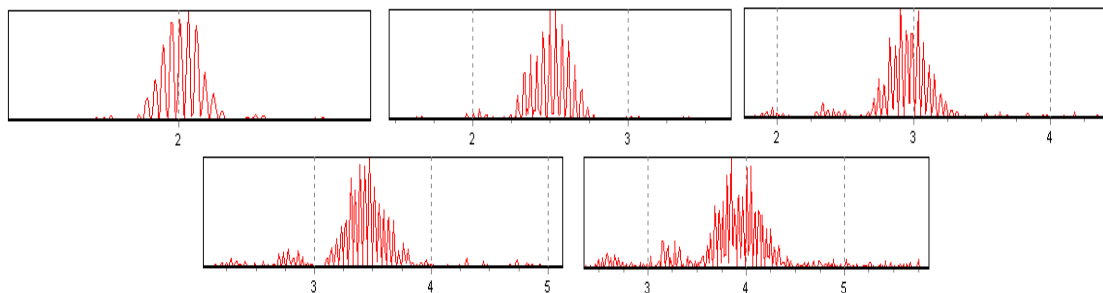


Рисунок 3 – Вплив частоти заповнення зонduючого пакетного імпульсу на огинаючу його спектра при тривалості імпульсу 7 періодів частоти заповнення (значення частот вказані на горизонтальній шкалі) на бездефектній ділянці зразка зі сталі 09Г2С

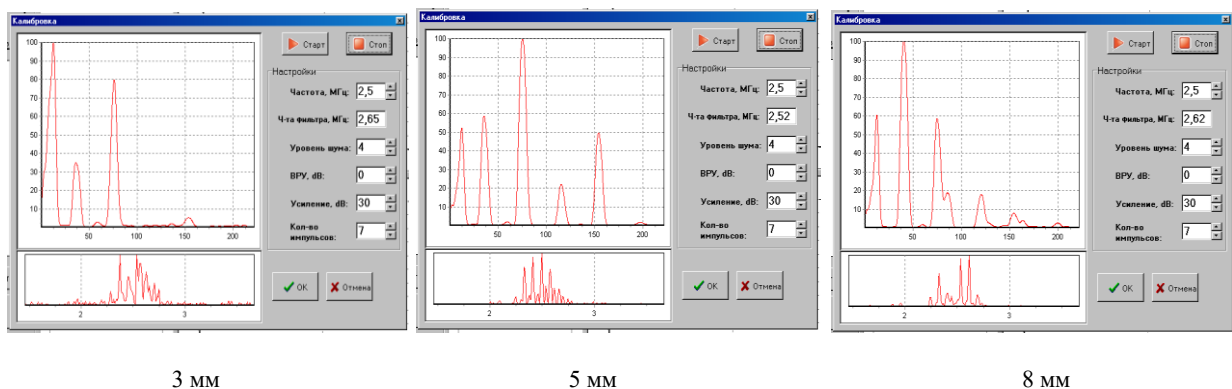


Рисунок 4 – Розгортки з імпульсами, відбитими від дна і від дефектів різного розміру і відповідні їм спектри на плоскопаралельному зразку зі сталі 09Г2С

Для перевірки припущення про суттєвий вплив наявності дефектів у вигляді корозії на донній поверхні зразка зі сталі 09Г2С були виготовлені моделі дефектів у вигляді свердлінг діаметром 3; 5 і 8 мм. Результати досліджень огинаючих спектрів прийнятих сигналів при наявності моделей дефектів різних розмірів наведені на рис. 4.

Аналогічні дані для зразка з алюмінієвого сплаву наведені на рис. 5. Використано імпульси тривалістю 7 періодів частоти заповнення рівній 2,5 МГц.

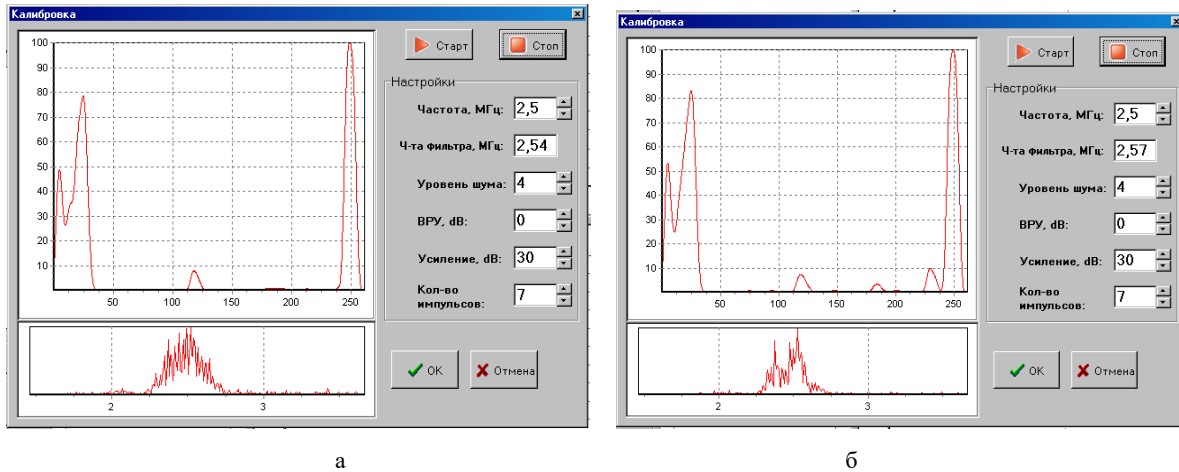


Рисунок 5 – Розгортки з імпульсами, відбитими від дна без дефектів (а) і від дна з дефектом (б) діаметром 3 мм і відповідні їм спектри на зразку з алюмінієвого сплаву

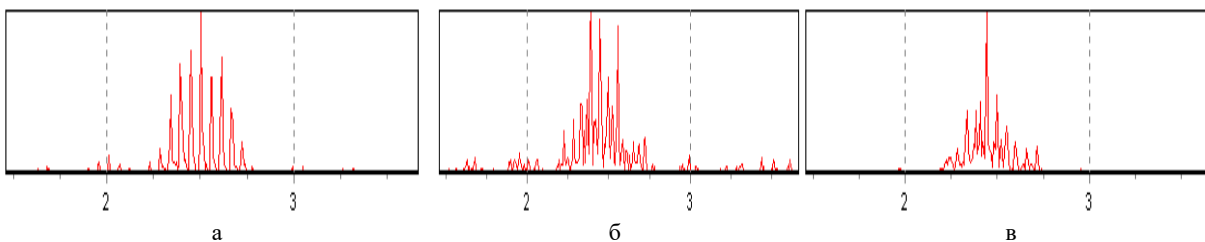


Рисунок 6 – Спектри, отримані на зразку зі сталі ст.45 на бездефектній ділянці (а), на ділянці з плоскою тріщиною на донній поверхні глибиною 4 мм (б) і на ділянці з плоскою тріщиною на донній поверхні глибиною 8 мм (в)

З аналізу наведених даних випливає, що застосування розробленого способу ультразвукового контролю дозволяє виявляти плоскі тріщини на донній поверхні металовиробів без визначення їхнього характеру і розмірів, тобто спосіб призначений для продуктивного виявлення дефектних ділянок і

подальшої ідентифікації виявлених пошкоджень традиційним методом.

Експериментальні дослідження виявлення дефектів, що мають випадкові геометричні характеристики, підтвердили ефективність запропонованого способу, рис. 7.

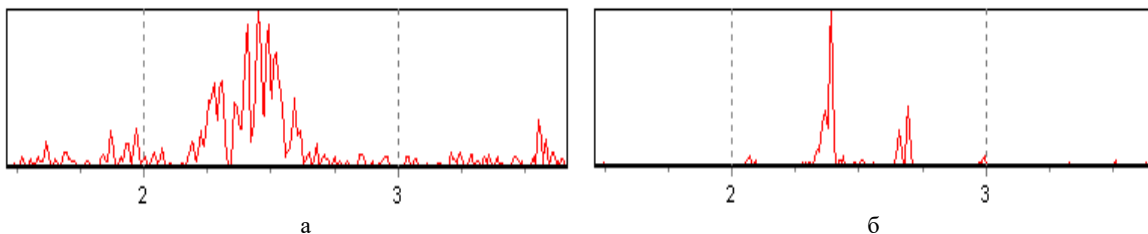


Рисунок 7 – Спектри, отримані на зразку зі сталі ст.3 з групою забоїв на донній поверхні (а) глибиною 0,5 ... 2,3 мм і з кавернами глибинами до 3 мм на донній поверхні газової труби діаметром 74 мм і товщиною 6,2 мм

Оскільки характер і розміри дефектів в запропонованому варіанті контролю не визначаються, то його можна використовувати для експрес-діагностики.

### Висновки.

1. Запропоновано проводити експрес неруйнівний контроль металовиробів із застосуванням прямих смугових ЕМАП і широкосмугових ЄП, які збуджують і приймають лінійно поляризовані пакетні імпульси ультразвукових коливань з тривалістю 6 ... 7 періодів частоти заповнення сигналу шляхом аналізу форми обвідної спектра прийнятих сигналів.

2. Для реалізації розробленого способу експрес контролю необхідно виконати наступні операції: збуджувати і приймати пакетні ультразвукові імпульси, фільтрувати сукупність прийнятих сигналів від перешкод, детектувати прийняті імпульси, здійснити кореляційну обробку сигналів, обчислити спектр результуючого сигналу, визначити його відміну від спектра донних сигналів на бездефектній ділянці, прийняти рішення про наявність дефектної ділянки. Остаточне рішення про якість металовиробу визначають додатково стандартними методами.

### Список літератури

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Куц Ю.В., Монченко О.В., Бистра І.М. та інші. Фазовий метод ультразвукової лунаїмпульсної товщинометрії виробів з конструкційних матеріалів: монографія / Ю.В. Куц, О.В. Монченко, І.М. Бистра та інші / - К.: Інтерсервіс, 2019. – 192 с.
3. Сучков Г.М. Упругие характеристики материалов // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 7. – С. 20-24.
4. Патон Б. Е. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона для современной энергетики / Б. Е. Патон // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. - 2013. - No 1. - С. 3 - 11.
5. Ермолов И.Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. 2004. № 10. - С. 13-48.
6. Алешин Н.П. Перспективы развития ультразвуковой дефектоскопии. XX Юбилейная Петербургская конференция «УЗДМ-2009». С.-Петербург. 2009. Доклад П2.
7. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. – №2. – С. 24–31.
8. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю., Корж А.И. и др. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. – №3. – С. 27–34.
9. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч.1) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. –2018. –№4. –С.45–50.
10. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (обзор, ч.2) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2019. – №1. – С 47-54.
11. Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Шевальдыкин В.Г. Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики // Территория NDT. – 2014. - №2. – С.24-26.
12. Судакова К.В., Казюкевич И.Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 3. – С. 8–10.
13. Improving principles of electric energy pulse transformation into high-frequency mechanical energy using capacitive method. / O.N.

Petrishchev, K.L. Nozdrachova, G.M. Suchkov, R.P. Myhushchenko, O.Yu. Kropachek, S.Yu. Plesnetsov // Technical Electrodynamics – 2019(6), p. 18–24 DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2019.06.018>

14. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1/ Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Романюк М.И. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев. – 2015 – № 1. – С. 45-50. <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01.05>

15. Семеренко А.В. Применение ЭМАП для контроля коррозии и эрозии паронагревателей котельных установок // Территория NDT. 2014. №1. С.42–43.

16. Соколов И.В. Разработка помехоустойчивых методов и средств многофункциональной ультразвуковой дефектоскопии сложных конструктивных изделий. Автореф. докт. дис. М.: Московский энергетический институт (Технический университет). 2008. –47 с.

17. Вісков О.В. Підвищення вірогідності та інформативності акустичного контролю трубних виробів : Автореф. канд. дис. Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2003. – 20 с.

18. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov Issam Saad G. Noise-Like Signals in Wireless Information Transmission Systems // Advanced Information Systems. No. 2. Vol. 1. – 2017, pp. 33–38.

19. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хащина С.В. и др. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных металлоизделий // Контроль. Диагностика. –2013. – №4. –С. 31–35.

20. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа. 2000.– 463 с.

21. Сучков Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2005. №12. – С. 24-39.

22. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., и др. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия // Технічна електродинаміка, – 2016, – №2, – с. 78–82.

### References (transliterated)

1. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: V 7 t. pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T.3: Ul'trazvukovoy kontrol' / I.N. Yermolov, YU.V. Lange. – Moscow : Mashinostroyeniye, 2004. – 864 p.
2. Kuts YU.V., Monchenko O.V., Bistra I.M. ta inshi. Fazovyy metod ul'trazvukovoy voyenno-tekhnicheskoy ekspertizy: monografiya / YU.V. Kuts, O.V. Monchenko, I.M. Bistra ta inshi / Kyiv .: Interservis, 2019. - 192 p.
3. Suchkov G.M. Uprugiy kharakteristiki materialov // Kontrol'. Diagnostika. - 2005. - No 7. - P. 20-24.
4. Paton B. Ye. Issledovaniya i razrabotki IES im. Ye. O. Patona dlya so-energiy Ye. Paton // Tekhn. diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'. - 2013. - No 1. - P. 3 - 11
5. Yermolov I.N. Dostizheniya v teoreticheskikh voprosakh ul'trazvukovoy defektoskopii, zadachi i perspektivy // Defektoskopiiya. 2004. No 10. - P. 13-48.
6. Aleshin N.P. Perspektivy razvitiya ul'trazvukovoy defektoskopii. XX Yubileynaya Peterburgskaya konferentsiya «UZDM-2009». St. Petersburg. 2009. Doklad P2.
7. Plesnetsov S.YU., Suchkov G.M., Korzh A.I., Suvorova M.D. Novyye teoreticheskiye issledovaniya i razrabotki v oblasti elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya (obzor) // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'. - 2018. - No2. - P. 24-31.
8. Suchkov G.M., Plesnetsov S.YU., Korzh A.I. i dr. Novyye razrabotki elektro-magnitno-akusticheskikh preobrazovateley. (obzor) // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazru-shayushchiy kontrol'. - 2018. - No3. - P. 27-34.
9. Suchkov G.M., Plesnetsov S.YU. Chuvstvitel'nost' kontrolya elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovateley (obzor, ch.1) // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrusha-yushchiy kontrol'. -2018. -No4. -P.45-50.
10. Suchkov G.M., Plesnetsov S.YU. Analiz chuvstvitel'nosti ul'trazvukovogo kontrolya poverkhnostnykh volnami, izluchayushchiye i priminyushchiye elektromagnitno-akusticheskkiye preobrazovately (obzor, ch.2) // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrusha-yushchiy kontrol'. - 2019. - No1. - P 47-54.

11. Bobrov V.T., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Sostoyaniye i tendentsii razvitiya akusticheskikh (ul'trazvukovykh) metodov, sredstv i tekhnologiy nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki // Territoriya nerazrushayushchego kontrolya. - 2014. - No2. - P.24-26.
12. Sudakova K.V., Kazuykevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produktsii // V mire nerazrushayushchego kontrolya. - 2004. - No 3. - P. 8-10.
13. Sovershenstvovaniye printsipov preobrazovaniya impul'sov elektricheskoy energii v vysokochastotnyuyu mekhanicheskuyu energiyu yemkostnym metodom. / O.N. Petrishchev, K.L. Nozdrakhova, G.M. Suchkov, R.P. Mikhushchenko, O.YU. Kropachek, S.YU. Plesnetsov // Tekhnicheskaya elektrodinamika - 2019 (6), P. 18–24 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.018>
14. O vzbuzhdenii ul'trazvukovykh voln v metalle yemkostnym preobrazovatelem. Chast' 1 / Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdracheva Ye.L., Romanyuk M.I. // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'. - Kiyev. - 2015 - No 1. - P. 45-50. <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.01.05>
15. Semerenko A.V. Primeneniye EMAP dlya kontrolya korrozii i erozii paronagrevateley kotel'nykh ustanovok // Territoriya NDT. 2014. No1. P.42-43.
16. Sokolov I.V. Razrabotka pomekhoustoychivykh metodov i sredstv mnogofunktional'noy ul'trazvukovoy defektoskopii slozhnostrukturnykh izdeliy. Avtoref. dokt. dis. Moscow: Moskovskiy energeticheskii institut (Tekhnicheskii universitet). 2008. -47 p.
17. Viskov O.V. Pedvishenni virogidnosti ta informativnosti akusticheskogo kontrolya trubchatykh virobiv: Avtoref. kand. dis. Ivano Frankivsk: Ivano-Frankivskiy natsional'niy tekhnichniy universitet nafti i gazu, 2003. - 20 p.
18. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov Issam Saad G. Shumopodobnyye signaly v besprovodnykh sistemakh peredachi informatsii // Sovremennyye informatsionnyye sistemy. No 2. Tom. 1. - 2017, P. 33–38.
19. Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Khashchina S.V. i dr. Povysheniye vozmozhnykh beskontaknykh defektoskopiy poverkhnosti katanykh ferromagnitnykh metalloiz-deliy // Kontrol'. Diagnostika. -2013. -No4. -P. 31-35.
20. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskkiye tsepi i signaly. - Moscow: Vysshaya shko-la. 2000.– 463 s.
21. Suchkov G.M. Sovremennyye vozmozhnosti EMA defektoskopii // Defektoskopiya. - 2005. No12. - P. 24-39.
22. Migushchenko R.P., Suchkov G.M., Radev KH.K., i dr. Elektromagnitno-akusticheskiiy preobrazovatel' dlya ul'trazvukovoy tolshchinometrii ferromagnitnykh metalloizdeliy bez udaleniya dielektricheskogo pokrytiya // Tekhnichna yelektrodinamika, - 2016, - No2, - P. 78-82.

Надійшла (received) 18.08.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Буссі ЕП Мішел Кассаблі Салам (Бусси ЕП Мишел Кассабли Салам, Bussi EP Michelle Cassable Salam)**, аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; e-mail: [hpi.suchkov@gmail.com](mailto:hpi.suchkov@gmail.com)

**Ноздрачова Катерина Леонідівна (Ноздрачева Екатерина Леонидовна, Nozdrachova Katerina Leonidivna)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-1996-2301, e-mail: [nozdrachova@gmail.com](mailto:nozdrachova@gmail.com)

**Сучков Григорій Михайлович (Сучков Григорий Михайлович, Suchkov Grigoriy Mihaylovich)** – завідувач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-1805-0466 e-mail: [hpi.suchkov@gmail.com](mailto:hpi.suchkov@gmail.com)

**Слободчук Антон Юрійович (Слободчук Антон Юрьевич, Slobodchuk Anton Yuryvich)** – аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0002-4498-9688 e-mail: [antonslobodchuk@gmail.com](mailto:antonslobodchuk@gmail.com)



**О. І. ГАНУС, К. О. СТАРКОВ, В. В. ЧЕРКАШИНА**

### **СКЛАДОВІ ПЕРЕНАПРУГ НА ЕЛЕМЕНТАХ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ**

Розглянуто нелінійну динамічну математичну модель трансформатора напруги та досліджено перенапруги, що виникають на елементах спрощеної схеми заміщення трансформатора напруги при перехідних процесах при поступовому ускладненні даної системи і аналізі чинників, що впливають на величину перенапруг, тривалості та інших параметрах перехідних процесів. Використано переваги апроксимування нелінійності трансформаторів напруги гіперболічним синусом. Визначено математичні вирази для обчислення параметрів перехідних процесів та перенапруг, які виникають при відключенні лінійних та нелінійних індуктивностей від джерел постійних та синусоїдальних напруг. Визначено вплив початкових умов та інших факторів на характер протікання перехідних процесів. Доведено, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності, обмотках трансформаторів напруги у більшій мірі залежить від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки, чим від величини активного опору навантаження. Визначені максимальні рівні перенапруг, які виникають при відключенні трансформатора напруги від джерела синусоїдальної напруги, та їх залежності від моментів відключення. Обґрунтовано, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга з індуктивністю відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення. Визначено характер перехідних процесів для тих випадків, коли попередній перехідний процес не був повністю згашеним. Розроблено рекомендацію щодо найбільш ефективного використання методів з короткочасного шунтування навантаження трансформаторів напруги, які найкраще всього можуть ефективно компенсувати перенапруги при перехідних процесах з ненульовими початковими умовами. Результати аналітичних досліджень апробовано по результатам аналізу записів фіксуючих пристроїв під час аварійних процесів у електричних мережах АТ «Харківобленерго» та використано у системі розподілу електричної енергії для підбору конкретного трансформатора напруги для певної конфігурації електричної мережі.

**Ключові слова:** трансформатор напруги, нелінійність, перехідний процес, індукція, перенапруга, шунтування, навантаження, схема заміщення, початкові умови, магнітні характеристики, феррорезонанс, гіперболічний синус, гістерезис

**А. И. ГАНУС, К. А. СТАРКОВ, В. В. ЧЕРКАШИНА**

### **СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТАХ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

Рассмотрена нелинейная динамическая математическая модель трансформатора напряжения и исследованы перенапряжения, возникающие на элементах упрощенной схемы замещения трансформатора напряжения при переходных процессах при постепенном усложнении данной системы и анализе факторов, влияющих на величину перенапряжений, продолжительности и других параметров переходных процессов. Используются преимущества аппроксимирования нелинейности трансформаторов напряжения гиперболическим синусом. Определены математические выражения для вычисления параметров переходных процессов и перенапряжений, возникающих при отключении линейных и нелинейных индуктивностей от источников постоянных и синусоидальных напряжений. Определено влияние начальных условий и других факторов на характер протекания переходных процессов. Доказано, что уровень возможных перенапряжений на катушке индуктивности, обмотках трансформаторов напряжения в большей степени зависит от соотношения активных сопротивлений нагрузки катушки индуктивности (или трансформатора напряжения) и самой обмотки, чем от величины активного сопротивления нагрузки. Определены максимальные уровни перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора напряжения от источника синусоидального напряжения, и их зависимости от моментов отключения. Обосновано, что наиболее тяжелым случаем с точки зрения величин перенапряжений является тот, при котором включение электрической цепи с индуктивностью происходит в момент времени, когда переходная составляющая индукции вынуждена компенсировать максимальное значение индукции постоянного режима, а отключение происходит через пол периода после включения. Определен характер переходных процессов для тех случаев, когда предыдущий переходный процесс не был полностью завершен. Разработаны рекомендации по наиболее эффективному использованию методов по кратковременному шунтированию нагрузки трансформаторов напряжения, которые лучше всего могут эффективно компенсировать перенапряжения при переходных процессах с ненулевыми начальными условиями. Результаты аналитических исследований апробированы по результатам анализа записей фиксирующих устройств при аварийных процессах в электрических сетях АО «Харьковоблэнерго» и использованы в системе распределения электрической энергии для подбора конкретного трансформатора напряжения для определенной конфигурации электрической сети.

**Ключевые слова:** трансформатор напряжения, нелинейность, переходный процесс, индукция, перенапряжение, шунтирование, нагрузка, схема замещения, начальные условия, магнитные характеристики, феррорезонанс, гиперболический синус, гистерезис

**A. I. GANUS, K. A. STARKOV, V. V. CHERKASHYNA**

### **OVERVOLTAGE COMPONENTS ON VOLTAGE TRANSFORMER DISPLACEMENT SCHEMES ELEMENTS**

The nonlinear dynamic mathematical model of the voltage transformer was considered and the overvoltages that occur on the elements of the voltage transformer simplified equivalent circuit during transients with a gradual complication of this system and the factors analysis affecting the magnitude of the overvoltage, duration, and other transient processes parameters are studied. The approximating advantages nonlinearity of voltage transformers with a hyperbolic sine are used. Mathematical expressions for calculating the parameters of transients and overvoltages that occur when disconnecting linear and nonlinear inductances from sources of constant and sinusoidal voltages are defined. The initial conditions influence and other factors on the transition process character is determined. It is proved that the possible overvoltages level on the inductor, the windings of voltage transformers is more dependent

© О. І. Ганус, К. О. Старков, В. В. Черкашина, 2019

on the ratio of the active load resistances of the inductor (or voltage transformer) and the winding itself, than on the load active resistance magnitude. The overvoltage maximum levels that occur when a voltage transformer is disconnected from a sinusoidal voltage source and their dependence on the disconnection moments are determined. It is proved that the most difficult case from the overvoltage view point values is when the switching on of an electric circuit with inductance occurs at a time when the induction transient component is forced to compensate for the maximum value of the constant mode induction, and the shutdown occurs half a period after switching on. The transition processes character for those cases where the previous transition process has not been fully completed is defined. Recommendations for the most efficient methods using for short-term load shunting of voltage transformers, which can best compensate for overvoltages during transients with non-zero initial conditions, have been developed. The analytical studies results were tested according to the recordings analysis results of fixing devices during emergency processes in the JSC «Kharkivoblenergo» electric networks and were used in the electric energy distribution system to select a specific voltage transformer for a specific electric network configuration.

**Keywords:** voltage transformer, nonlinearity, transient, induction, overvoltage, shunting, load, equivalent circuit, initial conditions, magnetic characteristics, feroresonance, hyperbolic sine, hysteresis

**Введение.** Передача та розподіл електричної енергії споживачам України здійснюється електричними мережами різних номінальних напруг. Однією з найбільш істотних особливостей їх експлуатації є досить велика аварійність, значна частина якої викликана пошкоджуваністю трансформаторів напруги [1]. За результатами проведених у АТ «Харківобленерго» досліджень були визначені вимоги щодо підвищення надійності трансформаторів напруги при появі землі в електричних мережах з ізольованою нейтраллю, а саме – заходи з усунення умов виникнення ферорезонансних процесів у зазначених електричних мережах. Але, проблема залишилась. Крім того, підлягає вирішенню проблема усунення пошкоджуваності трансформаторів напруги в електричних мережах з іншими режимами заземлення нейтралі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих роботах досліджені причини вигорання обмоток трансформаторів напруги: перенапруги, обумовлені ємнісними струмами замикання на землю; перенапруги, пов'язані з ферорезонансом; перенапруги, пов'язані з включенням трансформаторів на систему «холості шини» тощо та визначено рекомендації щодо підвищення їх надійності.

В [2] запропоновано здійснювати захист трансформаторів напруги шляхом короткочасного підключення до їх вторинних обмоток низькоомного опору під час ферорезонансного процесу.

В [3] запропоновано використання трансформаторів напруги, підключених на лінійну напругу з ємнісним дільником між двома обмотками трансформатора напруги і землею.

В [4] досліджено впливу умов перехідних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю на характер пошкоджень трансформаторів напруги та визначено рекомендації щодо їх компенсації.

В [5] визначено вплив дрейфу магнітних характеристик трансформаторів напруги на характер протікання ферорезонансних процесів та визначено рекомендації з підбору трансформаторів напруги для конкретних електричних мереж.

В [6] визначені межі областей можливих згасаючого і незгасаючого ферорезонансних процесів в електричних мережах з ізольованою нейтраллю та визначено рекомендації щодо захисту трансформаторів напруги в кожній з зазначених областей.

Недостатня ефективність існуючих засобів захисту трансформаторів напруги під час виникнення

ферорезонансних процесів у [7] пояснюється тим, що аналітичні дослідження, покладені в основу їх розробки через спрощення, які зазвичай приймають під час моделювання нелінійних кіл за допомогою традиційних методів лінеаризації, призводять до відсутності в результатах аналізу небезпечних параметрів режимів, що наявні під час експлуатації трансформаторів напруги.

**Мета статті.** У [7] зазначено, що ферорезонансні явища в електричних колах при наявності котушки з феромагнітним осередком характеризуються складною динамікою через даний нелінійний елемент. Для цих процесів характерними є висока чутливість по відношенню як до початкових умов, так і до факторів впливу. У зв'язку з цим обґрунтовано, що спрощення, які приймають під час аналізу ферорезонансних кіл традиційними методами, можуть спричинити відсутності в теоретичних розв'язках певних режимів в реальних електричних мережах.

Мета статті полягає в розробці нелінійної динамічної математичної моделі для аналізу перехідних процесів в електромагнітних трансформаторах напруги та оцінювання комутаційних перенапруг у розподільних електричних мережах, які необхідні для підбору конкретного трансформатора напруги для певної електричної мережі.

**Основні матеріали дослідження.** З метою вирішення поставленого завдання досліджуємо перенапруги, що виникають на елементах самої спрощеної схеми заміщення трансформатора напруги, при перехідних процесах при поступовому ускладненні даної системи і аналізі чинників, що впливають на величину перенапруг, тривалість та інші параметри перехідних процесів.

Самою спрощеною схемою трансформатора напруги можливо вважати еквівалентну схему заміщення котушки з лінійною індуктивністю  $L$ , активним опором котушки  $R_1$  і навантаженням  $R_2$  (рис.1).

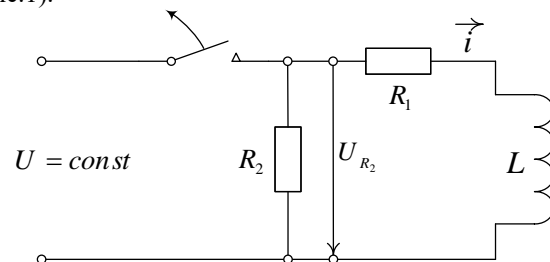


Рисунок 1 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні паралельно включених лінійної індуктивності і навантаження від джерела постійної напруги

Враховуючи те, що перехідні процеси містять вимушену і вільну складові досліджуємо перехідні процеси в розглянутих схемах як при комутаціях від змінного синусоїдального напруги так і від постійного.

Розглянемо перехідний процес відключення паралельно включених котушки з лінійною індуктивністю  $L$ , опором обмотки  $R_1$  і еквівалентного навантаження трансформатора напруги  $R_2$  від джерела постійної напруги  $U$ . Вважаємо, що зазначена навантаження трансформатора напруги носить чисто активний характер.

Миттєве значення струму в відключеному колі і напругу  $U_{R_2}$  на опорі  $R_2$  буде змінюватися за такими залежностями

$$i(t) = \frac{U}{R_1} e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}, \quad U_{R_2}(t) = U \frac{R_2}{R_1} e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}, \quad (1)$$

$$i(0) = \frac{U}{R_1}, \quad U_{R_2}(0) = U \frac{R_2}{R_1}. \quad (2)$$

Аналіз виразу (2) показав, що в момент відключення напруга на опорі навантаження, буде відрізнятися від напруги джерела  $U$ , яке до розмикання було докладено до моделі трансформатора напруги, в  $\frac{R_2}{R_1}$  рази. Виходячи з цього можливо зробити висновок

про те, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності (як і на обмотках трансформаторів напруги) залежить не тільки від величини активного опору навантаження, як це прийнято у всіх відомих дослідженнях ([8] тощо), але, більшою мірою, від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки.

На наступному етапі розглянемо перехідний процес відключення котушки з лінійною індуктивністю  $L$  і опором обмотки  $R_1$  від джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  (рис.2).

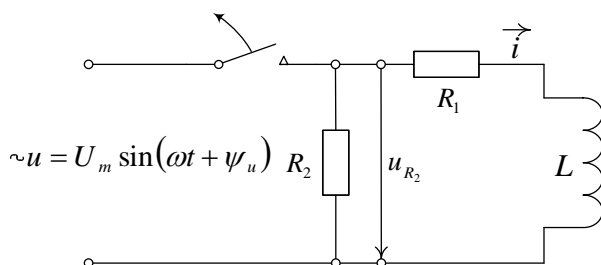


Рисунок 2 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні паралельно включених лінійної індуктивності і навантаження від джерела синусоїдальної напруги

За умови, що перехідна складова, пов'язана з включенням всього ланцюга до моменту відключення

загасне, напруга на навантаженні  $R_2$  після відключення дорівнюватиме:

$$u_{R_2}(t) = \frac{U_m R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1}) e^{-\frac{R_1+R_2}{L}t}. \quad (3)$$

Напругу на навантаженні  $R_2$  в момент відключення можливо визначити за наступним виразом:

$$u_{R_2}(0) = \frac{U_m R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1}). \quad (4)$$

Напруга на навантаженні  $R_2$  буде максимальною в момент відключення за умови:

$$\psi_u - \arctg \frac{\omega L}{R_1} = \pm \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Аналіз виразу (5) дозволяє дійти висновку про те, що в залежності від моменту відключення ( $\psi_u$ ) на навантаженні  $R_2$  може виникнути перенапруга, величина якої в  $\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}$  рази більше амплітуди напруги до відключення.

Більш складні процеси будуть мати місце в системі у разі використання в ній нелінійної індуктивності. За аналогією з попередніми дослідженнями розглянемо перенапруги, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги в схемі, наведеній на рис. 3.

При виведенні співвідношень зневажаємо індуктивністю розсіювання, втратами на гістерезис та вихрові струми.

Згідно висновків, приведених у [9] нелінійність для прийнятого об'єкта дослідження найбільш адекватно апроксимувати гіперболічним синусом.

$$H = \alpha \operatorname{sh} \beta B_D = \alpha \operatorname{sh} B, \quad (6)$$

де  $H, B_D, \alpha, \beta$  - відповідно миттєве значення напруженості, дійсної індукції магнітного поля в осердді і коефіцієнти апроксимації, які для зазначеного об'єкта були обґрунтовані у [6];

$$B = \beta B_D.$$

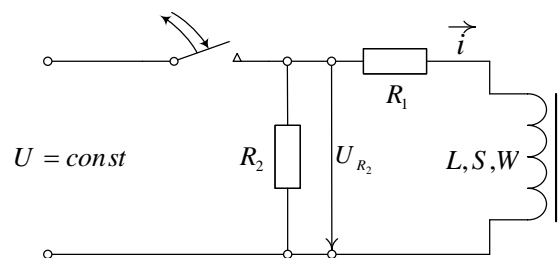


Рисунок 3 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги

Рівняння електричного кола до відключення від джерела постійної напруги  $U$ , згідно прийнятих на рис. 3 позначень, буде мати вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = by, \quad (7)$$

де  $y = e^b$ ,  $a = \frac{R_1 \alpha \beta l}{2SW^2}$ ,  $b = U \frac{\beta}{SW}$

Рішення рівняння (7) матиме вигляд:

$$y = e^b = \frac{y_1 e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2 C}{e^{a(y_1 - y_2)t} - C}, \quad (8)$$

де  $y_1, y_2$  - корені рівняння

$$ay^2 - by - a = 0. \quad (9)$$

Рішення (8) рівняння (7) при початкових умовах

$$i(0) = B(0) = 0 \quad y(0) = I$$

буде мати вигляд

$$y = e^b = \frac{y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)}{(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)}, \quad C = \frac{y_1 - I}{y_2 - I}. \quad (10)$$

Згідно (10) згасання вільної складової визначається виразом:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{-a(y_1 - I)(y_2 - I)(y_1 - y_2)^2 e^{a(y_1 - y_2)t}}{[(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)] \cdot [y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)]}, \quad (11)$$

достовірність якого підтверджується дотриманням початкових умов:

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U\beta}{SW} = b \quad \left. \frac{dB}{dt} \right|_{t \rightarrow \infty} = 0. \quad (12)$$

Тому, вираз для миттєвого значення струму в нелінійній індуктивності згідно (11) буде мати вигляд:

$$i(t) = \frac{U}{R_1} + \frac{SW}{R_1 \beta} \times \frac{a(y_1 - I)(y_2 - I)(y_1 - y_2)^2 e^{a(y_1 - y_2)t}}{[(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - (y_1 - I)] \cdot [y_1(y_2 - I)e^{a(y_1 - y_2)t} - y_2(y_1 - I)]}. \quad (13)$$

Згідно (13) у момент включення  $i$  в сталому режимі:

$$i(0) = 0 \quad i(\infty) = \frac{U}{R_1}. \quad (14)$$

Рівняння електричного кола після відключення нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги  $U$  має вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = 0, \quad (15)$$

де  $y = e^B$ ,

$$a = \frac{(R_1 + R_2)\alpha\beta l}{2SW^2}.$$

Рішення рівняння (15) має вигляд:

$$y = e^B = \frac{e^{2at} + C}{e^{2at} - C}. \quad (16)$$

Враховуючи те, що  $i_0, B_{OD}$  - відповідно миттєве значення струму і індукція магнітного поля в нелінійній індуктивності в момент відключення  $t_0$ , можливо записати:

$$\beta B_{OD} = B_0 = \text{arshi} \frac{W}{\alpha l}. \quad (17)$$

Рішення рівняння (16) при початкових умовах  $y_0 = e^{B_0}$  буде мати вигляд:

$$y = \frac{(y_0 + I)e^{2at} + (y_0 - I)}{(y_0 + I)e^{2at} - (y_0 - I)} \quad C = \frac{y_0 - I}{y_0 + I}. \quad (18)$$

Виходячи з (18) можливо визначити:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{-4a(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{[(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2]}. \quad (19)$$

Вираз для миттєвого значення струму після відключення нелінійної індуктивності від джерела постійної напруги  $U$  згідно (19) буде мати вигляд:

$$i(t) = \frac{4SWa(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{\beta(R_1 + R_2)[(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2]}. \quad (20)$$

Згідно (20) у момент відключення  $i$  в сталому режимі:

$$i(t_0) = i_0, \quad i(\infty) = 0. \quad (21)$$

Якщо до моменту відключення ( $t_0$ ) перехідний процес, пов'язаний із включенням всієї схеми не був загашений, тоді струм визначається за виразом  $i_0 = U/R_1$ . У першому і в другому випадках напруга на  $R_2$  визначаються відповідно за формулами:

$$u_{R_2}(t_0) = i_0(t_0)R_2, \quad u_{R_2}(0) = U \frac{R_2}{R_1}. \quad (22)$$

Досліджуємо перенапруги, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\alpha t + \psi_U)$  в схемі, наведеній на рис. 4.

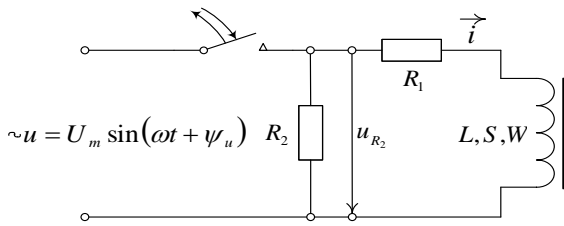


Рисунок 4 – Схема для дослідження перенапруг, що виникають при відключенні нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги.

Рівняння електричної ланки до відключення буде мати вигляд:

$$\frac{dy}{dt} + a(y^2 - I) = by \sin(\omega t + \psi_U). \quad (23)$$

Запишемо рівняння (23) в асимптотичному вигляді:

$$\frac{db}{dt} + ashB = b \sin(\omega t + \psi_U), \quad (24)$$

де

$$B = \beta B_{д}, a = \frac{R_1 \alpha \beta}{SW_2}, b = \frac{U_m \beta}{SW}. \quad (25)$$

Рішення рівняння (24) для сталого режиму визначається у вигляді першої гармоніки індукції магнітного поля в осердді:

$$B = B_m \sin(\omega t + \psi), B_m = B_{мд} \beta. \quad (26)$$

Гармоніками вищих порядків припустимо зневажити, тому вони в недостатній мірі впливають на точність через те, що в ланцюгах зі сталлю при синусоїдальній напрузі джерела індукція магнітного поля в осердді найбільш близька до гармонійної функції (у порівнянні з струмом).

З урахуванням (6) миттєве значення струму в сталому режимі дорівнює:

$$i(t) = \frac{\alpha L}{W} sh[B_m \sin(\omega t + \psi)] \quad (27)$$

Припустимо, в момент відключення  $t_0$  індукція магнітного поля в осердді дорівнює  $B(t_0) = B_m \sin(\alpha \omega t_0 + \psi)$ , тоді, напруга в даній схемі на опорі  $R_2$ , згідно (20) буде змінюватися у відповідності з наступним виразом:

$$u_{R2}(t) = \frac{2\alpha L}{W} R_2 \left[ \frac{(y_0 + I)(y_0 - I)e^{2at}}{(y_0 + I)^2 e^{4at} - (y_0 - I)^2} \right], \quad (28)$$

де

$$y_0 = \exp[B_m \sin(\alpha \omega t_0 + \psi)] \quad (29)$$

У момент відключення напруги на опорі  $R_2$ , згідно (27), (28) дорівнюватиме:

$$u_{R2}(t_0) = \frac{\alpha L R_2}{W} sh[B_m \sin(\alpha \omega t_0 + \psi)] \quad (30)$$

Напруга на опорі  $R_2$  буде максимальним в тому випадку, якщо відключення нелінійної індуктивності від джерела синусоїдальної напруги сталося в момент часу відповідний  $\alpha \omega t_0 + \psi = \pi / 2$ . В цьому випадку:

$$U_{R2max} = \pm R_2 \frac{\alpha L}{W} sh 2B_m. \quad (31)$$

Аналіз останніх виразів дозволяє зробити висновок про те, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення, що знайшло підтвердження по результатам аналізу записів фіксуючих пристроїв під час аварійних процесів у електричних мережах АТ «Харківобленерго». У цьому випадку індукція магнітного поля в осердді може досягти приблизно подвоєного значення. З цієї причини використання методів з короткочасного шунтування навантаження трансформаторів напруги найбільш ефективно в тих випадках, коли відключення трансформаторів напруги відбувається в моменти часу, при яких попередній перехідний процес (наприклад, попереднього включення зазначеного напруги) ще повною мірою не завершений, і мають місце не нульові початкові умови.

**Висновки:**

1. Визначено математичні вирази для обчислення параметрів переходних процесів и перенапруг, що виникають при отключении линейных и нелинейных индуктивностей от источников постоянного и синусоидального напряжений.

2. Обґрунтовано висновок про те, що рівень можливих перенапруг на котушці індуктивності, обмотках трансформаторів напруги залежить не тільки від величини активного опору навантаження, але, більшою мірою, від співвідношення активних опорів навантаження котушки індуктивності (або трансформатора напруги) і самої обмотки.

3. Обґрунтовано висновок про те, що в залежності від моменту відключення на навантаженні може виникнути перенапруга, величина якої в  $\frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}$

рази більше амплітуди напруги до відключення джерела синусоїдальної напруги.

4. Доведено, що найбільш важким випадком з точки зору величин перенапруг є той, при якому включення електричного ланцюга з індуктивністю відбувається в момент часу, коли перехідна складова індукції змушена компенсувати максимальне значення індукції сталого режиму, а відключення відбувається через пів періоду після включення.

5. Розроблено рекомендацію щодо найбільш ефективного використання методів з короткочасного

шунтування навантаження трансформаторів напруги, які найкраще всього можуть ефективно компенсувати перенапруги при перехідних процесах з ненульовими початковими умовами.

#### Список литературы

1. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению // Світлотехніка та електроенергетика. Харків: ХНАМГ. – 2003. - № 1. с.75-81.
2. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Горбатський А.А. Моделирование та розробка пристроїв захисту трансформаторів напруги 6..35 кВ // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2000. – № 403 – С. 51-55.
3. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Варецкий Ю.О., Мединський Р.В. Нерезонуючі трансформатори напруги для мереж з ізольованою нейтраллю // Новини енергетики. – 2000. – № 6. – С. 37-40.
4. Ганус А.И., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 2. – С. 5-12.
5. Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Влияние дрейфа магнитных характеристик трансформаторов напряжения 6(10) кВ на характер протекания феррорезонансных процессов // Техническая электродинамика, тематический выпуск: "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2006. – ч. 5. – С. 94-99.
6. Ганус А.И. Экспериментальное определение границ областей возможных затухающего и незатухающего феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтраллю с трансформаторами напряжения // Светотехника и электроэнергетика. – 2006. – № 7-8. – С. 77-85.
7. Тугай Ю.І., Ганус О.І., Старков К.О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги // Технічна електродинаміка – 2016. - № 5. – с. 73-75.
8. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Равлик О.М., Мединський Р.В. Захист трансформаторів напруги від надструмів під час дугових замикань фази на землю в мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю // Энергетика и Электрификация. – 2001. - №6. С.21-26.
9. Ганус О.І., Говоров П.П., Старков К.О. Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen (Перенапруги в електричних мережах з трансформаторами напруги. Ефективність заходів з захисту Поступила (received) 10.08.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ганус Олексій Іванович (Ганус Алексей Иванович, Ganus Alexey Ivanovich)** – кандидат технічних наук, технічний директор АТ «Харківобленерго», м. Харків; тел. (057) 740-15-13; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2935-8674>; e-mail: hanus.oleksii@obl.kh.energy.gov.ua

**Старков Костянтин Олександрович (Старков Константин Александрович, Starkov Konstantin Alexandrovich)** – кандидат технічних наук, головний фахівець - начальник сектору з електротехнічних питань управління виробничо-технічної політики та нагляду за експлуатацією обладнання АТ «Харківобленерго», м. Харків; тел. (057) 740-12-68; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9443-9484>; e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua

**Черкашина Вероніка Вікторівна (Черкашина Вероника Викторовна, Cherkashyna Veronika Viktorivna)** – доктор технічних наук, доцент кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

обладнання) // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 336 с.

#### References (transliterated)

1. Ganus A.I., Starkov K.A. Povrezhdaiemost' transformatorov napryazheniya v oblastnykh elektricheskikh setyakh AK «Khar'kovoblenenergo» i meropriyatiya po yeyo snizheniyu // Svitlotekhnika ta yelektroyenergetika. Kharkiv: KHNAMG. – 2003. - № 1. s.75-81.
2. Zhurakhivs'kyu A.V., Kens YU.A., Horbat-s'kyu A.A. Modelyuvannya ta rozrobka prystroyiv zakhystu transformatoriv napruhy 6..35 kV // Visnyk NU "Lvivs'ka politekhnika". – 2000. – № 403 – S. 51-55.
3. Zhurakhivs'kyu A.V., Kens YU.A., Varets'kyu YU.O., Medyns'kyu R.V. Nerezonuyuchi transformatory napruhy dlya merezh z izol'ovanoyu neytrallyu // Novyny enerhetyky. – 2000. – № 6. – S. 37-40.
4. Ganus A.I., Starkov K.A. Vliyaniye usloviy perekhodnykh protsessov v elektricheskikh setyakh 6-10 kV na kharakter povrezhdeniy transformatorov napryazheniya // Yenergetika ta yelektifikatsiya. – 2006. – № 2. – S. 5-12.
5. Govorov F.P., Ganus A.I., Starkov K.A. Vliyaniye dreyfa magnitnykh kharakteristik transformatorov napryazheniya 6(10) kV na kharakter protekaniya ferrozonansnykh protsessov // Tekhnicheskaya elektrodinamika, tematicheskii vypusk: "Silovaya elektronika i energoeffektivnost'". – 2006. – ch. 5. – S. 94-99.
6. Ganus A.I. Eksperimental'noye opredeleniye granits oblastey vozmoznykh zatukhayushchego i nezatukhayushchego ferrozonansnykh protsessov v elektricheskikh setyakh s izolirovannoyu neytrallyu y transformatorami napryazheniya // Svetotekhnika i elektroenergetika. – 2006. – № 7-8. – S. 77-85.
7. Tuhay Yu.I., Hanus O.I., Starkov K.O. Komutatsiyni perenapruhy u transformatorakh napruhy // Tekhnichna elektrodynamika – 2016. - № 5. – s. 73-75.
8. Zhurakhivs'kyu A.V., Kens YU.A., Ravlyk O.M., Medyns'kyu R.V. Zakhyst transformatoriv napruhy vid nadstrumiv pid chas duhovyykh zamykan' fazy na zemlyu v merezhi 10 kV z izol'ovanoyu neytrallyu // Enerhetyka y Elektrifykatsyya. – 2001. - №6. S.21-26.
9. Hanus O.I., Hovorov P.P., Starkov K.O. Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen (Perenapruhy v elektrychnykh merezhakh z transformatoramy napruhy. Efektivnist' zakhodiv z zakhystu obladnannya) // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 336 s.

**О. Г. ГРИБ, Н. С. ЗАХАРЕНКО, І. Т. КАРПАЛЮК, Н. В. РУДЕВИЧ, С. В. ШВЕЦЬ**

### **МОНІТОРИНГ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ**

У статті розглядаються питання якості електричної енергії. Підкреслено що вимоги до якості зростають у всьому світі і Україні приходиться також закріплювати високі вимоги до якості. І саме якість електричної енергії є ключовою для забезпечення як якості продукції так і досягнення мінімальних показників собівартості продукції. Для забезпечення якості електричної енергії все частіше використовуються елементи цифрових технологій в технологічних процесах і системах енергетичного комплексу. Тенденція енергетичних технологій – це використання цифрових технологій для управління і підтримання відповідних параметрів. Але в той же час виникають нові вимоги до систем діагностики і збору даних. Бо тепер це можливість обробляти безперервні потокові дані різними рівнями системи. Тому розвиток технологій діагностики вписується в вимоги розвитку сучасних енергосистем. В роботі виділено напрям дослідження параметрів що пов'язані із коронним розрядом. Проведено паралель коронний розряд і якість. Розглядаються тільки ті якісні параметри, які мають зв'язок із наслідками впливу коронного розряду. Тому були наведені методи по визначенню наявності коронного розряду на струмоведучих частинах обладнання. Зверталася увага на непрямі методи визначення коронного розряду. А це визначення по ультрафіолетовому випромінюванню, інфрачервоному випромінюванню. Наведені недоліки зазначених методів. Пропонується метод який розроблено на кафедрі Автоматизації та кібербезпеки енергосистем, метод побудовано на акустичних коливаннях які створює коронний розряд. Метод отримав назву спектроакустичного. Було виконано ряд експериментів в малому високовольтному електричному залі (лабораторія НТУ «ХПІ»). Експеримент дав позитивний результат. Експерименти виконувалися для різних напруг коронного розряду. Отримані акустичні файли оброблялися в математичному середовищі MATLAB. Акустичні файли розкладалися на спектр за допомогою методів швидкого перетворення Фур'є. Отримані частотні спектри дозволили виявити набір ліній що притаманні тільки коронному розряду. В роботі наведені графіки частотних спектрів акустичного сигналу що містить шум від коронного розряду. На яких простежена закономірність частотної маски для коронного розряду. Таким чином підтверджена гіпотеза, про визначеність акустичних спектрів для коронного розряду. Автори звертають увагу на перспективність запропонованого методу діагностики наявності коронного розряду.

**Ключевые слова:** цифрова енергетика; діагностика мережі; якість електричної енергії; коронний розряд в мережі; акустична діагностика; спектральний аналіз; спектральні лінії коронного розряду

**О. Г. ГРИБ, Н. С. ЗАХАРЕНКО, И. Т. КАРПАЛЮК, Н. В. РУДЕВИЧ, С. В. ШВЕЦЬ**

### **МОНІТОРИНГ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

В статье рассматриваются вопросы качества электрической энергии. Подчеркнуто что требования к качеству растут во всем мире и Украине приходится также закреплять высокие требования к качеству. И именно качество электрической энергии является ключевым для обеспечения как качества продукции так и достижения минимальных показателей себестоимости продукции. Для обеспечения качества электрической энергии все чаще используются элементы цифровых технологий в технологических процессах и системах энергетического комплекса. Тенденция энергетических технологий – это использование цифровых технологий для управления и поддержания соответствующих параметров. Но в то же время возникают новые требования к системам диагностики и сбора данных. Ибо это возможность обрабатывать непрерывные потоковые данные различными уровнями системы. Поэтому развитие технологий диагностики вписывается в требования развития современных энергосистем. В работе выделено направление исследования параметров связанных с коронным разрядом. Проведена паралель коронный разряд и качество. Рассматриваются только те качественные параметры, которые имеют связь с последствиями воздействия коронного разряда. Поэтому были приведены методы по определению наличия коронного разряда на токоведущих частях оборудования. Обращалось внимание на косвенные методы определения коронного разряда. А это определение по ультрафиолетовому излучению, инфракрасному излучению. Приведены недостатки указанных методов. Предлагается метод разработанный на кафедре автоматизации и кибербезопасности энергосистем, метод построен на акустических колебаниях которые создает коронный разряд. Метод получил название спектроакустичного. Был выполнен ряд экспериментов в малом высоковольтном электрическом зале (лаборатория НТУ «ХПІ»). Эксперимент дал положительный результат. Эксперименты выполнялись для различных напряжений коронного разряда. Полученные акустические файлы обрабатывались в математической среде MATLAB. Акустические файлы раскладывались на спектр с помощью методов быстрого преобразования Фурье. Полученные частотные спектры позволили выявить набор линий присущих только коронному разряду. В работе приведены графики частотных спектров акустического сигнала содержащий шум от коронного разряда. На которых прослежена закономірность частотної маски для коронного разряда. Таким образом подтверждена гипотеза о определенных акустических спектрах для коронного разряда. Авторы обращают внимание на перспективность предложенного метода диагностики наличия коронного разряда.

**Ключові слова:** цифрова енергетика; діагностика мережі; якість електричної енергії; коронний розряд в мережі; акустична діагностика; спектральний аналіз; спектральні лінії коронного розряду

**O. GRYB, N. ZAKHARENKO, I. KARPALIUK, N. RUDEVICH, S. SHVETS**

### **MONITORING OF QUALITY INDICATORS BY ACOUSTIC METHOD**

The article deals with the issues of electricity quality. It is emphasized that quality requirements are increasing all over the world and Ukraine also has to secure high quality requirements. And it is the quality of electricity that is key to ensuring both the quality of products and the achievement of minimum cost indicators. Elements of digital technologies in technological processes and systems of energy complex are increasingly used to ensure the quality of electricity. The trend of energy technologies is the use of digital technologies to manage and maintain appropriate parameters. But at the same time, there are new requirements for diagnostic and data collection systems. It is now an opportunity to process continuous streaming data at different levels of the system. Therefore, the development of diagnostic technologies fits into the requirements of the development of modern energy systems. In this work the direction of investigation of parameters related to the corona discharge is highlighted. Parallel discharge and quality are drawn. Only those qualitative parameters that are related to the effects of corona discharge are considered. Therefore, methods for determining the presence of a corona

discharge on the current-carrying parts of the equipment were presented. Attention was drawn to indirect methods of determining the corona discharge. And this is the definition of ultraviolet radiation, infrared radiation. The disadvantages of these methods are presented. The method developed at the Department of Automation and Cyber Security of Power Systems is proposed. The method was called spectroacoustic. A number of experiments were performed in a small high-voltage electrical room (NTU "KPI" laboratory). The experiment gave a positive result. The experiments were performed for different corona discharge voltages. The resulting acoustic files were processed in MATLAB. Acoustic files were decomposed into the spectrum by Fourier transform methods. Obtained frequency spectra revealed a set of lines that are specific only to the corona discharge. The work presents the graphs of the frequency spectra of the acoustic signal containing the noise from the corona discharge. On which the pattern of frequency mask for corona discharge is traced. Thus, the hypothesis of the determination of the acoustic spectra for the corona discharge is confirmed. The authors draw attention to the perspective of the proposed method for the diagnosis of coronary discharge.

**Keywords:** digital energy; network diagnostics; quality of electric energy; corona discharge in the network; acoustic diagnostics; spectral analysis; spectral lines of corona discharge

**Вступ.** Забезпечення належного рівня якості електричної енергії не тільки вимога часу а й основа розвитку сучасної економіки. Випуск якісних товарів базується на сучасних технологіях. Але всі технологічні процеси виконують роботу і керуються системами за допомогою і на основі електричної енергії. Тому якість електричної енергії є ключовою для забезпечення як якості продукції так і досягнення мінімальних показників собівартості продукції. Для забезпечення якості електричної енергії все частіше використовуються елементи цифрових технологій в технологічних процесах і системах енергетичного комплексу. Найпотужніші компанії енергетичної сфери розробляють цифрові системи, модулі і навіть пропонують повністю цифрові рішення в вигляді цифрових підстанцій. Відповідно і цифрові рішення вимагають нових підходів до оцінки таких систем. І без моніторингу енергосистеми такої мети не можливо досягти. Розвиток технологій діагностики вписується в вимоги розвитку сучасних енергосистем.

**Мета роботи.** Показати тенденції розвитку діагностичних методів в енергетиці в напрямку діагностики наявності коронного розряду спектрально акустичним методом.

Тобто наявність коронного розряду до цього часу пов'язували із різними прямими (заміри форма напруги) і непрямими наслідками (наявність ультрафіолетового і теплового випромінювання). Авторами пропонується використовувати метод фіксації акустичних коливань, що супроводжують коронний розряд [1-8].

Окреме питання – вплив наявності коронного розряду на якісні показники електричної енергії. Більшість авторів пов'язують втрати в мережі саме із коронним розрядом і такий погляд на наявність коронного розряду є сталим. Але автори запропонували відокремити в погіршенні якості вплив від ефектів коронного розряду. І з такої позиції діагностика наявності коронного розряду набула нових вимог. Відповідно розробка нових діагностичних методів виявлення коронного розряду стає дуже актуальною.

**Виклад основного матеріалу.** Питаннями впливу якісних параметрів електричної енергії на роботу приладів споживача займалися видатні вчені України і світу, це такі вчені як: Гриб О.Г., Жаркін А.Ф., Шидловський А.К., Сендерович Г.А., Жежеленко І. В., Саєнко Ю. Л., Anderson P. M., Fouad A. A. і інші. Ціла низка досліджень пов'язана із економічними втратами від якості електричної енергії і відповідальною стороною погіршення електричної енергії [9, 10]. Таким

чином з'ясується юридичне питання відповідності за погіршення і розробляються заходи щодо винаходження «власника» погіршення. Відповідно до чого мають вже розроблятися заходи із недопущення погіршення, або зменшення його впливу. Юридична відповідальність за погіршення дає право на фінансову відповідальність, що призводить до розробки найдієвіших заходів. Виходячи з фінансової відповідальності розробляються і технічні заходи. Технічні заходи по підвищенню якості електричної енергії можна виділити напрям діагностика і моніторингу. Так на кафедрі Автоматизації та кібербезпеки енергосистем (НТУ «ХПІ») було розроблено прилад моніторингу якості [11].

Такими діагностичними системами займаються різні лабораторії [12, 13, 14]. Напрямок їх досліджень йде по шляху неелектричної діагностики наявності коронного розряду на струмоведучих елементах. Наприклад, за основу взято побічне світлове випромінювання коронним розрядом. Були розроблені відповідні оптичні прилади і такі дослідження проводяться. Є одна проблема - потужність ультрафіолетового випромінювання коронного розряду незначна. Тому для оптичних приладів необхідно здолати не тільки фонове засвітлення, але й хибні джерела ультрафіолетового випромінювання яким може бути наприклад багаття. Діагностування коронного розряду по тепловому випромінюванню має також декілька недоліків, наприклад, нагрів елементів струмоведучих частин може бути здійснений не тільки коронним розрядом. А коронний розряд має невеликі потужності. Тому діагностика за тепловим випромінюванням може мати значну похибку.

Безпосередні електричні методи також мають декілька вад. Потужність коронного розряду не має великих значень, тому викривлення форми напруги фіксувати дуже важко.

Тому було прийнято рішення про продовження досліджень в напрямку розробки діагностичного обладнання для пошуку коронного розряду на струмоведучих елементах.

На кафедрі «Автоматизації та кібербезпеки енергосистем» було прийняте рішення про розробку методики, що має інший фізичний принцип. За досвідом експлуатації електричних систем, а особливо високовольтних ліній електропередач знаємо, що наявність коронного розряду можна почути. Людське вухо чує характерні звукові коливання притаманні коронному розряду. В малому високовольтному електричному залі (лабораторія НТУ «ХПІ») було поставлено експеримент (рис. 1). Коронний розряд отримували на струмоведучих частинах, що під'єднані



до високовольтного ізолятора (межа пробою 35 кВ). Високовольтну напругу отримували від підвищувачого трансформатора (150000/100 В).



Рисунок 1 – Ізолятор (зліва), підвищувачи трансформатор (справа)

Заміри виконувалися групою приладів фіксуючих акустичні коливання. Основним приладом був моніторний мікрофон УМІК-1 із лінійною АЧХ (рис. 2), допоміжними були малогабаритні диктофони фірм Sony Walkman NWZ-B173F і Transcend і інші.



Рисунок 2 – Мікрофон УМІК-1 з лінійною АЧХ

Отримані файли оброблялися за допомогою програми написаної на MATLAB. Файли попередньо обрізалися до необхідного розміру, в деяких випадках нормалізувалися (збільшували амплітуду за максимумами до 0 дБ).

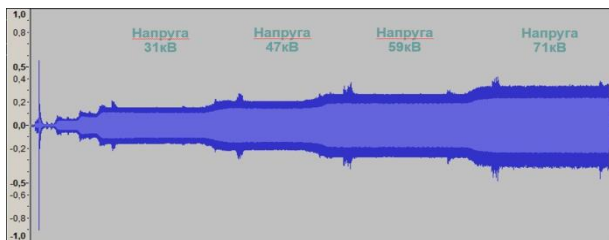


Рисунок 3 – Амплітудне представлення файлу експерименту з поступовим підвищенням напруги

Після попередньої обробки файли оброблялися швидким Фур'є перетворенням.

Якщо подивитися на період акустичних коливань по кожному рівню напруги то отримаємо майже рівну криву, яка схожа на криву напруги, що може бути знята за допомогою осцилографа. На рисунках 4, 5, 6, 7 показані амплітудні криві акустичних коливань коронного розряду в залежності від напруги.

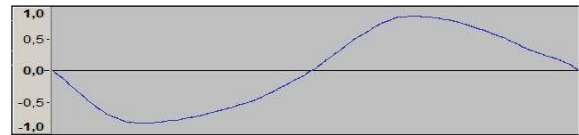


Рисунок 4 – Амплітудні криві акустичного сигналу від корони (31 кВ)

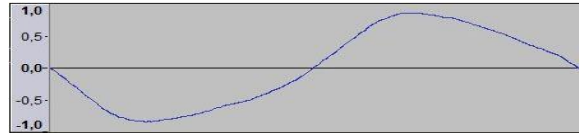


Рисунок 5 – Амплітудні криві акустичного сигналу від корони (47 кВ)

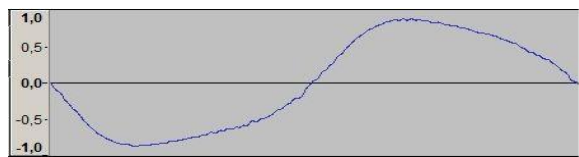


Рисунок 6 – Амплітудні криві акустичного сигналу від корони (59 кВ)

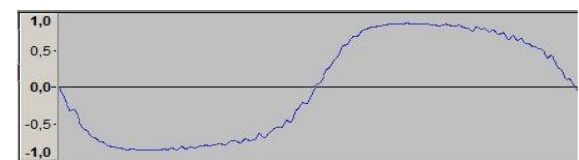


Рисунок 7 – Амплітудні криві акустичного сигналу від корони (71 кВ)

Результати обробки акустичних файлів представлено на рисунках 8-9.

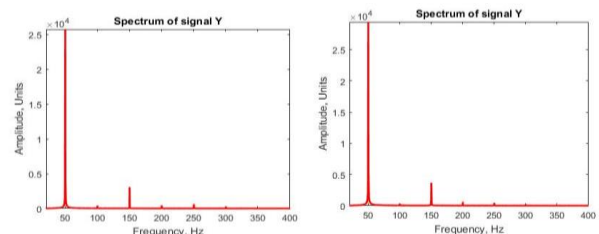


Рисунок 8 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони на різних напругах (зліва на право) 31 кВ, 47 кВ

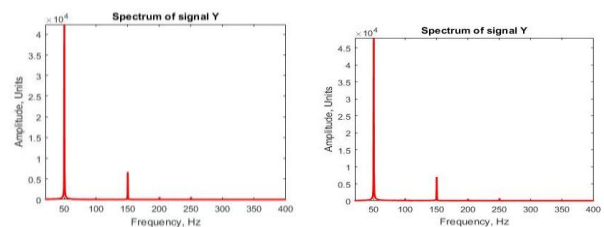


Рисунок 9 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони на різних напругах (зліва на право) 59 кВ, 71 кВ

На графіках амплітуди на частоті 50 Гц не приведені до однієї величини. Амплітуда відповідно до напруги на короні відрізняється. Тому наступні графіки наведено без частоти 50 Гц (Рисунки 10-13), на яких можна простежити закономірність частотної маски для коронного розряду. А саме це пікові значення на

частотах кратних 50 Гц. І зовсім малі значення на частотах не кратних 50 Гц. Маркер відповідності акустичного сигналу за частотою акустичного спектру вважаємо частоту 150 Гц.

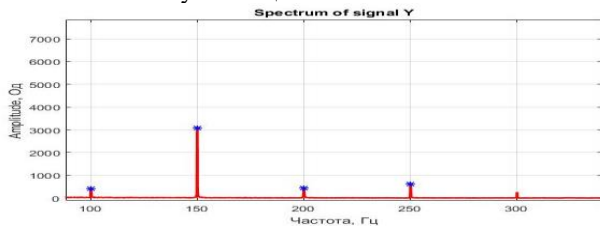


Рисунок 10 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони 31 кВ

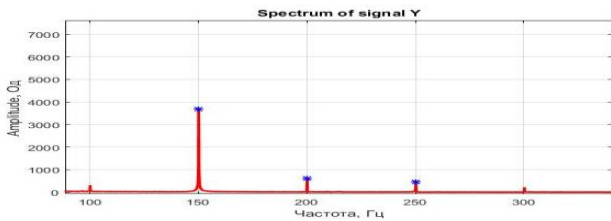


Рисунок 11 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони 47 кВ

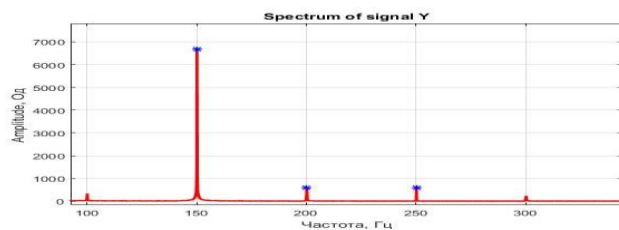


Рисунок 12 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони 59кВ

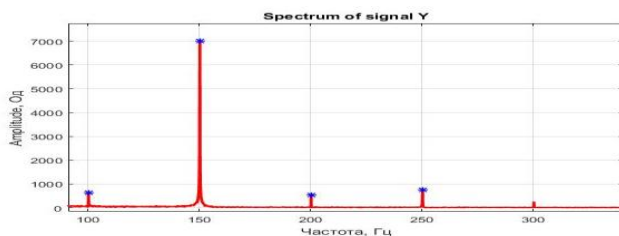


Рисунок 13 – Частотні спектри акустичного сигналу від корони 71 кВ

Таким чином можна простежити, що для коронного розряду є чітко визначена частотна маска, що відповідає частотам кратним 50 Гц, а саме 100, 150, 200, 250, 300, 350 Гц. Маркером наявності коронного розряду можна визначити частоти 150, 250 350 Гц.

**Обговорення результатів.** Обробка акустичних файлів переведених в дані часових рядів широко відома задача, яка має теоретичні вирішення. І отримала широке практичне розповсюдження. Але в рамках електричних систем використання акустичних приладів не отримало широкого розповсюдження.

Метод новий для електроенергетики, тому його може спіткати багато перешкод при застосуванні. Наприклад, акустична хвиля в просторі послаблюється за законом зворотнього кубу відстані. І відповідно мікрофон має бути розташовано як найближче до

джерела звукових коливань. Це можна оцінити як незручність і перешкоду у розвитку методу. Ситуацію може виправити наявність підсилювачів із значними коефіцієнтами підсилення. Але тоді виникає проблема із масштабуванням амплітудних значень акустичних коливань, бо амплітудні значення мають використовуватися в розрахунках потужності коронного розряду.

Інша проблема це наявність для акустичної хвилі такого явища як реверберація. Перевідбиття акустичного сигналу від перешкод. Що призведе до похибки у визначенні місця розташування коронного розряду, при діагностуванні його місцезнаходження за акустичними сигналами.

Ще одне питання – це «перекриття» інформаційного сигналу про наявність корони іншим більш амплітудним акустичним сигналом. І інші акустичні питання, які поки що не використовувалися у задачах діагностики в електроенергетиці.

Привабливість цього підходу полягає у тому, що в незалежності від місця розташування можливо визначити наявність коронного розряду з високою достовірністю. Також метод не чутливий до часу доби, пори року. Значна перевага акустичного методу полягає в електроізоляційності процесу вимірювання. Тобто можна використовувати метод на високовольтних лініях і метод не потребує фізичного контакту приладів із струмоведучими елементами системи.

В результаті використання запропонованого акустичного методу діагностики наявності коронного розряду на струмоведучих елементах енергосистеми можливо отримати дані про наявність коронного розряду в режимі реального часу, що дає змогу прийняти рішення по керуванню системою в найкоротші терміни, що дозволить зменшити втрати в системі і підвищити якість електричної енергії.

**Висновки.** Запропонований метод акустичної діагностики наявності коронного розряду отримав підтвердження на проведених експериментах в лабораторіях НТУ «ХП». Використання непрямого методу діагностики дає обнадійливі результати для подальшої роботи і для залучення широкого переліку різноманітних приладів які можуть прийняти участь в діагностуванні передаварійних і аварійних станів в електричній мережі. Окремо зазначається можливість використання цього методу для дистанційного моніторингу електричних високовольтних мереж за допомогою БПЛА.

#### Список литературы

1. Ashmarin G.V., Lelevkin V.M, Niyazaliev I.A., Tokarev A.V. The estimation of steel rope quality by a corona discharge.// 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies, Minsk, Belarus, 16-22 September, 2006, Vol.2, p. 808–811.
2. Niedbalski, Jorge. High-voltage multichannel rail gap switch triggered by corona discharge // Review of scientific Instruments, 2003, Vol. 74, Issue 7, p. 3520–3524.
3. Puchkarev, Viktor; Gundersen, Martin. Energy efficient plasma processing of gaseous emission using a short pulse discharge. // Applied Physics Letters, 1997, Vol.71, Issue 23, p.3364–3367.
4. Flagan, R.C., and Seinfeld, J.H. Fundamental of Air Pollution Engineering. 1988, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

5. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. – М.: Л: Тех. теор. издат., 1950.
6. Пик Ф. Диелектрические явления в технике высоких напряжений. – Л.: Госэнергоиздат, 1934.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987
8. Мик Дж., Крегс Дж. Электрический пробой в газах. – М.: ИЛ, 1969.
9. Качество электрической энергии. Том2. «Контроль качества электрической энергии» Под ред. Гриба О. Г. – Харьков: Монография ПП«Граф-Ікс», 2014. – 244 с.
10. Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии: Монография / [Онищенко В.А., Самойленко И.А., Гриб О.Г., Жаркин А.Ф., Васильченко В.И., Ущиповский К.В., Сендерович Г.А., Светелик А.Д., Кондратенко К.И., Довгалиук О.Н., Щербаква П.Г., Захаренко Н.С.] / Под ред. В.А. Онищенко. – Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2013. – 329 с.
11. Гриб О. Г., Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркин А. Ф., Новський В. О., Калінчик В. П., Красінський О. Л., Довгалиук О. М., Светелик О. Д. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії/ під ред. Гриба О. Г. – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.
12. Wallis, J. 2015. Making the invisible visible: UViRCO, an innovation success story. In: The 5th CSIR conference, CSIR ICC, Pretoria, South Africa, 8-9 October 2015
13. G. G. Karady, G. Besztercey and M. W. Tuominen, "Corona caused deterioration of ADSS fiber-optic cables on high voltage lines," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1438-1447, Oct. 1999.
14. Christo van der Walt "Corona discharge detection using an ultraviolet imaging camera", July 15th, 2016, Published in Articles: EE Publishers <https://www.ee.co.za/article/corona-discharge-detection-using-ultraviolet-imaging-camera.html> (Accessed 27 February 2019). (Eng)
15. Особенности излучения коронного разряда отрицательной полярности в воздухе в режиме импульсов Тричела/ В.И Карась и др. Физика плазмы, 2008, том. 34, №10, с. 1-8
16. Sokol E. I., Grib O. G., Shvets S. V. The structural and parametrical organization of elements of power supply system in the conditions of network centrism. Electrical engineering & electromechanics, 2016, no.2, pp 61-64. doi: 10/20998/2074-272X.2016.2.11
3. Puchkarev, Viktor; Gundersen, Martin. Energy efficient plasma processing of gaseous emission using a short pulse discharge. // Applied Physics Letters, 1997, Vol.71, Issue 23, p.3364–3367.
4. Flagan, R.C., and Seinfeld, J.H. Fundamental of Air Pollution Engineering. 1988, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
5. Leб L. Osnovny'e protsessy' e'lektricheskikh razriadov v gazakh. – М.: Л: Tekh. teor. izdat., 1950.
6. Pik F. Die'lektricheskie iavleniia v tekhnike vy'sokikh napriazheniï. – Л.: Gose'nergoizdat, 1934.
7. Rai`zer Iu.P. Fizika gazovogo razriada. – М.: Nauka, 1987
8. Mik Dzh., Kre`gs Dzh. E'lektricheskiï' proboi' v gazakh. – М.: IL, 1969.
9. Kachestvo e'lektricheskoi` e`nergii. Tom2. «Kontrol' kachestva e'lektricheskoi` e`nergii» Pod red. Griba O. G. – Har'kov: Monografiia PP«Graf-Iks», 2014. – 244 s.
10. Analiz i ocenka e'konomicheskikh ushcherbov ot nizkogo kachestva e'lektricheskoi` e`nergii: Monografiia / [Onishchenko V.A., Samoïlenko I.A., Grib O.G., Zharkin A.F., Vasil'chenko V.I., Ushchapovskii' K.V., Senderovich G.A., Svetelik A.D., Kondratenko K.I., Dovgaliuk O.N., Shcherbakova P.G., Zaharenko N.S.] / Pod red. V.A. Onishchenko. – Har'kov: PP «Graf-Iks», 2013. – 329 s.
11. Grib O. G., Prahovnik A. V., Tesik Iu. F., Zharkin A. F., Novs'kii' V. O., Kalintcik V. P., Krasins'kii' O. L., Dovgaliuk O. M., Svetelik O. D. Avtomatizovani sistemi obliku ta iakosti elektrichnoi` energii/ pid red. Griba O. G. – Harkiv: PP «Ranok-NT», 2012. – 516 s.
12. Wallis, J. 2015. Making the invisible visible: UViRCO, an innovation success story. In: The 5th CSIR conference, CSIR ICC, Pretoria, South Africa, 8-9 October 2015
13. G. G. Karady, G. Besztercey and M. W. Tuominen, "Corona caused deterioration of ADSS fiber-optic cables on high voltage lines," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1438-1447, Oct. 1999.
14. Christo van der Walt "Corona discharge detection using an ultraviolet imaging camera", July 15th, 2016, Published in Articles: EE Publishers <https://www.ee.co.za/article/corona-discharge-detection-using-ultraviolet-imaging-camera.html> (Accessed 27 February 2019). (Eng)
15. Osobennosti izlucheniia koronnogo razriada otricitatel'noi` poliarnosti v vozdukh v rezhime impul'sov Trichela/ V.I Karas' i dr. Fizika plazmy', 2008, tom. 34, №10, s. 1-8
16. Sokol E. I., Grib O. G., Shvets S. V. The structural and parametrical organization of elements of power supply system in the conditions of network centrism. Electrical engineering & electromechanics, 2016, no.2, pp 61-64. doi: 10/20998/2074-272X.2016.2.11

#### References (transliterated)

Поступила (received) 12.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Gryb Oleg)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>; e-mail: [oleg47gryb@gmail.com](mailto:oleg47gryb@gmail.com).

**Захаренко Наталя Сергіївна (Захарченко Наталья Сергеевна, Zakharenko Natalia)** – кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки підприємств, Державний вищий навчальний заклад "Приазовський державний технічний університет", м. Маріуполь, Україна ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7963-1080>; e-mail: [zakharenko.natalia@gmail.com](mailto:zakharenko.natalia@gmail.com).

**Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Karpaliuk Ihor)** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизація та кібербезпека енергосистем, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: [humpway@gmail.com](mailto:humpway@gmail.com).

**Рудевич Наталія Валентинівна (Рудевич Наталья Валентиновна, Rudevich Natalya)** – доктор педагогічних наук, професор кафедри автоматизація та кібербезпека енергосистем, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: [n.rudevich@ukr.net](mailto:n.rudevich@ukr.net).

**Швец Сергій Вікторович (Швец Сергей Викторович, Shvets Sergiy)** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизація та кібербезпека енергосистем, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: [se55sh32@gmail.com](mailto:se55sh32@gmail.com).

УДК 621.311.4-742

*О. В. ГУНДЕРТАЙЛО, О. А. ДАНИЛОВА, Л. І. ЛИСЕНКО***РЕКОНСТРУКЦІЯ ПІДСТАНЦІ «ЮВІЛЕЙНА» З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ ЛИСИЧАНСЬКОГО ЕНЕРГОВУЗЛА**

У статті розглянуто проблему забезпечення надійності електропостачання споживачів північної частини Луганської області, в тому числі її Лисичанського енергетичного вузла. Проаналізовано роботу Луганської ТЕС, що працює сьогодні за схемою «острову» із зниженою генерацією та забезпечує електропостачання лише прилеглих споживачів з низькою надійністю з-за пошкоджень ліній видачі потужності внаслідок бойових дій та неможливості відновлення паралельної роботи з системою України. Обґрунтовано необхідність будівництва нової ПС 500/220/35 кВ «Кремінська», яка надасть можливість відновити надійне енергопостачання споживачів цього регіону, а також вилучити його з режиму «енергетичного острова», дозволить синхронізувати область з Об'єднаною енергетичною системою України. Надано варіанти реконструкції відкритого розподільчого устаткування ПС 220 кВ «Ювілейна» у зв'язку з підключенням двох нових повітряних ліній.

**Ключові слова:** будівництво нової підстанції, реконструкція відкритого розподільчого устаткування, ПС «Кремінська», енергетичний острів, Луганська ТЕС, надійність електропостачання

*А. В. ГУНДЕРТАЙЛО, Е. А. ДАНИЛОВА, Л. И. ЛЫСЕНКО***РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОДСТАНЦИИ «ЮБИЛЕЙНАЯ» С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЛИСИЧАНСКОГО ЭНЕРГОУЗЛА**

В статье рассмотрена проблема с обеспечения надежности электроснабжения потребителей северной части Луганской области, в том числе Лисичанского энергетического узла. Проанализировано работу Луганской ТЭС, которая работает сегодня в режиме «энергетического острова» со сниженной генерацией и обеспечивает только часть потребителей из-за поврежденных линий электропередач вследствие боевых действий и невозможности восстановления параллельной работы с системой Украины. Обоснована необходимость строительства новой ПС 500/220/35 кВ «Кременская», которая даст возможность восстановить надежное электроснабжение потребителей и вывести регион из островного режима, синхронизовал его с Объединенной энергетической системой Украины. Представлены варианты реконструкции открытого распределительного устройства ПС 220 кВ «Юбилейная», необходимой в связи с подключением двух новых линий.

**Ключевые слова:** строительство новой подстанции, реконструкция открытого распределительного устройства, ПС «Кременская», энергетический остров, Луганская ТЭС, надежность электроснабжения

*О. V. HUNDERTAILO, O. A. DANYLOVA, L. I. LYSENKO***“YUVILEINA” SUBSTATION RECONSTRUCTION AIMING AT POWER SUPPLY RELIABILITY INCREASE FOR LISICHANSK ENERGY ISLAND CONSUMERS**

The article considers a power supply reliability problem to consumers in the northern part of Lugansk region including the Lisichansk energy hub. Lugansk thermal power plant operation is analyzed, the plant currently operating in an “energy island” mode with reduced generation and only providing power to part of consumers because of damage of power lines and inability to restore parallel operation with the Ukrainian system. The necessity of building a new substation 500/220/35 kV “Kremenskaya” is substantiated, which will make it possible to restore reliable power supply of consumers and remove the region from the island mode by synchronizing it with the United Power System of Ukraine. Variants for 220 kV “Yuvileina” substation outdoor switchgear reconstruction required due to connecting two new lines are presented.

**Keywords:** new power substation building, open switchgear reconstruction, “Kremenskaya” substation, energy island, Lugansk thermal power plant, power supply reliability

**Вступ.** На території південної частини Луганської області розпочато будівництво нової ПС 500/220 кВ «Кремінська» у відповідності із дорученням віце-прем'єр-міністра України – міністра регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України Зубка Г.Г. за результатами наради з вирішення актуальних питань Луганської області, що відбулася 30.10.15 р. [1].

Необхідність будівництва цієї підстанції обумовлена тим, що внаслідок бойових дій на території Донбаського регіону України сталися чисельні пошкодження магістральних та розподільчих електричних мереж, генеруючих джерел. Це призвело до суттєвого зниження надійності електропостачання споживачів північної частини Луганської області, в тому числі її Лисичанського енерговузла, де

розташовано: багато-чисельні комунально – побутові споживачі; бюджетно-формуєми потужні промислові підприємства; електротранспорт та ін.

Схема електропостачання споживачів півночі Луганської області сформована на напрузі 220 кВ та орієнтована на отримання електроенергії від шин 110 кВ ПС «Лисичанська» та ПС «Ювілейна». Обладнання та будівельні конструкції обох підстанцій характеризується високим ступенем зносу.

На ПС «Ювілейна» встановлено два АТ 220/110 кВ потужністю по 250 МВА. Між ПС 220 кВ «Лисичанська» та ПС 220 кВ «Ювілейна» збудовано мережу 110 кВ, до якої безпосередньо підключені підстанції потужних споживачів та генеруючі джерела, в тому числі Северодонецька ТЕЦ – 1 та ТЕЦ – 2, Рубежанський ХК та Рубежанські ТЕЦ – 1, ТЕЦ – 2, ЗАТ «Лінік» з власною ТЕЦ, підприємство «Азот» та ін.

© О.А. Данилова, О. В. Гундерттайло, Л.І.Лисенко 2019

Основними джерелами електроенергії розглядаемого регіону є:

- Луганська ТЕС (рис.1);
- ПС 330/220 кВ «Михайлівка», в дійсний час на території, що не підконтрольна Україні (рис.2).

Регіон також отримувач електроенергії від Вуглегірської ТЕС, ПС 500/220 кВ «Новодонбаська» та ПС 330/220 кВ «Чайкино» [2].

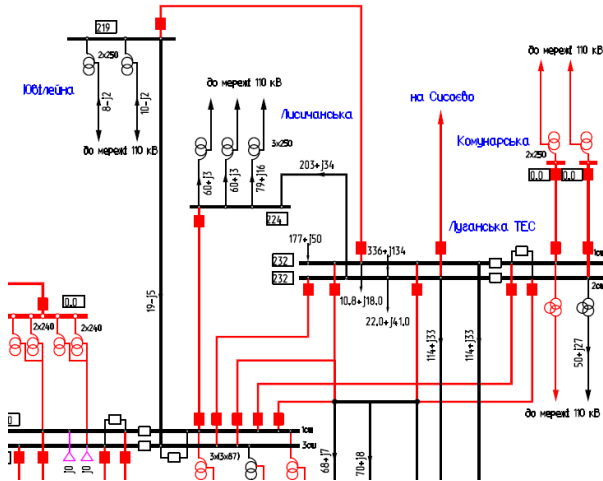


Рисунок 1 – Видача потужності ЛуТЭС

Незважаючи на надійність збудованої схеми магістральних та розподільчих мереж північного регіону Луганської області, проблеми з забезпеченням електроенергією споживачів регіону виникали за умови зниженої режимної генерації ЛуТЭС, а також при пошкодженнях шин 220 кВ ПС 330/220 кВ «Михайлівка», що призводило до знеструмлення споживачів прилеглої району.

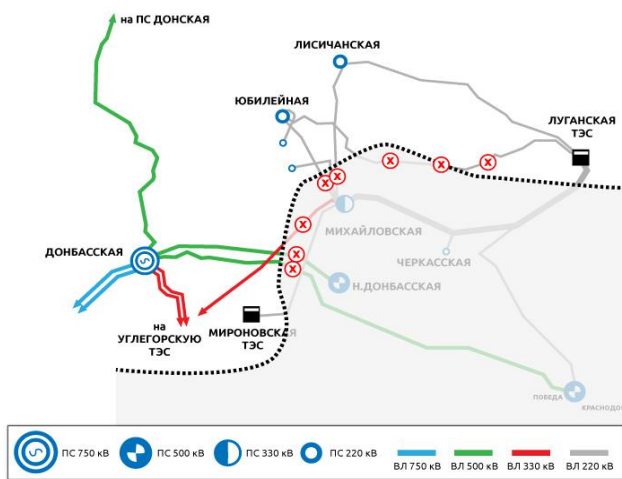


Рисунок 2 – Лінія розмежування

Аналіз потокорозподілу в зимовий період 2015р. в мережах Луганського енергівузла показує, що видача потужності Луганської ТЭС з режимною генерацією 513 МВт (3 енергоблоки по 200 МВт) здійснювалася по:

- ПЛ 220 кВ на ПС «Лисичанська» з завантаженням лінії потоком потужності 203 МВт;
- двом ланцюгам на «тупикову» ПС 220 кВ «Кірова» (2x114 МВт);
- трансформаторному зв'язку 220/110 кВ потужністю 2x(3x46,6) МВА в обсязі 50 МВт.

Електропостачання споживачів Лисичанського енергівузла, навантаження яких в режимі зимового максимуму становило близько 200 МВт, забезпечувалось від ПС «Лисичанська» через автотрансформаторні зв'язки 220/110 кВ (3x250 МВА) з їх завантаженням 2x60 МВт та 1x79 МВт. Схема електропостачання характеризується низькою надійністю з-за наявності єдиного зв'язку 220 кВ ПС «Лисичанська» з Луганською ТЭС.

Споживачі ПС 220 кВ «Ювілейна» отримують живлення по мережі 110 кВ. Від шин 220 кВ цієї підстанції здійснюється передача потужності на шини 220 кВ ПС 330/110 кВ «Михайлівка» в обсязі 19 МВт.

Слід зазначити, що в 2015р. балансова ситуація в регіоні ПС 750/500/330 кВ «Донбаська» характеризувалася надлишком потужності в обсязі 555 МВт, який передається в мережу суміжного енергорегіону Росії по ПЛ 500 кВ «Донбаська – Донська».

Ситуація, яка склалася в електричній мережі Луганського енергівузла, обумовлює роботу Луганської ТЭС в режимі «острову» – без зв'язків з мережею основної частини ОЕС України. Зазначена схема мережі не забезпечує надійність видачі потужності станції і, відповідно, суттєво погіршує ступень надійності електропостачання споживачів.

На сьогодні Луганська ТЭС працює за схемою «острову» із зниженою генерацією (не більше 3-х енергоблоків, а в окремих режимах навіть з «нульовою» генерацією) та забезпечує електропостачання лише прилеглих споживачів з низькою надійністю з-за пошкоджень ліній видачі потужності та неможливості відновлення паралельної роботи з ОЕС України.

Для забезпечення електроенергією комунально – побутових споживачів та промислових об'єктів, розташованих на контролюємій Україною території, необхідно, крім відновлення роботи Луганської ТЭС в складі ОЕС України, збудувати нове джерело живлення. В якості такого джерела будуватиметься підстанція 500/220 кВ «Кремінська». Розташування ПС «Кремінська» на території Луганської області поблизу траси існуючої ПЛ 500 кВ «Донська - Донбаська». Для приєднання підстанції до мережі 220 кВ на підставі техніко – економічного порівняння варіантів йде будівництво дволанцюгової ПЛ 220 кВ «Кремінська – Ювілейна» (рис. 3). Це потребує реконструкції ПС «Ювілейна».

**Метою роботи** є підвищення надійності забезпечення електроенергією побутових споживачів та промислових об'єктів Донбаського регіону загалом та півночі Луганської області і Лисичанського енергівузла зокрема. Це повинно надати змогу синхронізувати систему електропостачання півночі

Донбасу, яка нині працює в режимі «енергоострову», з ОЕС України.

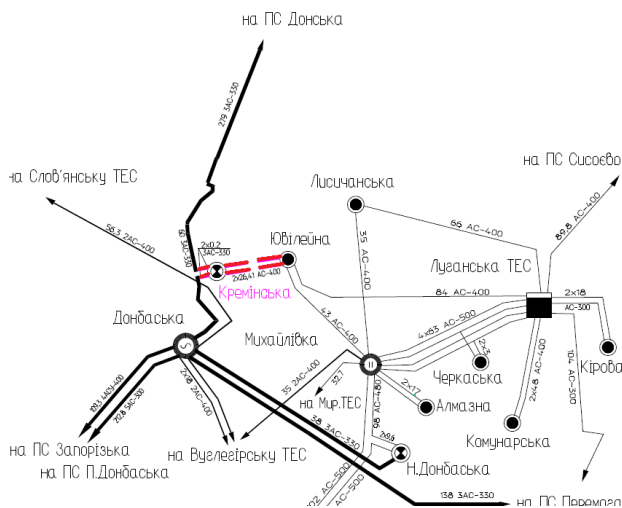


Рисунок 3 – Дволанцогова ПЛ 220 кВ «Кремінська – Ювілейна»

**Виклад основного матеріалу.** Для досягнення мети необхідно виконати реконструкцію ПС «Ювілейна». Існуючий розподільчий пристрій 220 кВ ПС «Ювілейна» виконано за схемою "чотирикутник" з приєднанням двох ПЛ 220 кВ (на Луганську ТЕС та на ПС Михайлівка). Для приєднання двох нових ПЛ 220 кВ - на ПС 500 кВ "Кремінська" потребується реконструкція РУ. Схема електричних з'єднань, яка буде застосована, залежить від типу РУ:

- при будівництві РУ в відкритому вигляді передбачається виконання електричних з'єднань 220 кВ підстанції за схемою «дві робочі системи шин з обхідною»;

- при спорудженні КРУЕ 220 кВ електричні з'єднання запропоновано виконати за схемою "дві робочі системи шин".

В варіанті відкритого виконання РУ 220 кВ ПС «Ювілейна» для приєднання ПЛ 220 кВ Кремінська – Ювілейна з боку ПС «Ювілейна» потрібна реконструкція ВРП 220 кВ цієї підстанції з переходом від схеми «чотирикутник» до типової схеми 220 кВ при 4-х лінійних приєднаннях - «дві системи шин з обхідною».

З метою скорочення капітальних вкладень запропоновано:

- збереження в експлуатації існуючих вимикачів (4-ри одиниці);

- встановлення двох нових вимикачів для приєднання двох ланцюгів ПЛ 220 кВ Кремінська – Ювілейна (з введенням першочергове одного вимикача для приєднання одного з двох ланцюгів ПЛ 220 кВ від ПС «Кремінська», в другу чергу – ще одного вимикача), що враховане при розрахунку укрупнених капіталовкладень (табл.1);

- встановлення нових обхідного та шиноз'єднувального вимикачів.

У відповідності із методикою "Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику" при виконанні економічних розрахунків не

врахована вартість обладнання та споруд однакових в обох варіантах, за виключення обладнання розподільчих пристроїв [3].

Таблиця 1 - Зведені характеристики варіантів реконструкції РУ

Одиниці виміру	Вартісні показники по варіантам	
	Варіант 1 ВРУ 220 кВ	Варіант 2 КРУЕ 220 кВ
Тис. грн	452611	751294
Те ж, в %	100	166

У відповідності із даними табл.1 капіталовкладення в реконструкцію ПС "Ювілейна" за варіантом 1 на 166 % нижче, ніж за варіантом 2.

Розміщення обладнання та споруд на підстанції для варіанта реконструкції із застосуванням ВРУ забезпечується в межах існуючої площадки (без розширення її території). Недоліком цього варіанту є невиконання вимоги забезпечення можливості його розширення в перспективі не менше ніж на 4-ри лініями. Однак проробка перспективи розвитку електричних мереж півночі Луганської області показала, що додаткових зв'язків 220 кВ ПС Ювілейна з суміжними об'єктами не визначена [4].

Враховуючи схему розподільчої установки 220 кВ ПС «Ювілейна», її компоновку та незадовільний стан конструкцій порталів можливо зробити висновок, що кількість переключень елементів ВРУ по варіанту спорудження ВРУ 220 кВ буде більшою в порівнянні з варіантом будівництва на підстанції КРУЕ 220 кВ. При цьому загальна тривалість відключень ПЛ 220 кВ по обох варіантах буде практично однаковою. Недоліком варіанту з будівництвом ВРУ 220 кВ, незважаючи на достатні згідно норм відстані між конструкціями і обладнанням, що демонтуються і монтуються, до елементів діючого ВРУ, яке знаходиться під напругою, є ускладнення роботи вантажопідйомної техніки.

Перевагою варіанту реконструкції з ВРУ 220 кВ є те, що все обладнання незалежно один від одного може бути замінено на обладнання іншого виробника.

Виходячи з того, що технічні характеристики реалізації обох варіантів практично однакові, варіант реконструкції РУ 220 кВ визначається обсягами капіталовкладень в їх реалізацію - тому рекомендується реконструкція розподільчого пристрою 220 кВ ПС «Ювілейна» з застосуванням ВРУ, затрати на реалізацію якого менші, ніж при будівництві КРУЕ 220 кВ.

ВРУ 220 кВ буде зроблено за схемою «Дві робочі та обхідна системи шин». Компонування ланок передбачає приєднання:

- існуючих автотрансформаторів АТ-1, АТ-2 типу АТДЦТН-250000/220/110/10 кВ;

- існуючих заходів ліній;

- приєднання двох нових ліній 220 кВ на ПС «Кремінська».

Для встановлення на напрузі 220 кВ буде використано сучасне електрообладнання:

- вимикачі з елегазовою ізоляцією;

– елегазові трансформатори струму та напруги;  
 – роз'єднувачі з електродвигунними приводами для головних і заземлюючих ножів для забезпечення можливості централізованого дистанційного управління з ГЩУ підстанції, а також місцевого керування з ВРУ;

– обмежувачі перенапруги в комплекті з системою моніторингу їх стану.

Системи шин на ВРУ 220 кВ буде виконано двома сталесалюмінієвими проводами марки АС- 400/64 в фазі.

В даному варіанті виконання РУ 220 кВ ПС «Ювілейна» для приєднання ПЛ 220 кВ Кременська – Ювілейна з боку ПС «Ювілейна» з метою скорочення капітальних вкладень в будівництво можливо виконати:

– збереження в експлуатації існуючих вимикачів;  
 – встановлення двох нових вимикачів для двох ланцюгів ПЛ 220 кВ

– встановлення нових обхідного та шиноз'єднувального вимикачів.

**Висновки.** Обґрунтовано необхідність будівництва нової підстанції 500/220/35 кВ «Кременська» на Луганщині з заходами повітряної лінії 500 кВ Донбаська-Донська та повітряної лінії 220 кВ Кременська-Ювілейна. Це надасть можливість відновити надійне енергопостачання споживачів північної частини Луганської області, а також вилучити область з режиму «енергетичного острова», дозволить синхронізувати область з Об'єднаною Енергосистемою України.

Проаналізовано варіанти реконструкції розподільчого устаткування 220 кВ ПС «Ювілейна». Виходячи з того, що технічні характеристики реалізації обох варіантів практично однакові, варіант реконструкції розподільчого устаткування 220 кВ визначається обсягами капіталовкладень в їх реалізацію, тому рекомендується реконструкція розподільчого устаткування 220 кВ ПС «Ювілейна» з застосуванням відкритого розподільчого устаткування,

затрати на реалізацію якого менші, ніж при будівництві КРУЕ 220 кВ. Відкрите розподільче устаткування 220 кВ буде зроблено за схемою «Дві робочі та обхідна системи шин».

#### Список літератури

1. СОУ МЕВ ЕЕ 40.1-00100227-01:2016 Стандарт операційної безпеки функціонування Об'єднаної енергетичної системи України. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. Частина 1. Технічна політика у сфері побудови та експлуатації магістральних і міждержавних електричних мереж.

2. Данилова О. А., Носаченко Н. М. Сучасна підстанція 500/220 КВ без постійної присутності персоналу // Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 11-12 квітня 2019 р. Кременчук, КрНУ, 2019. с.99-102

3. ГКД 340.000.002-97 Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі // Інститут "Укренергомержпроект", 1997

4. Плану розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на 2017-2026 роки // НЕК Укренерго, 2017

#### References (transliterated)

1. SOU MEV EE 40.1-00100227-01:2016 Standart operacijnoyi bezpeki funkcionuvannya Ob'jednanoyi energetichnoyi sistemi Ukraini. Pobudova ta ekspluatatsiya elektrichnih merezh. Tehnichna politika. Chastina 1. Tehnichna politika u sferi pobudovi ta ekspluatatsiyi magistralnih i mizhderzhavnih elektrichnih merezh [OSU EEE 40.1-00100227-01: 2016 Operational Safety Standard of the United Energy System of Ukraine. Construction and operation of electrical networks. Technical policy. Part 1. Technical policy in the field of construction and operation of backbone and interstate electric networks].

2. Danylova O.A., Nosachenko N.M. Suchasna pidstanciya 500/220 KV bez postijnoyi prisutnosti personalu [Modern unmanned substation of 500/220 kV] // Electromechanical and Energy Systems. Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 17 th International conference of students and young researchers in Kremenchuk on April 11–12, 2019. Kremenchuk, KrNU, 2019. p.99-102

3. GKD 340.000.002-97 Vznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapitalnih vkladov v energetiku. Metodika. Energosistemi i elektrichni merezhi [MGD 340.000.002-97 Determination of economic efficiency of capital investments in energy. Method. Power Systems and Electric Networks] // Ukrenergomerezhproekt Institute, 1997

4. Planu rozvritku Ob'jednanoyi energetichnoyi sistemi Ukraini na 2017-2026 roki Development [Plan of the United Energy System of Ukraine for 2017-2026] // NEC Ukrenergo, 2017

Надійшла (received) 19.12.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гундєртайло Олександр Васильович (Гундєртайло Александр Васильевич, Hundertailo Oleksandr)** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра Електричних станцій; м. Харків, Україна; e-mail: [gundertailer@gmail.com](mailto:gundertailer@gmail.com)

**Данилова Олена Анатоліївна (Данилова Елена Анатольевна, Danylova Olena)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Електричних станцій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0353-9848> ; e-mail: [danirova.l@gmail.com](mailto:danirova.l@gmail.com)

**Лисенко Людмила Іванівна (Лысенко Людмила Ивановна, Lysenko Ludmila)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Електричних станцій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1566-493X> ; e-mail: [ludminalysenko@gmail.com](mailto:ludminalysenko@gmail.com)

*А. Г. ГУРИН, Є. С. МОСКВІТІН*

### **ЗМІНА ПОКАЗНИКІВ ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Запропоновано модель зміни параметрів паперово-масляної ізоляції при впливі кліматичних умов експлуатації силового трансформатора. Ремонтні та профілактичні роботи, зміни добових та середньорічних параметрів температури призводить до зміни фізико-хімічних властивостей паперово-масляної ізоляції. Перебування в умовах знижених температур призводить до втрати рухливості трансформаторного масла, яка супроводжується кристалізацією парафінових вуглеводнів, що утворюють кристалічну сітку, всередині якої утримуються рідкі вуглеводні масла. При зниженні температури невелика кількість утвореного твердого парафіну різко підвищує температуру застигання і сприяє подальшому збільшенню в'язкості масла. При довготривалій експлуатації розміри кристалів збільшуються, ступінь їх упорядкованості збільшується оскільки в паперово-масляній ізоляції міститься до 10 % трансформаторного масла, то процеси парафінування паперових і міжшарових прошарків масла в основному визначаються хімічними процесами в маслі, та інтенсивністю парафінування поверхні паперу, залежної від ступеню її полярності. Більш щільні сорти паперу володіють слабким зчепленням з парафіном; менш щільні, типу К-120, парафуються на більшу глибину. Парафінування паперово-масляної ізоляції призводить до зміни її властивостей, коли парафін, що відклався всередині та на поверхні переводить її з розряду гідрофільних до гідрофобних. Витіснена з паперу волога разом з емульсованою вологою з масла скупчуються у проміжках розпушеного паперу, створюючи умови збільшення струмів витoku та збільшення кута діелектричних втрат. Такі зміни у структурі паперово-масляної ізоляції впливають на форму та спектр часткових розрядів, збільшуючи частку низькочастотних складових від наскрізних розрядів між шарами паперу.

**Ключові слова:** силовий трансформатор, паперово-масляна ізоляція, парафування паперу

*А. Г. ГУРИН, Е. С. МОСКВИТИН*

### **ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Предложена модель изменения параметров бумажно-масляной изоляции при воздействии климатических условий эксплуатации силового трансформатора. Ремонтные и профилактические работы, изменения суточных и среднегодовых параметров температуры приводит к изменению физико-химических свойств бумажно-масляной изоляции. Пребывание в условиях пониженных температур приводит к потере подвижности трансформаторного масла, которая сопровождается кристаллизацией парафиновых углеводородов, образующих кристаллическую сетку, внутри которой содержатся жидкие углеводороды масла. При снижении температуры небольшое количество образованного твердого парафина резко повышает температуру застывания и способствует дальнейшему увеличению вязкости масла. При длительной эксплуатации размеры кристаллов увеличиваются, степень их упорядоченности увеличивается поскольку в бумажно-масляной изоляции содержится до 10% трансформаторного масла, то процессы парафирования бумажных и межслоевых прослоек масла в основном определяются химическими процессами в масле, и интенсивностью парафирования поверхности бумаги, зависящей от степени ее полярности. Более плотные сорта бумаги обладают слабым сцеплением с парафином; менее плотные, типа К-120, парафируются на большую глубину. Парафирование бумажно-масляной изоляции приводит к изменению ее свойств, когда парафин, что отложился внутри и на поверхности переводит ее из разряда гидрофильных к гидрофобных. Вытеснена из бумаги влага вместе с эмульсированной влагой из масла скапливаются в промежутках разрыхленного бумаги, создавая условия увеличения токов утечки и увеличение угла диэлектрических потерь. Такие изменения в структуре бумажно-масляной изоляции влияют на форму и спектр частичных разрядов, увеличивая долю низкочастотных составляющих от сквозных разрядов между слоями бумаги.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, бумажно-масляная изоляция, парафирование бумаги

*A. G. GURIN, E. S. MOSKVITIN*

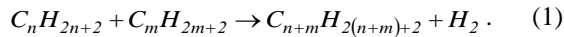
### **CHANGES IN PAPER-OIL POWER TRANSFORMERS INSULATION IN LONG-TERM EXPLOITATION**

A changes model of paper-oil insulation parameters under the climatic conditions influence of a power transformer exploitation is proposed. Repairs and preventive works, changes in daily and average annual temperature parameters lead to changes in the physical and chemical properties of paper-oil insulation. Staying at low temperatures results in the mobility loss of the transformer oil, which is accompanied by paraffinic hydrocarbons crystallization, which form a crystalline network, within which liquid hydrocarbon oils are contained. By lowering the temperature, the small solid paraffin amount formed dramatically increases the freezing point and further increases the oil viscosity. With long-term exploitation the crystal size increases, the ordering degree increases because the paper-oil insulation contains up to 10% of transformer oil, the initialization processes of paper and oil interlayers are mainly determined by the chemical processes in oil, and the paraffin polarity intensity. The denser paper grades have poor adhesion to paraffin; less dense, type K-120, initialed to greater depth. Initialisation of paper-oil insulation leads to change of its properties when the paraffin which is deposited inside and on a surface transfers it from the category hydrophilic to hydrophobic. Moisture displaced from the paper together with the emulsified moisture from the oil accumulate in the paper looseness, creating conditions for increasing leakage currents and increasing the dielectric loss angle. Such changes in the paper-oil insulation structure affect the shape and partial discharges spectrum, increasing the low-frequency components fraction from the through discharges between paper layers.

**Keywords:** power transformer, paper-oil insulation, paper waxing



**Вступ.** П. А. Флоренський, а пізніше Г. Н. Сканаві [1] досліджували питання утворення парафінів у відчищеному згушеному маслі при низьких температурах експлуатації та одночасному впливі електричного поля. Ці два фактори сприяють розвитку хімічних процесів в маслі, стимулюють реакцію між різними вуглеводнями, що входять до його складу, створюючи більш тяжкий вуглеводень і водень за схемою:



Складні хімічні процеси в трансформаторному маслі Флоренський застосував для пояснення зміни умов пробую маслу при довготривалій експлуатації, коли на підвищення в'язкості масла й утворення парафінових осадів впливають напруженість електричного поля та температура експлуатації.

Парафінування паперово-просоченої ізоляції призводить до зміни її електричних властивостей і міцності.

Найбільша інтенсивність парафінування спостерігається на початку експлуатації трансформатора, потім швидкість відкладання знижується внаслідок збільшення шару парафіну. Особливістю цього процесу є нерівномірна зміна по товщі ізоляції гідрофільного стану ПМІ до гідрофобного. Якщо на поверхнях вода створює суцільний прошарок і масло просочується у вигляді краплин, то в цьому випадку парафінування проходить менш інтенсивно. На гідрофобних (зовнішніх сторонах ізоляції) наявність води в маслі викликає більш інтенсивне створення парафінового прошарку, який поступово зменшується за рахунок зменшення адгезії наступних шарів парафіну. Наявність парафінового прошарку перерозподіляє напруженість поля, збільшуючи її в парафіні (діелектрична проникність ПМІ складає 3.5 – 4, а парафіну – 2.2). Це створює умови переходу коронного розряду у ковзкий, що розповсюджується уздовж поверхні ізоляційного шару. Найбільш висока напруженість перекриття спостерігається у парафіну, а найменша – у ПМІ, що сильно адсорбує вологу на своїй поверхні. Аналізуючи форму та спектр часткових розрядів можна зробити висновок, що часткові розряди у новому стані ізоляції мають більш високочастотний склад в діапазоні 1 – 1.5 МГц. У трансформатора, що тривало працює, поряд з високочастотними складовими з'являються частоти до 200 кГц, які виникають за рахунок більш тривалих розрядів, що ковзають по поверхні міжкатушкової і головної ПМІ, та розрядів у газових бульбашках продуктів деструкції ПМІ за рахунок нагрівання, впливу електричного поля, електролізу, кавітації та інших.

**Мета роботи.** Метою даної статті – показати причини змін у амплітудному та фазовому спектрі часткових розрядів у паперово-масляній ізоляції силових трансформаторів при старінні трансформаторного масла під впливом кліматичних і температурних змін в процесі експлуатації та фізико-хімічних процесів у паперово-масляній ізоляції.

Підвищення гідрофобності ПМІ призводить до зміни вологості паперу та масла. Витіснена з масляних шарів паперу волога дрібними краплями

розташовується між шарами паперу, а молекулярна волога утворює водяні суспензії в маслі (рис. 1).

У міжкатушкової і міжфазовій паперово-просоченій ізоляції, коли на поверхні розділу двох діелектриків діють сили, що виникають в результаті взаємодії електричного поля з пов'язаними зарядами поляризованого діелектрика, які можуть викликати рух і деформацію шарів води, та масла в міжшаровому просторі. У випадку, коли поверхня діелектриків нормальна до напрямку поля, прошарок води буде виштовхуватись з силою:

$$F = \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_2 - \epsilon_1) \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot E_1^2, \quad (2)$$

де  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  – діелектрична проникність трансформаторного масла та води,

$E_1$  – напруженість електричного поля, утворюючи на поверхні парафінованого паперу ділянки з підвищеною провідністю.

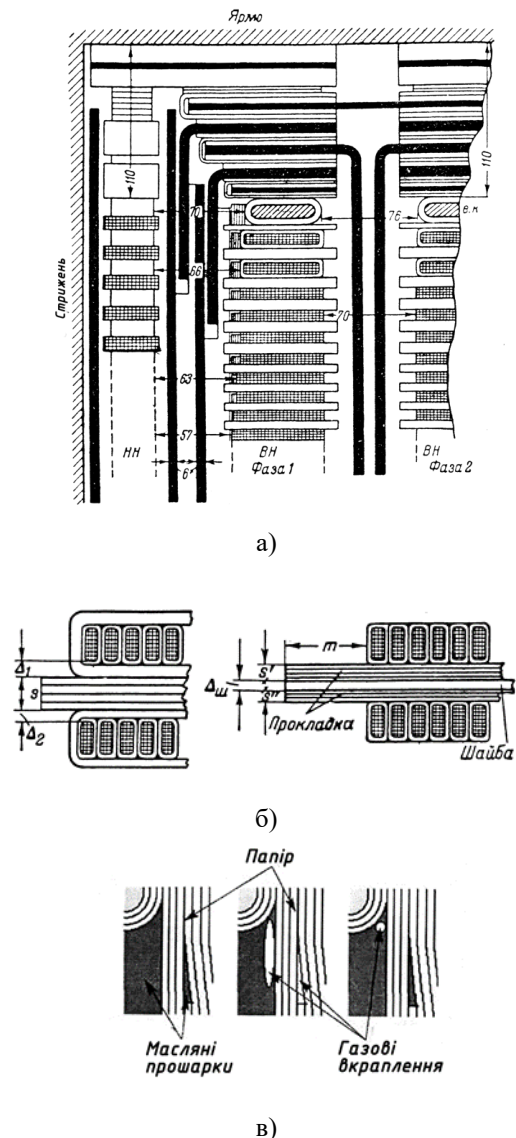


Рисунок 1 – Конструкція головної (а) та міжкатушкової ізоляції (б) з паперово-масляної ізоляції

Це, у свою чергу, викликає зміну розподілу напруженості електричного поля на поверхні твердого гідрофобного покриття. Найбільша нерівномірність буде на закраїнах ізоляційних шарів між котушками та між окремими витками, а напруженість електричного поля уздовж шару паперової ізоляції буде змінюватись згідно:

$$E_x = U \cdot \gamma \frac{\cosh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l}, \quad (3)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\frac{(1/R_1) + j\omega\omega_1}{(1/R_2) + j\omega\omega_2}},$$

$R_1$  – об'ємний опір паперу, Ом·м,

$R_2$  – поверхневий опір, Ом·м,

$C_1$  – питома ємність поверхневого шару паперу, Ф/м<sup>2</sup>,

$C_2$  – питома ємність парафінованого шару, Ф/м<sup>2</sup>.

З урахуванням того, що шар парафінованого паперу має:

$$1/R_1 \ll C_1 \text{ та } 1/R_2 \ll C_2, \quad (4)$$

то можна прийняти:

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}. \quad (5)$$

Розподіл напруженості поля практично не зміниться, але збільшення амплітуди напруги у витків котушки збільшиться в 1.5 ÷ 2 рази за рахунок зниження діелектричної проникності паперово-просоченої ізоляції в 3.5 ÷ 4 до 2 ÷ 2.5. Це призводить до посилення процесу іонізації, розвитку поверхневих розрядів, посиленню хімічних реакцій розкладання парафінованого масла та водно-масляної емульсії з виділенням газових бульбашок водню та інших газів.

Згідно теорії Флоренського за умови для пробую газів бульбашок можна прийняти залежність:

$$\frac{\eta}{\sigma} f(\alpha) = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{3 \cdot \theta}, \quad (6)$$

$$\text{де } f(\alpha) = \frac{\Delta S}{\Delta t},$$

$\eta$  – в'язкість трансформаторного масла,

$\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,

$a = \frac{dn}{dt}$  – швидкість збільшення газових молекул у

бульбашках до моменту відриву,

$\theta$  – постійна,

$\Delta t$  – проміжок часу між відривом двох бульбашок у тому самому місці поверхні,

$S$  – відстань між центрами близьких бульбашок,

$n$  – кількість газових молекул водню, що дорівнює кількості пар вуглеводневих молекул, які проореагували.

Тобто, при тривалій експлуатації можливе створення та збільшення у обсязі бульбашок газу, здатних до пробую багатшарової ПМІ в електричному полі головної та поздовжньої ізоляції трансформатора.

Оскільки електрична міцність газів набагато нижча, ніж міцність трансформаторного масла, то пробій може виникнути в газовій бульбашці, в основному заповненій сумішшю водню з іншими газами.

Зміна електричних характеристик та гідрофільності ПМІ при довготривалій експлуатації трансформатора призводить до зміни характеристик коронного, наскрізного та ковзних розрядів.

Розпушення паперової ізоляції під дією електродинамічних навантажень на котушки трансформатора призводить до прискорення процесу парафінування ізоляції витків, яка зменшуючи діелектричну проникність ПМІ, а, відповідно, підвищує напруженість електричного поля на поверхні мідного провідника котушки і інтенсивність іонізаційних процесів.

Витіснена з паперу та масла вода притягується до потенціального провідника котушки, створюючи у міжшаровому просторі ПМІ осередки з підвищеною електропровідністю, що сприяє подальшому розвитку ковзних розрядів, які можуть перейти у розряд наскрізних.

Кожен з типів розрядів визначається у змінах амплітуд-частотної та фаз-частотної характеристик, що дозволяє використовувати наявні методи діагностики часткових розрядів у ПМІ трансформаторів.

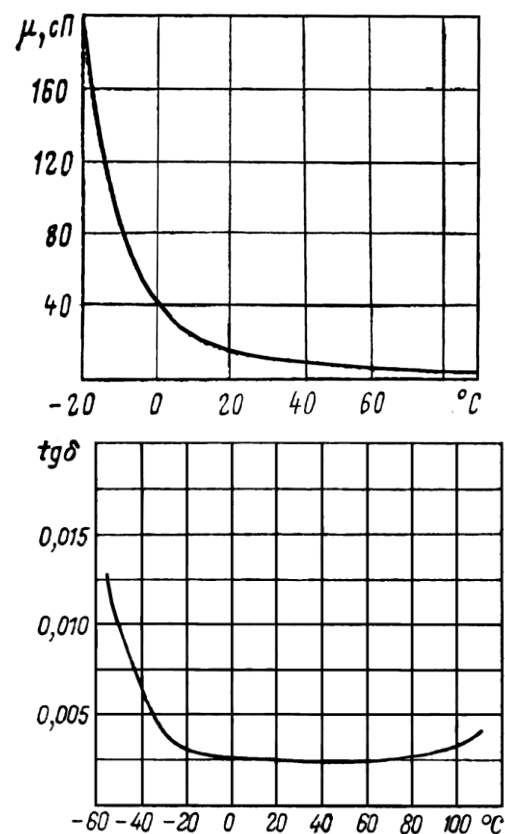


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості трансформаторного масла та діелектричних втрат паперово-масляного діелектрика від температури

В залежності від ступеню старіння ізоляції імпульс часткових розрядів вміщує інформацію від окремих видів дефектів трансформатора, які

впливають на спектр фронту імпульсу. За період старіння ізоляції тривалість фронту збільшується від десятків до сотень наносекунд. Розвиток ковзних розрядів буде розширювати тривалість реєстрованих імпульсів до  $10 \div 12$  мкс та розширенням фазової діаграми на більшу частину синусоїди напруги.

**Висновки.** 1. Довготривала експлуатація силового трансформатора в умовах зміни температури навколишнього середовища викликає збільшення в'язкості масла, утворення парафінових вуглеводнів.

2. Парафінування паперово-масляної ізоляції призводить до її гідрофобності та витісненню води у міжшарові проміжки паперової ізоляції, збільшуючи діелектричні втрати.

3. Перерозподіл діелектричних параметрів паперово-масляної ізоляції призводить до утворення ковзних розрядів уздовж шарів паперу.

4. Зміна амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик сигналів при діагностиці ступеню її старіння, дозволяє більш детально вивчати окремі етапи фізико-хімічних перетворень від часткових розрядів.

#### Список літератури

1. Г. И. Сканава, Физика диэлектриков (область сильных полей) / Гос. изд-во физико-математической литературы, М.: 1958 – 907 с.
2. Техника высоких напряжений, Леопольд, Рот. Пер. с нем., Гос. изд-во, М-Л, 1930.
3. А. Д. Зимон, Адгезия жидкости и смачивание, М.: «Химия», 1974 – 414 с.
4. Г. С. Кучинский, Г. Г. Лысаковский, Ю. В. Березин, В. Л. Федоров, Влияние увлажнения на электрические характеристики бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа при переменном напряжении промышленной частоты // «Электричество», № 10, 1960, с. 69 – 72.
5. Ушаков В. Я., Клишкин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В., Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Томск : Изд-во НТЛ, 2005 – 488 с.
6. В. Н. Пастухов, К расчету характеристик искры в воде, «Электронная обработка материалов», № 1 (31), 1970 – с. 63 – 64.
7. И. З. Окунь, Исследование при импульсном разряде в воде, ЖТФ, т. XLI, в. 2, 1971 – с. 292 – 300.
8. Туйчунова А. Г., Совершенствование содержания изоляции силовых масло-наполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий, Автореферат дис. к. т. н., Красноярск, 2011 – 21 с.
9. Н. В. Юдина, Н. В. Полякова, Кристаллизация нефтяных парафинов, Известия Томского политехнического института, 1977, т. 3ао, с. 129 – 131.

10. Г. М. Михеев, Экспериментальное исследование выделения водорода из диэлектрической жидкости методом лазерной спектроскопии, Вестник Чувашского университета, 2013, № 3, с. 208 – 212.

11. Исакиев Э. Х., Недоспасов А. В., Тюфтяев, А. С., Гаджиев М. Х., Акимов П. Л., Влияние одиночных пузырьков воздуха и элегаза на электрический пробой трансформаторного масла, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва.

12. Е. Г. Ермаков, Исследование характеристик частичных разрядов при различных видах дефектов в силовых трансформаторах // Научно-технические ведомости СПб изд-во Политехнического университета, 2009 – с. 172 – 177.

#### References (transliterated)

1. G. I. Skanavi, Fizika dielektrikov (oblast silnykh poley) / Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, M.: 1958 – 907 s.
2. Tehnika vyisokikh napryazheniy, Leopold, Rot. Per. s nem., Gos. izd-vo, M-L, 1930.
3. A. D. Zimon, Adgeziya zhidkosti i smachivanie, M.: «Himiya», 1974 – 414 s.
4. G. S. Kuchinskiy, G. G. Lyisakovskiy, Yu. V. Berезin, V. L. Fedorov, Vliyanie uvlazhneniya na elektricheskie harakteristiki bumazhno-maslyanoy izolyatsii kondensatornogo tipa pri peremennom napryazhenii promyshlennoy chastoty // «Elektrichestvo», # 10, 1960, s. 69 – 72.
5. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F., Korobeynikov S. M., Lopatin V. V., Proboi zhidkostey pri impulsnom napryazhenii / Tomsk : Izd-vo NTL, 2005 – 488 s.
6. V. N. Pastuhov, K raschetu harakteristik iskryi v vode, «Elektronnaya obrabotka materialov», # 1 (31), 1970 – s. 63 – 64.
7. I. Z. Okun, Issledovanie pri impulsnom razryade v vode, ZhTF, t. XLI, v. 2, 1971 – s. 292 – 300.
8. Tuychunova A. G., Sovershensovanie soderzhaniya izolyatsii silovykh maslo-napolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsiy s uchetom klimaticheskikh usloviy, Avtoreferat dis. k. t. n., Krasnoyarsk, 2011 – 21 s.
9. N. V. Yudina, N. V. Polyakova, Kristalizatsiya neftyanykh parafinov, Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta, 1977, t. 3ао, s. 129 – 131.
10. G. M. Miheev, Eksperimentalnoe issledovanie vyideleniya vodoroda iz dielektricheskoy zhidkosti metodom lazernoy spektroskopii, Vestnik Chuvashskogo universiteta, 2013, # 3, s. 208 – 212.
11. Isakiev E. H., Nedospasov A. V., Tyuftyaev, A. S., Gadzhiev M. H., Akimov P. L., Vliyanie odinoknykh puzyrkov vozduha i elegaza na elektricheskiy proboi transformatornogo masla, Ob'edinennyiy institut vyisokikh temperatur RAN, Moskva.
12. E. G. Ermakov, Issledovanie harakteristik chastichnykh razryadov pri razlichnykh vidakh defektov v silovykh transformatorah // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009 – s. 172 – 177.

Надійшло (received) 18.11.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гурин Анатолій Григорович (Гурин Анатолій Григорьевич, Gurin Anatoly Hrigorovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, Web of Science ResearcherID: U-7535-2017, тел. (057) 707-66-63, E-mail: Agurin@kpi.kharkov.ua

**Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Eugene Sergiyovich)** – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, Web of Science ResearcherID: Y-2687-2019, ORCID: 0000-0002-0219-8642, тел. (057) 707-60-10, E-mail: Moskvitin@kpi.kharkov.ua

УДК 621.315

*А. Г. ГУРИН, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. В. ГОЛИК, О. В. ІЛЬЧЕНКО, Т. А. РОДЯХІНА***ВПЛИВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЗАХИЩЕНИХ ПРОВІДІВ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

Наведено аналітичне рішення за допомогою подвійного конформного перетворення системи координат для основної електростатичної задачі – знаходження розподілу потенціалу в замкнутій області для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених провідів. Можливість аналітичного рішення і побудови картини неоднорідного електричного поля для захищених провідів ліній електропередачі дає можливість аналізувати вплив будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів, а саме – конструкції провідів та електрофізичних параметрів їх ізоляції. Наведено результати такого аналізу стосовно полярності ізоляційного матеріалу, площі поперечного перерізу провідника, відстані між провідниками, що є основою для прийняття технічних рішень при виготовленні і експлуатації захищених провідів. Їх впровадження є однією з найбільш прогресивних і перспективних тенденцій розвитку вітчизняних електричних розподільних мереж.

**Ключові слова:** захищені проводи, конформне перетворення, напруженість електричного поля, аналітичне рішення, площа поперечного перерізу провідника, відстань між провідниками

*А. Г. ГУРИН, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. В. ГОЛИК, О. В. ІЛЬЧЕНКО, Т. А. РОДЯХІНА***ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ ЗАЩИЩЕННЫХ ПРОВОДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Приведено аналитическое решение с помощью двойного конформного превращения системы координат для основной электростатической задачи – нахождения распределения потенциала в замкнутой области для исследования распределения напряженности электрического поля в изоляции защищенных проводов. Возможность аналитического решения и построения наглядной картины неоднородного электрического поля для защищенных проводов линий электропередачи позволяет анализировать влияние конструктивных и электрофизических параметров, а именно – конструкции провода, электрофизических параметров их изоляции. Приведены результаты такого анализа относительно полярности изоляционного материала, площади поперечного сечения проводника, расстояния между проводами, которые являются основой для принятия технических решений при изготовлении и эксплуатации защищенных проводов. Их внедрение является одной из наиболее прогрессивных и перспективных тенденций развития отечественных электрических распределительных сетей.

**Ключевые слова:** защищенные провода, конформное преобразование, напряженность электрического поля, аналитическое решение, площадь поперечного сечения проводника, расстояние между проводами

*A. G. GURIN, L.A. SHCHEBENIUK, O.V. GOLIK, O.V. ILCHENKO, T.A. RODJACHINA***EFFECT OF POLARISATION OF INSULATION OF PROTECTED WIRES ON ELECTRIC FIELD OF POWER TRANSMISSION LINE**

There is presented an analytical solution by means of double conformal transformation in a coordinate system for the main electrostatic task - finding potential distribution in a closed area to study the distribution of electric field intensity in insulation of protected wires. Possibility of analytical solution and construction of visual picture of non-uniform electric field for protected wires of power transmission lines makes it possible to analyze influence of structural and electrophysical parameters, namely - design of wire, electrophysical parameters of their insulation. Results of such analysis regarding polarity of insulating material, cross-sectional area of conductor, distance between wires, which are the basis for making technical decisions in manufacturing and operation of protected wires, are given. Their introduction is one of the most progressive and promising trends in the development of domestic electric distribution networks.

**Keywords:** protected wires, conformal conversion, electric field strength, analytical solution, conductor cross-sectional area, distance between wires

**Актуальність** роботи зумовлена тим, що на сьогоднішній день замість неізольованих провідів повітряних ліній електропередачі все ширше проектується і будуються лінії електропередачі напругою 0,38 - 35 кВ із застосуванням захищених (ізольованих) провідів (ЗП) [1]. Це одна з найбільш прогресивних і перспективних тенденцій розвитку електричних розподільних мереж. Основною особливістю конструкції ЗП порівняно із традиційною є наявність ізоляції на струмопровідних жилах. Основною перевагою застосування ізольованих провідів є значне підвищення надійності розподільних електричних мереж і, як наслідок цього, зменшення експлуатаційних витрат.

Високовольтні самонесучі ізольовані проводи, розраховані на робочу напругу до 35 кВ частотою 50 Гц з різною, зокрема поліетиленовою, ізоляцією, призначені для повітряних ліній електропередачі є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і забезпечують суттєвий економічний і екологічний ефект.

Одночасно виникає ряд проблем, пов'язаних з впливом поляризації матеріалу ізоляції на електричне поле в діелектрику ЗП [2] повітряних ліній електропередачі, яке зумовлює електричну міцність ізоляції в номінальних і аварійних режимах. Процес поляризації діелектрика в електричному полі змінного струму зумовлює перерозподіл електричного поля

© А. Г. Гурін, Л. А. Щебенюк, О. В. Голик, О. В. Ільченко, Т. А. Родяхіна, 2019

повітряних ліній електропередачі, зокрема в разі дії комутаційних чи грозових перенапруг. Тому дослідження впливу поляризації діелектрика на електричне поле повітряної лінії, в якій застосовано ЗП є актуальним.

Аналіз фізичних явищ і створення конкретних програмних засобів побудови **наглядної** картини неоднорідного електричного поля в інноваційних технічних пристроях є важливою складовою профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів для навчальних технічних закладів електроенергетики та кабельної техніки.

Особливістю електричного поля між проводом і землею є його неоднорідність. Тобто визначення його параметрів, найперше напруженості поля, виконують за допомогою емпіричних формул або методом сіток, оснований на уявленні про елементарну трубку поля. Ці методи по суті своїй є графоаналітичними.

Ефективність дослідження впливу матеріалів ізоляційного проміжку і їх електрофізичних характеристик суттєво збільшується, якщо є аналітичне рішення, яке дозволяє проаналізувати вплив будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів ізоляції на напруженість поля.

Між провідником ЛЕП і землею, якщо знехтувати впливом сусідніх проводів, напруженість неоднорідного поля можна оцінити розрахунком за відомою [1] моделлю електричного поля між площиною і паралельним їй циліндром радіусом, що дорівнює радіусові провідника, і віддаленим від площини на відстань, яка дорівнює відстані від провідника до землі.

Система координат перерізу вказаної системи електродів площиною  $Z$ , перпендикулярною до осі циліндра за допомогою конформного відображення комплексної площини  $Z$  на комплексну площину  $W$  за допомогою перетворення  $W = 1/Z$  дає у площині  $W$  систему двох коаксіальних циліндрів, для якої розрахунок напруженості поля в будь-якій точці поля відомий [1].

**Мета роботи.** Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами для дослідження впливу будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів захищених проводів, наприклад:

- розміру провідника, товщини і матеріалу ізоляції,
- відстані між провідником і землею,
- відстані між провідниками,
- електрофізичних параметрів матеріалів ізоляційного проміжку, зокрема, їх діелектричної проникності,

що дає змогу аналізувати вплив конструкції і розташування захищеного (ізольованого) проводу на напруженість електричного поля.

**Основні результати.** Виконано аналітичну побудову картини електричного поля між поверхнею провідника і землею та між поверхнями провідників за

допомогою подвійного конформного перетворення системи координат.

Для цього відповідні еквіпотенціали, розташовані в комплексній площині  $Z(x; jy)$  (рис.1), зображені у вигляді концентричних кіл в комплексній площині  $W(u; jv)$  за допомогою конформного перетворення  $W = 1/Z$ :

$$u = x/(x^2 + y^2); v = -y/(x^2 + y^2). \quad (1)$$

При цьому умову Коші-Римана  $\partial u/\partial x = \partial v/\partial y$  і  $\partial u/\partial y = -\partial v/\partial x$  виконано тому:  $dU = -E_w dW = -E_z dZ$ , де модуль лінійного коефіцієнту перетворення  $dZ/dW = x^2 + y^2$ , а  $E_w$  знаходиться за відомими формулами для поля двох концентричних кіл [1].

Для реалізації цього перетворення в поставленій задачі знайти аналітичне рішення для будь-якої точки неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами, зокрема для шаруватого діелектрика, який утворюється з ізоляції проводу і оточуючого повітря, розроблено програми подвійного конформного перетворення системи координат.

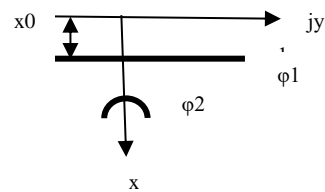


Рисунок 1 – Схема розташування еквіпотенціалів електричного поля між поверхнею провідника ( $\phi_2$ ) і землею ( $\phi_1$ ) в комплексній площині  $Z(x; jy)$

Можливість побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею або між проводами ілюструє рис.2. Приклад розподілу напруженості електричного поля між проводом і землею наведено на рис.3.

Захищені проводи є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки. Вони мають бути конкурентними з відповідною імпоротною продукцією і в першу чергу це стосується полімерної ізоляції, технологічні і експлуатаційні властивості якої можуть суттєво відрізнятися.

Наприклад, тривало допустима температура ізоляції із зшитого поліетилену ( $90^\circ\text{C}$ ) суттєво перевищує цю характеристику у аналогічного за хімічним складом термопластичного поліетилену ( $70^\circ\text{C}$ ). При цьому електрофізичні параметри, які впливають на напруженість електричного поля в діелектрику, у цих двох матеріалів однакові.

Інший, широко застосований як ізоляція проводів, полімерний матеріал ізоляційний полівінілхлоридний пластикат відрізняється від двох вищезгаданих саме електрофізичними параметрами, які впливають на напруженість електричного поля в діелектрику. Відносна діелектрична проникність  $\epsilon$  поліетилену дорівнює 2,3, а для полівінілхлоридного пластикату  $\epsilon$  дорівнює 6.

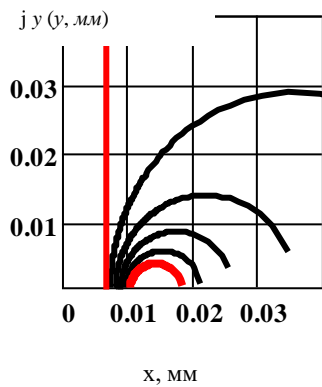


Рисунок 2 – Приклад аналітично побудованих екіпотенціальей неоднорідного електричного поля між площиною і паралельним їй циліндром за допомогою подвійного конформного перетворення системи координат

Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами є важливою складовою для навчального процесу та профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів і студентів навчальних технічних закладів електроенергетики, електроізоляційної та кабельної техніки.

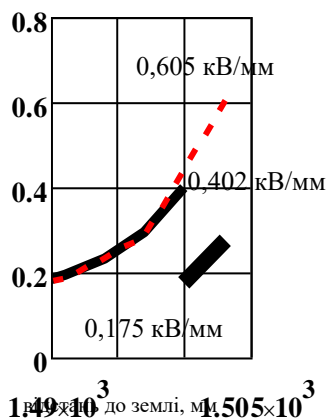


Рисунок 3 –

Приклад розподілу

максимальної напруженості електричного поля між проводом повітряної лінії на 35 кВ, виконаної провідником з площею перерізу 70 мм<sup>2</sup> і землею: суцільні лінії – захищений провід з ізоляцією з поліетилену; штрихова – не ізольований провід

Дані рис. 3 свідчать, що на третину зменшується напруженість ел.поля в повітрі біля проводу, якщо провід ізольований.

Максимальна напруженість електричного поля біля поверхні проводу змінюється скачком, оскільки на поверхні ізоляції проводу є заряди в наслідок поляризації діелектрика [2].

Використаний метод розрахунку дозволяє аналітично дослідити залежність максимальної напруженості електричного поля від відстані до землі для різних умов прокладання ЛЕП і різних матеріалів ізоляції.

В змінному електричному полі розподіл напруженості в шаруватому діелектрику обернено пропорційний його діелектричній проникності [3].

Дослідження впливу полярності діелектрика на розподіл електричного поля між захищеними проводами ілюструє рис.4, на якому наведено результати порівняння електричного поля між захищеними проводами (лінійна напруга 35 кВ) при застосуванні двох різних за природою поляризації, але найбільш поширених діелектриків.

Фізична природа впливу поляризації діелектрика на розподіл електричного поля в лінії із захищеними проводами полягає в тому, що в наслідок поляризації діелектрика на його поверхні присутні зв'язані заряди і в більш полярному діелектрику густина цих зарядів більша. Запропонований метод розрахунку дозволить аналітично досліджувати засоби зменшення напруженості електричного поля.

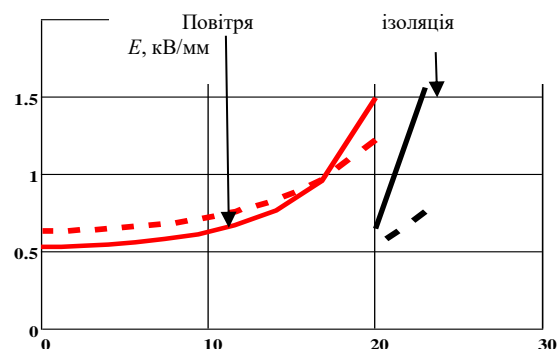


Рисунок 4 – Залежності максимальної напруженості електричного поля від відстані до осі  $E = f(x)$  симетрії між захищеними проводами (лінійна напруга 35 кВ, відстань між проводами 40 мм) при застосуванні двох різних за природою поляризації, але найбільш поширених діелектриків товщиною 3 мм: суцільні лінії – поліетилен ( $\epsilon = 2,3$ ); штрихові лінії – полівінілхлоридний пластикат ( $\epsilon = 6$ )

Поляризація ізоляції проводу зумовлює появу зв'язаних зарядів на поверхні поляризованого діелектрика, густина яких прямопропорційна його відносній діелектричній проникності. Це суттєво змінює розподіл електричного поля між проводами:

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні провідника суттєво зменшується, причому зменшення тим значніше, чим більша відносна діелектрична проникність, що свідчить на користь застосування полярних полімерів для ізоляції проводу;

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізольованого проводу в повітрі помітно більша в разі застосування полярного полімеру як ізоляції проводу, що може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні; і це свідчить на користь застосування неполярних полімерів для ізоляції проводу, особливо для відносно малих перерізів провідника (10 мм<sup>2</sup>... 25 мм<sup>2</sup>);

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізольованого проводу змінюється скачком, оскільки на поверхні ізоляції проводу є зарядженою в наслідок поляризації діелектрика; цей

скачок тим більший, чим більша відносна діелектрична проникність, що також може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні.

Відомо [3], що застосування ізолюваних проводів впливає на проблеми блискавкозахисту: за грозового перекриття ізоляторів дуга промислової частоти не має можливості переміщуватися вздовж проводу й горить в місці пробою ізоляції до моменту вимкнення лінії, що може призвести до перепалювання ізоляції ЗП, а у випадку великих струмів КЗ й до перепалювання проводу.

Використаний метод розрахунку дозволяє аналітично досліджувати засоби зменшення максимальної напруженості електричного поля при застосуванні ізолюваних проводів в межах частот, за яких електричне поле може бути представлене як квазістаціонарне. Відповідні висновки для високочастотних явищ, якими є комутаційні і грозові перенапруження мають бути досліджені експериментально.

**Висновки:** 1. Вимоги, зумовлені нагальними потребами збільшення пропускної спроможності ліній електропередачі, входять в протиріччя з вимогами захисту довкілля і значного підвищення вимог безпеки в експлуатації (міжнародні стандарти серії ISO). Вирішення протиріччя між вимогами збільшення потужності передачі і названих сучасних вимог полягає в застосуванні ізолюваних (захищених) проводів повітряних ліній електропередачі.

2. Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами.

3. Ізоляцію захищеного проводу можна розглядати як своєрідну градійовану (шарувату) ізоляцію, що складається з полімерного діелектрика і оточуючого повітря. Наявність ізоляції зменшує напруженість електричного поля безпосередньо біля поверхні жили. і це зменшення, зумовлене явищем поляризації діелектрика, залежить саме від діелектричної проникності матеріалу ізоляції.

4. Максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізолюваного проводу змінюється скачком, оскільки на поверхня ізоляції проводу є

зарядженою в наслідок поляризації діелектрика; цей скачок тим більший, чим більша відносна діелектрична проникність, що також може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні.

5. Можливість аналітичного рішення і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля для будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів неоднорідного електричного поля між проводом і землею а саме – розміру провідника; – відстані між провідником і землею; – матеріалів ізоляційного проміжку і їх електрофізичних характеристик дає змогу дослідити вплив конструкції і розташування захищеного (ізолюваного) проводу на безпекові і екологічні фактори його експлуатації.

6. Аналіз фізичних явищ і створення конкретних програмних засобів побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля в інноваційних технічних пристроях є важливою складовою профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів для навчальних технічних закладів електроенергетики та кабельної техніки.

#### Список літератури

1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В.П.Карпушенко, Л.А.Щебенюк, Ю.О. Антоненко, О.А. Науменко – Харків.: Region-інформ, 2000. – 376 с.
2. Тареев В. М. Электротехнические материалы / В. М. Тареев, Н. П. Богородицкий, И. В. Пасынков. – Москва.: Мир, 1979. – 360 с.
3. Пешков И. Б. Специальные методы исследований и испытаний электрической изоляции силовых кабелей среднего и высокого напряжения / И. Б. Пешков, В. Л. Овсиенко, М. Ю. Шувалов // Кабели и провода. – 2015. – № 1. – с. 9 – 14.

#### References (transliterated)

1. Karpushenko V.P., Shchebenjuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist' [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).
2. Tareev V. M. Electrical engineering materials / V. M. Tareev, N. P. Bogorodickij, V. V. Pasyнков. – Moscow.: Mir, 1979. – 360 p.
3. Peshkov I. B., Ovsienko V. L., Shuvalov M. Ju. / Special'nye metody issledovaniy i ispytaniy jelektricheskoy izoljacii silovyh kabelej srednego i vysokogo naprjazhenija [Special methods of research and testing of electrical insulation of power cables of medium and high voltage]. Kabeli i provoda. 2015, no. 1, pp. 9 – 14.

*Надійшла (received) 18.10.2019*

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гурин Анатолій Григорович (Гурин Анатолій Григорьевич, Gurin Anatolij)** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Shchebenjuk Lesia)** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Голік Оксана Вячеславівна (Голік Оксана Вячеславовна, Golik Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Ільченко Ольга Вячеславівна (Ільченко Ольга Вячеславовна, Ilchenko Olga Vjacheslavovna)** – вчитель КЗ «ХСШ ім. В.Г.Короленка», м. Харків;

**Родяхіна Тетяна Анатоліївна (Родяхина Татьяна Анатольевна, Rodjachina Tatiana)** – заступник директора КЗ «ХСШ ім. В.Г.Короленка»;

*О. А. ДАНИЛОВА, Д. О. ЗОЛОТАРЬОВ, Л. І. ЛИСЕНКО*

### **АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ «АКТИВНИЙ БУДИНОК» В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ПІВНІЧНО-СХІДНОЇ УКРАЇНИ**

«Активний будинок» це будинок з позитивним енергобалансом, важливою особливістю якого є власне виробництво електроенергії за рахунок відновлюваних джерел, при цьому кількість виробленої енергії перевищує власні потреби, що дозволяє поставити надлишок у локальну мережу. В роботі досліджено можливість і доцільність впровадження цієї технології на прикладі об'єднання 10 «активних» будинків в Харківській області. Розглянуто три групи мешканців, що відрізняються характером електроспоживання, можливість покриття усередненого добового навантаження об'єднання «активних» будинків за рахунок 315 ФЕМ PV-260М-260 Вт, 4 ВЕУ СВ-6.7/2000-7 кВт і 16 акумуляторних батарей Tesla Powerwall 2 АС. Проаналізовано заходи що до покриття споживання об'єднання «активних» будинків у випадку несприятливих погодних умов. Оцінено економічну ефективність інвестицій в такий проект.

**Ключові слова:** «активний» будинок, електроспоживання, відновлювані джерела енергії

*Е. А. ДАНИЛОВА, Д. О. ЗОЛОТАЕВ, Л. И. ЛЫСЕНКО*

### **АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «АКТИВНЫЙ ДОМ» В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ УКРАИНЫ**

«Активный дом» это дом с положительным энергобалансом, важной особенностью которого является собственное производство электроэнергии за счет возобновляемых источников, при этом вырабатывается электроэнергии больше, чем необходимо для покрытия собственных нужд, что позволяет поставлять излишки в местную сеть. В работе исследована возможность и целесообразность внедрения рассматриваемой технологии на примере массива из десяти «активных» домов в Харьковской области. Рассмотрены три группы домов, различающихся характером электропотребления, возможность покрытия усредненной суточной нагрузки объединения «активных» домов за счет 315 ФЭМ PV-260М 100 Вт, 4 ВЭУ СВ-6.7/2000-7 кВт и 16 аккумуляторных батарей Tesla Powerwall 2 АС. Проанализированы мероприятия по покрытию нагрузки массива «активных» домов в случае неблагоприятных погодных условий. Оценена экономическая эффективность инвестиций в такой проект.

**Ключевые слова:** «активный» дом, электропотребление, возобновляемые источники энергии

*О. А. DANILOVA, D. O. ZOLOTAREV, L. I. LYSENKO*

### **ANALYSIS OF «ACTIVE HOUSE» TECHNOLOGY IMPLEMENTATION EXPEDIENCY UNDER CLIMATOLOGIC CONDITIONS IN NORTHEASTERN UKRAINE**

“Active house” is a house with positive energy balance (“energy-plus house”) the important feature of which consists in self-contained electricity production via renewable energy sources, the amount of electricity generated exceeding the demand. It allows supplying the electricity surplus to local grids. The paper considers a feasibility and expediency of implementing the considered technology in Northeastern Ukraine by an example of a ten-“active”-house estate in Kharkiv region. The houses are grouped in three types according to the electricity consumption charts depending on the house dwellers behavior. The average electricity demand versus electricity produced by 21 PV 260 W modules and a 4 kW wind mill has been analyzed for various meteorological conditions to show the necessity of uniting the individual power supply systems into a common grid, which results in smoothening the load curve, with an additional common solar and wind farm and an accumulator bank to cover the load in case of unfavorable weather. The operation of the renewable energy sources and the battery system is controlled by a smart grid to rationally employ the available capacity and distribute electricity generated among the consumers. The payback period is assessed to approach 12 years with allowance for electricity bill rise with time and electricity surplus selling to the grids by feed-in tariffs.

**Keywords:** «active house», electricity consumption, renewable energy sources

**Вступ.** У 2016 р. Україна підписала і ратифікувала Паризьку угоду [1], відповідно до якої була розроблена Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року [2]. Згідно з цим планом країна планує скоротити викиди парникових газів до 70 % в 2050 році порівняно з показниками 1990 р. Реалізація цього плану буде здійснюватися за рахунок масштабного впровадження сучасних енергоефективних технологій, до яких відноситься і технологія «активних будинків»: будинків, які використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) для забезпечення власних потреб в електроенергії, поставляють її надлишки у мережу [3,4]. Згідно з «Енергетичною стратегією України до 2035 року» [5], в 2035 році частка ВДЕ має становити не менше 25 % від загальної первинної поставки енергії. Розповсюдження

житлових масивів з «активних» будинків може значно збільшити частку відновлюваних джерел у загальному енергетичному балансі.

**Мета статті.** Оцінити ефективність застосування технології «активний будинок» в кліматичних умовах Харківської області.

**Результати дослідження.** Було проаналізовано електроспоживання для трьох груп «активних» будинків із різними режимами споживання. Всі три групи поєднані в спільний житловий масив з метою зниження пікового навантаження. Електроспоживання будинків розділено на 6 режимів: робочий і вихідний дні влітку та взимку, а також дні обмеженого електроспоживання (аварійні дні) для зимового та літнього періоду. Було прийнято, що обмеження

©, О.А. Данилова, Д.О. Золотарьов, Л.І.Лисенко, 2019



споживання електроенергії не може тривати більш, ніж 24 години, в іншому випадку це негативно впливає на рівень комфорту мешканців. Рівень споживання електроенергії у робочі та вихідні дні літку та взимку, а також у дні аварійного електропостачання для зимового та літнього періоду споживачів, а також результуючі графіки електроспоживання для масиву «активних» будинків в залежності від дня тижня та пори року наведено на рис 1-3. Перша група електроспоживачів, до складу якої входить 3 будинки, характеризується яскраво вираженими піками в ранковий та вечірній період, що зумовлено відсутністю дорослих мешканців протягом робочого дня. Для вихідних днів характерне високе електроспоживання внаслідок підвищеного використання таких електроприймачів, як: пілосос, посудомийка, праска, пральна машинка і т.п. Друга група електроспоживачів, до складу якої входить 4 будинки, характеризується

більш пологими піками в ранковий та вечірній період, відносно першої групи. Це зумовлено тим, що тільки один дорослий мешканець будинку відсутній протягом робочого дня. Для вихідного дня рівень електроспоживання відрізняється від першої групи за рахунок більш раціонального використання електроприймачів. Третя група електроспоживачів, до якої входить 3 будинки, різко відрізняється від попередніх двох, за рахунок того, що у даній групі дорослі мешканці працюють дистанційно від своїх місць роботи, що зніщує ранковий та вечірній піки. Окрім того, поняття «робочий» та «вихідний» день для цієї групи відрізняються тільки збільшеним використанням побутових електроприймачів. Рівень електронавантаження, характерний для вихідних днів у других групах, зніщується на робочі дні, а в суботу та неділю електроспоживання буде на рівні звичайного робочого дня. .

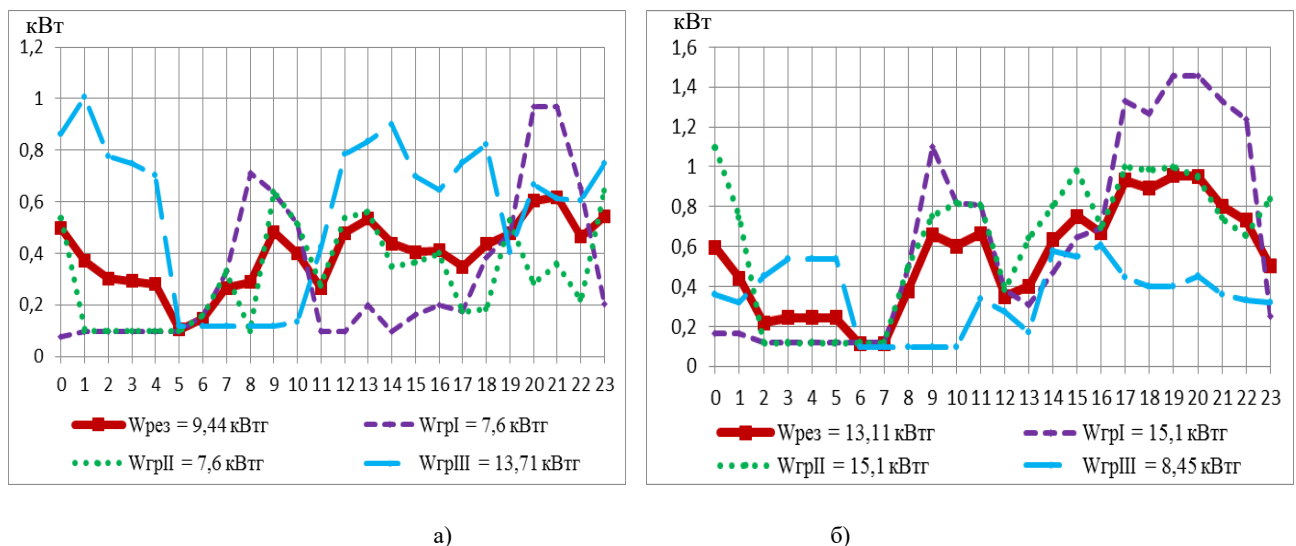


Рисунок 1 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків літку а) робочий день; б) вихідний день

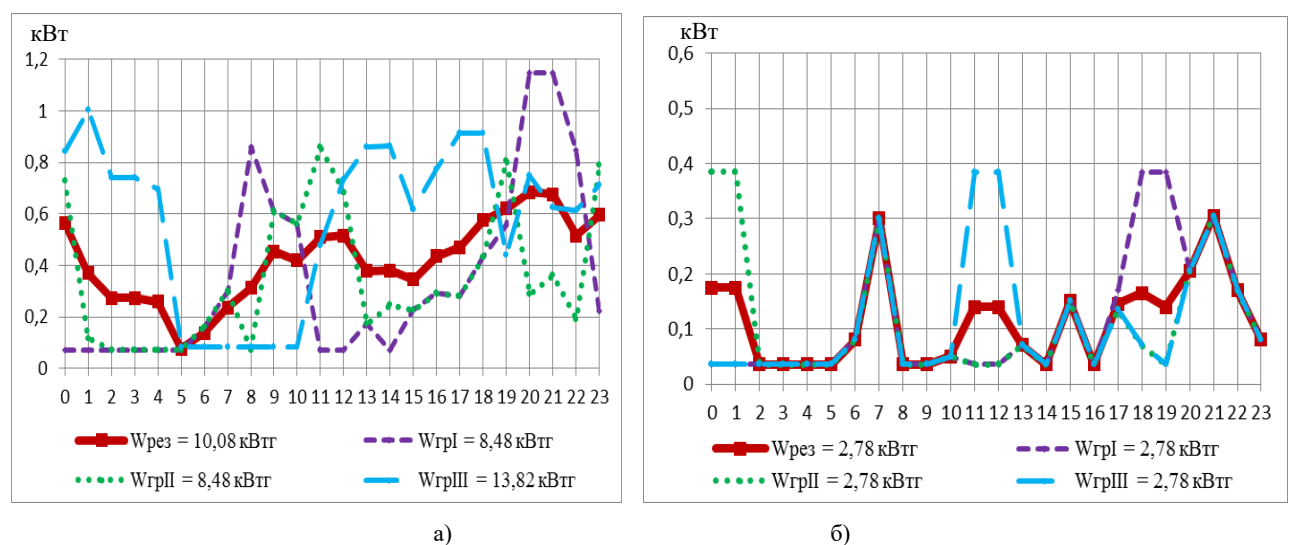


Рисунок 2 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків взимку а) робочий день; б) вихідний день

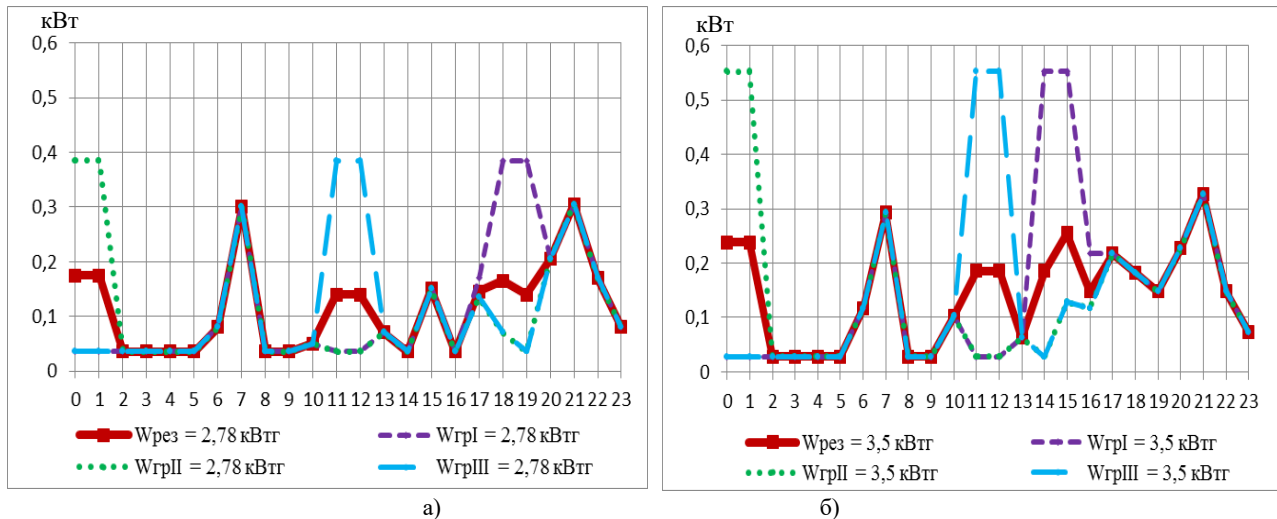


Рисунок 3 – Електроспоживання об'єднання «активних» будинків в день аварійного електропостачання а) влітку; б) взимку

Як видно з рисунків, усереднене по всім споживачам навантаження має істотно знижені максимуми, в кількох випадках більш ніж на 50 %, що підтверджує рішення об'єднати дома в один масив.

Було проаналізовано покриття середнього добового навантаження «активного» будинку за рахунок 21 ФЕМ PV-260М-260 Вт і одній ВЕУ СВ-6.7/1000-4 кВт в залежності від погодних умов для

кількох днів у різні сезони (рис. 4). Метеорологічні дані в місцевості, що розглядається як місце розташування житлового масиву з десяти «активних» будинків, були взяті на сайті POWER Data Access Viewer [6]. В розрахунках використовувалися добові значення швидкості вітру та сонячної радіації за 2015-2016 роки.

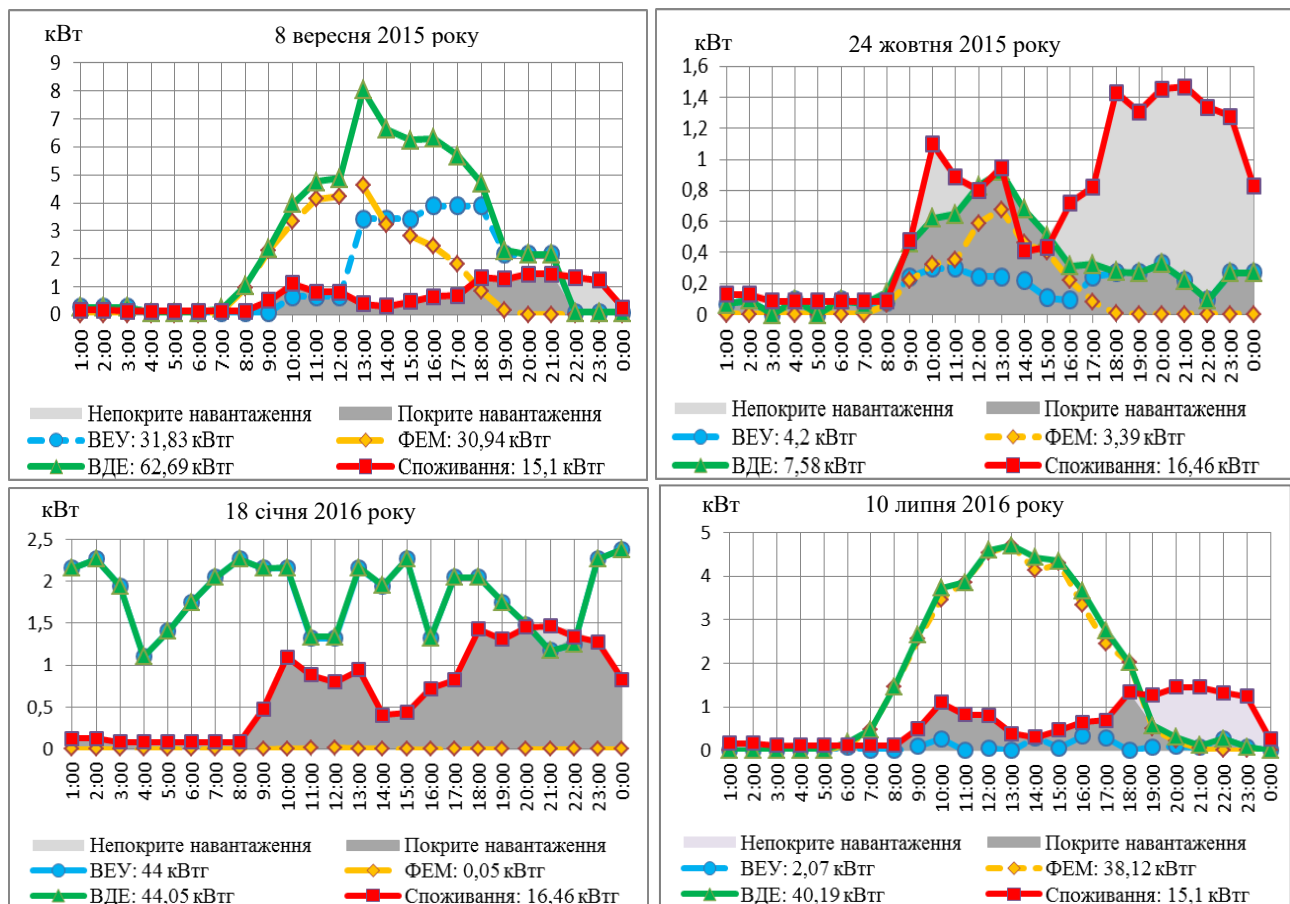


Рисунок 4 – Покриття середнього добового навантаження «активного» будинку в залежності від погодних умов

Як видно з рисунку, максимуми споживання і генерації електроенергії не завжди збігаються. Крім того, при несприятливих погодних умовах потужності встановлених джерел недостатньо для покриття навантаження. Тому було розглянуто інші рішення щодо потужності генерації: електропостачання в об'єднанні «активних» будинків здійснюється за рахунок індивідуально встановлених 21 ФЕМ PV-260М з інверторами Huawei SUN2000-5KTL та спільної електростанції, що включає в себе 115 ФЕМ PV-260М-260 Вт, 4 BEU CB-9/2000-7 кВт, акумуляторну батарею з 16 акумуляторів Tesla Powerwall 2 і два інвертора Huawei SUN2000-33KTL-A (табл. 1). Роботою всієї системи управляє інтелектуальна мережа, яка забезпечує обробку інформації про генерацію встановлених ВДЕ і електроспоживання кожного будинку та видає команди на розподіл електроенергії.

Таблиця 1 – Основне обладнання для електропостачання житлового масиву з десяти «активних» будинків

Тип обладнання	Назва	Потужність	Кількість
Фотоелектричний модуль	Pillar PV-260М	0,26 кВт	325
Вітроенергетична установка	CB-9/2000	7 кВт	4
Акумуляторна батарея	Tesla Powerwall 2	14 кВт·г	16
Інвертор	Huawei SUN2000-5KTL	5 кВт	10
	Huawei SUN2000-33KTL-A	30 кВт	2

Розрахунок інтенсивності сонячного випромінювання виконано за методикою, що представлена в [7]. Як випливає з розрахунків, фактично завжди загальна виробка електроенергії встановленими джерелами сумарною потужністю 112,5 кВт,  $W_{\text{ВДЕ сум}}$ , перевищує кількість споживаної електроенергії  $W_{\text{спож}}$ . Проте, можуть бути періоди з несприятливими погодними умовами, коли і вітер слабкий, і небо похмуре. Такі періоди можуть тривати від декількох годин до одного або декількох днів. У ці періоди рівень електроспоживання перевищує рівень генерації і тому покриття навантаження здійснюється за допомогою акумуляторної батареї (АКБ). На рис. 5 представлені графіки вироблення електроенергії запропонованою системою, електроспоживання, а також рівень заряду восьми використовуваних акумуляторів для випадку із сприятливими в цілому погодними умовами з короткотривалим падінням генерації. Як видно з рисунку, рівень заряду акумуляторів, які забезпечують відсутню потужність протягом декількох годин, значно не знижується і досить швидко відновлюється, як тільки генерація зростає. При цьому, мешканці будинків житлового масиву ніяк не обмежують своє електроспоживання.

В табл. 2 наведені оціночні розрахунки щодо річного загального електроспоживання масивом з десяти «активних» будинків та кількості

електроенергії, яка виробляється запропонованими джерелами.

Таблиця 2 – Кількість електричної енергії, що виробляє і споживає житловий масив з десяти «активних» будинків (погодні дані за 2015-2016 роки)

Міс	$W_{\text{ВЕС}}$ , кВт·г	$W_{\text{ФЕС}}$ , кВт·г	$W_{\text{ВДЕ сум}}$ , кВт·г	$W_{\text{спож}}$ , кВт·г	$N_{\text{обмеж дн}}$
Вер	4405	11746	15926	3132	-
Жовт	3678	8419	11928	3403	1
Лист	5160	2304	7360	3530	1
Груд	6544	1488	7920	3518	2
Січ	4992	1031	5938	3197	5
Лют	5314	4412	9590	3309	1
Бер	5432	5886	11159	3284	3
Квіт	6021	11128	16909	3339	-
Трав	3226	12902	15902	3392	-
Чер	2547	13315	15639	3229	-
Лип	2610	14145	16520	3451	-
Серп	3345,5	12065	15194	3334	-
<b>Всього</b>	<b>53273</b>	<b>98844</b>	<b>149988</b>	<b>40118</b>	<b>13</b>

Інша ситуація, коли несприятлива для роботи встановлених відновлюваних джерел енергії погода триває досить довго і, відповідно, електропостачання здійснюється в основному від акумуляторної батареї. В таких випадках поведінка споживачів виявляє значний вплив на безперебійність роботи системи електропостачання всього масиву «активних» будинків: мешканці можуть продовжувати споживати електроенергію як завжди, без урахування погодних умов, або перейти на режим зниженого або навіть аварійного електроспоживання. Як видно з табл. 2, протягом року кількість днів, коли потрібно скорегувати електроспоживання,  $N_{\text{обмеж дн}}$ , не дуже велика і в основному припадає на зимовий період. На рис. 6 показана глибина розряду акумуляторних батарей при різних режимах електроспоживання в період з 17:00 12 березня до 06:00 13 березня, коли спостерігається фактично нульовий рівень вироблення електричної енергії за рахунок ВДЕ. У випадку відмови від використання аварійного режиму (рис. 6а) рівень заряду АКБ за цей час встигає знизитись до 0%, що призводить до провалу в електропостачанні для усього житлового масиву, а також до скорочення терміну експлуатації встановлених акумуляторних батарей. За умови впровадження аварійного режиму електроспоживання (рис. 6б), рівень заряду АКБ дозволяє компенсувати фактичну відсутність вироблення електричної енергії в розглянутому інтервалі часу. При цьому режим зниженого споживання починається заздалегідь і діє протягом доби 12 березня. З 08:00 13 березня рівень вироблення стабілізується, за рахунок чого рівень заряду акумуляторних батарей швидко досягає свого максимуму.

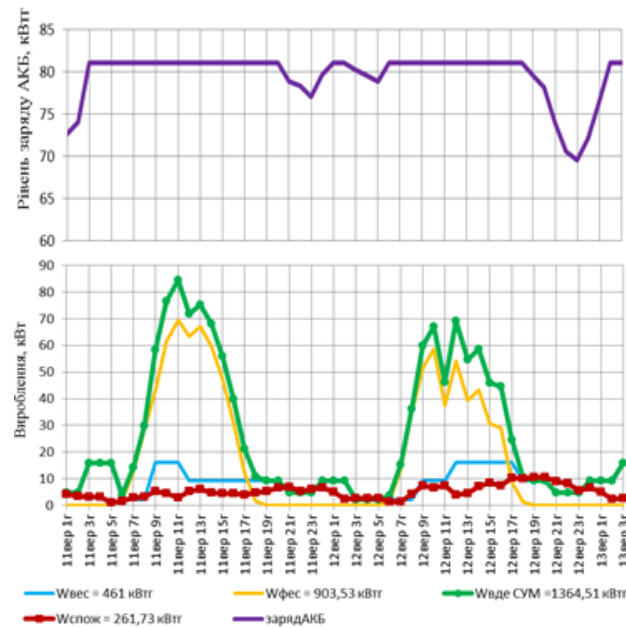


Рисунок 5 – Покриття споживання житлового масиву «активних» будинків у випадку короткострокових несприятливих погодних умов

На рис. 7 наведені графіки вироблення та споживання електричної енергії масивом «активних» будинків, а також рівень заряду АКБ для випадку довготривалих несприятливих погодних умов в період з 20:00 10 грудня до 08:00 12 грудня, тобто півтори доби. У цій

ситуації заряду акумуляторних батарей вистачає для покриття дефіциту вироблення за умови використання всіх встановлених акумуляторів та зниження електроспоживання до аварійного рівня протягом 12 грудня, завдяки чому рівень заряду АКБ стабілізуються.

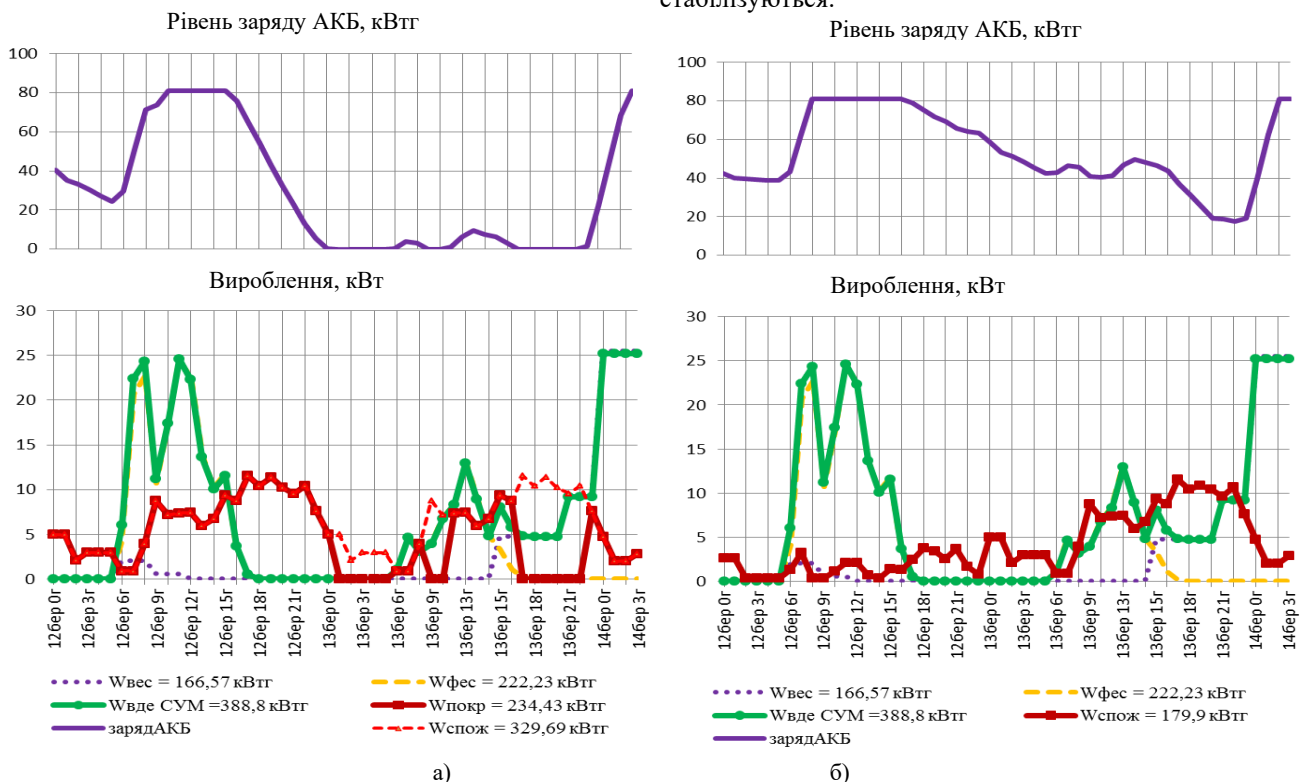


Рисунок 6 – Покриття споживання масиву «активних» будинків у випадку довготривалих несприятливих погодних умов а) без режиму обмеженого електроспоживання; б) з режимом обмеженого електроспоживання

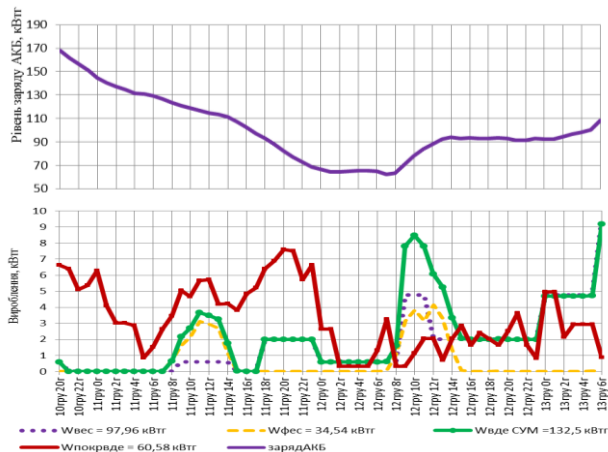


Рисунок 7 – Покриття споживання масиву «активних» будинків у випадку несприятливих погодних умов протягом півтори доби

В роботі були виконані оцінки економічної ефективності впровадження технології «активний будинок» в кліматичних умовах Харківської області і інвестицій в створення запропонованої спільної системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії з інтелектуальною мережею управління для об'єднання «активних» будинків. Простий термін окупності складає майже 12 років, але з урахуванням нарощення доходів, що надходять за рахунок економії енергоресурсів, термін окупності знижується на три роки. Індекс прибутковості інвестицій 0,76 при нормі дисконту 10 % свідчить про невелику економічну привабливість такого проекту, проте при його впровадженні викиди парникових газів в навколишнє середовище знизяться майже на 10 тисяч тон (у CO<sub>2</sub> еквіваленті).

**Висновки.** Проведене дослідження показало, що впровадження технології «активний» будинок у Південно-Східній Україні може бути доцільним за умовою об'єднання таких будинків в єдиний масив зі спільною системою електропостачання на базі відновлюваних джерел енергії і акумуляторних батарей, яка контролюється інтелектуальною мережею. Це дозволяє вирівнювати графіки споживання електроенергії та знижувати пікове навантаження. Безперервність постачання електроенергії у довготривалих несприятливих погодних умовах забезпечується за рахунок спільної роботи ВДЕ і певної кількості акумуляторних батарей,

а також обмеження електроспоживання, іноді до аварійного рівня. Однак, великий термін окупності таких систем (у розглянутому прикладі він досягає 12 років навіть з урахуванням продажу надлишків електроенергії в локальну електромережу за зеленим тарифом) і невеликий індекс прибутковості можуть відвернути інвесторів.

#### Список літератури

1. The Paris Agreement. [Електронний ресурс] – URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en)
2. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050. [Електронний ресурс] – URL: [http://menr.gov.ua/files/docs/Projekt/LEDS\\_ua\\_last.pdf](http://menr.gov.ua/files/docs/Projekt/LEDS_ua_last.pdf)
3. Net Zero Energy Solar Buildings. [Електронний ресурс] – URL: <http://task40.iea-shc.org/>
4. Milorad Bojić, Novak Nikolić, Danijela Nikolić, Jasmina Skerlić, Ivan Miletić. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions / *Applied Energy* Volume 88, Issue 7, July 2011, Pages 2407-2411. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911000146?via%3Dihub>
5. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. [Електронний ресурс] – URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
6. POWER Data Access Viewer. [Електронний ресурс] – URL: <https://power.larc.nasa.gov>
7. Д. М. Косатий, І. Н. Кудрявцев, К. В. Махотило. *Фотоелектрические системы. Учебное пособие.* - Харьков.: HTMT, 2014. - 399 с.

#### References (transliterated)

1. The Paris Agreement. Available at: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en)
2. Strategia nizkovugletseвого rozvytku Ukrainy do 2050 [Low emission development strategy of Ukraine till 2050]. Available at: [http://menr.gov.ua/files/docs/Projekt/LEDS\\_ua\\_last.pdf](http://menr.gov.ua/files/docs/Projekt/LEDS_ua_last.pdf)
3. Net Zero Energy Solar Buildings. [Electronic resource] – Available at: <http://task40.iea-shc.org/>
4. Milorad Bojić, Novak Nikolić, Danijela Nikolić, Jasmina Skerlić, Ivan Miletić. Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions / *Applied Energy* Volume 88, Issue 7, July 2011, Pages 2407-2419. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911000146?via%3Dihub>
5. Energetychna strategija Ukrainy na period do 2035 roku [Energy strategy of Ukraine till 2035]. Available at <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
6. POWER Data Access Viewer. Available at: <https://power.larc.nasa.gov>
7. D. M. Kosatij, I. N. Kudriavtsev, K. V. Makhotilo. *Photovoltaic systems. Tutorial [Fotoelektricheskie sistemy. Uchebnoe posobie]*. Kharkiv: NTMT, 2014. – 399 p.

Надійшла (received) 17.12.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Золотарьов Денис Олегович (Золотарев Денис Олегов, Zolotarev Denis Olegovich)** – студент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: [denz010295@gmail.com](mailto:denz010295@gmail.com)

**Данилова Олена Анатоліївна (Данилова Елена Анатольевна, Danilova Olena Anatoliivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID iD: 0000-0003-0353-9848; e-mail: [daniipova.l@gmail.com](mailto:daniipova.l@gmail.com)

**Лисенко Людмила Іванівна (Лысенко Людмила Ивановна, Lysenko Ludmila Ivanovna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID iD: [0000-0002-1566-493X](https://orcid.org/0000-0002-1566-493X); e-mail: [ludminalysenko@gmail.com](mailto:ludminalysenko@gmail.com)

УДК 621.311

**О. М. ДОВГАЛЮК, Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, О. Є. ПІРОТТИ, Р. В. БОНДАРЕНКО,  
Т. В. СИРОМЯТНИКОВА, І. С. ЯКОВЕНКО**

## **ОЦІНКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МІСЬКИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ЕНЕРГОРИНКУ УКРАЇНИ**

Виконано аналіз сучасного технічного стану та перспектив розвитку розподільних електричних мереж України. Розглянуті основні тенденції та динаміка зміни показників надійності функціонування розподільних електричних мереж України. Визначені основні шляхи підвищення ефективності функціонування міських розподільних електричних мереж в умовах нового ринку електричної енергії, на основі яких розроблені організаційно-технічні заходи для підвищення надійності роботи міських розподільних електричних мереж. Розроблено техніко-економічний критерій для оцінки ефективності впровадження заходів з підвищення надійності роботи розподільних електричних мереж, який враховує особливості роботи міських розподільних електричних мереж в структурі нового ринку електричної енергії в Україні, величину показників надійності та якості роботи міських розподільних електричних мереж, витрати на заходи з підвищення надійності роботи міських розподільних електричних мереж та величину компенсації споживачам за недотримання гарантованих стандартів якості надання послуг з електропостачання. З використанням запропонованого критерію проведено оцінку доцільності застосування розроблених груп заходів з підвищення надійності роботи міських розподільних електричних мереж в умовах нового лібералізованого ринку електричної енергії в Україні та обґрунтовано вибір найбільш ефективних із запропонованих заходів.

**Ключові слова:** розподільна електрична мережа, показники надійності, критерій ефективності, технічні заходи, організаційні заходи, система накопичення, електрична енергія, ринок електричної енергії, ефективність

**О. Н. ДОВГАЛЮК, Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, О. Е. ПИРОТТИ, Р. В. БОНДАРЕНКО,  
Т. В. СЫРОМЯТНИКОВА, И. С. ЯКОВЕНКО**

## **ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОРЫНКА УКРАИНЫ**

Выполнен анализ современного технического состояния и перспектив развития распределительных электрических сетей Украины. Рассмотрены основные тенденции и динамика изменения показателей надежности функционирования распределительных электрических сетей Украины. Определены основные пути повышения эффективности функционирования городских распределительных электрических сетей в условиях нового рынка электрической энергии, на основе которых разработаны организационно-технические мероприятия для повышения надежности работы городских распределительных электрических сетей. Разработан технико-экономический критерий для оценки эффективности внедрения мероприятий по повышению надежности работы распределительных электрических сетей, учитывающий особенности работы городских распределительных электрических сетей в структуре нового рынка электрической энергии в Украине, величину показателей надежности и качества работы городских распределительных электрических сетей, затраты на мероприятия по повышению надежности работы городских распределительных электрических сетей и величину компенсации потребителям за несоблюдение гарантированных стандартов качества предоставления услуг по электроснабжению. С использованием предложенного критерия проведена оценка целесообразности применения разработанных групп мероприятий по повышению надежности работы городских распределительных электрических сетей в условиях нового либерализованного рынка электроэнергии в Украине и обоснован выбор наиболее эффективных из предложенных мероприятий.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, показатели надежности, критерий эффективности, технические мероприятия, организационные мероприятия, система накопления, электрическая энергия, рынок электрической энергии, эффективность

**OKSANA DOVGALYUK, HALYNA OMELIANENKO, ALEXEY PIROTTI, ROMAN BONDARENKO,  
TATYANA SYROMYATNIKOVA, IVAN YAKOVENKO**

## **MEASURES EVALUATION TO INCREASE THE WORK EFFICIENCY OF CITY DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS IN CONDITIONS THE UKRAINE ENERGY MARKET**

The current technical condition and prospects analysis for the distribution electric networks development in Ukraine is completed. The main trends and changes dynamics in the reliability indicators of the Ukraine distribution electric networks functioning are considered. The main ways to improve the urban distribution electric networks functioning in the new electricity market, on the basis of which organizational and technical measures have been developed to increase the urban distribution electric networks reliability, have been identified. The technical and economic criterion for assessing the measures implementation effectiveness to increase the distribution electric networks reliability, taking into account the urban distribution electric networks features in the new electricity market structure in Ukraine, the reliability and quality urban distribution electric networks functioning indicators, the measures cost to improve reliability the urban distribution electric networks operation and the compensation amount to consumers for non-compliance guaranteed quality standards for the electricity services provision has been developed. The application appropriateness of the developed measures groups to improve the urban distribution electric networks reliability in the new liberalized electricity market in Ukraine was assessed using the proposed criterion, and the most proposed measures effective was justified.

**Keywords:** distribution electric network, reliability indicators, performance criteria, technical measures, organizational measures, storage system, electric energy, electric energy market, efficiency

**Вступ.** На сьогоднішній день існує стійка тенденція зростання попиту на електроенергію з боку споживачів при одночасному підвищенні вимог до її якості, збільшення частки розподіленої генерації у загальній структурі виробництва енергії та запровадження нового ринку електричної енергії в

© О. М. Довгалюк, Г. В. Омеляненко, О. Є. Піротті, Р. В. Бондаренко, Т. В. Сиромятнікова, І. С. Яковенко, 2019

енергосистемі України. В такій ситуації умови функціонування розподільних електричних мереж (РЕМ) змінюються та вимоги до забезпечення якості надання послуг з розподілу та постачання електричної енергії зростають. В умовах реформування енергетичного ринку України РЕМ виділені в окрему структурну одиницю і відіграють важливу роль у забезпеченні нормальної роботи роздрібного ринку електричної енергії.

Міські РЕМ мають особливості побудови, структури, вимог до забезпечення режимів, що потребує урахування при забезпеченні їх надійного функціонування в умовах енергоринку.

Таким чином, розробка та впровадження заходів для підвищення надійності та ефективності функціонування міських РЕМ на сьогоднішній день є актуальною задачею для енергетичної системи України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню особливостей роботи РЕМ приділяють багато уваги українські та іноземні вчені, серед яких слід відзначити Dugan R.C., Маки К., Кудрю С.О., Кириленко О.В., Праховника А.В., Тугая Ю. І., Яндульського О.С., Попова В.А., Кулика В.В., Зоріна В.В., Лежнюка П.Д., Черемісіна М.М. та інших. Значна частка наукових робіт присвячена питанням аналізу технічного стану та особливостей роботи РЕМ, особливостям інтеграції джерел розосередженої генерації в розподільні мережі, моделюванню та дослідженню режимів роботи сучасних РЕМ, підвищенню надійності їх роботи, забезпеченню якості електричної енергії [1, 2].

Останнім часом багато уваги приділяється питанням використання систем накопичення енергії (СНЕ) для підвищення надійності роботи електричних мереж [3] та впливу відновлюваних джерел енергії на роботу РЕМ.

У той же час питанням підвищення ефективності функціонування міських РЕМ доцільно приділити більше уваги, особливо в контексті реформування енергетичного сектору при переході до нової моделі енергоринку.

**Мета статті.** Метою проведених досліджень був аналіз стану роботи та розробка шляхів комплексного підходу до підвищення ефективності функціонування міських РЕМ України при реформуванні енергетичного ринку України.

**Основні матеріали дослідження.** Сучасні міські РЕМ мають значну кількість особливостей, які відрізняють їх серед інших електричних мереж. До характерних особливостей сучасних міських РЕМ слід віднести:

- складну та розгалужену структуру кабельних ліній напругою 10(6) та 0,4 кВ;
- велику щільність навантаження, яка передбачає застосування розподільних пристроїв (РП) та потужних трансформаторів на трансформаторних підстанціях (ТП);
- зростання частки побутових, комунальних споживачів та міського електричного транспорту в загальній структурі електроспоживання;

- значна кількість мереж загального користування, які одночасно живлять споживачів з різними графіками та суттєвими технологічними особливостями, внаслідок чого значно відрізняються їх вимоги до забезпечення електричною енергією;

- незадовільний технічний стан, оскільки період експлуатації майже 70% трансформаторних підстанцій та ліній електропередачі становить понад 40 років;

- низький рівень автоматизації керування режимами міських РЕМ;

- низький рівень оснащення інтелектуальним обладнанням та автоматизованими системами обліку електроенергії, який станом на 01.01.2019 р. складає лише 3 %;

- збільшення джерел розподіленої генерації, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які суттєво впливають на режими роботи міських РЕМ.

Зазначені особливості накладають певні вимоги до структури та конфігурації міських РЕМ, а також сприяють застосуванню адаптованих під ці умови підходів щодо забезпечення режимів їх роботи для забезпечення надійності та якості їх функціонування.

11.06.2017 року набрав чинності Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII [4] і розпочався процес реформування електроенергетичної галузі в Україні, який передбачає проведення кардинальних змін в галузі. Серед цих дій передбачається відокремлення функції з розподілу електричної енергії від функцій виробництва, передачі та постачання, тобто створення відповідних окремих сегментів ринку електричної енергії.

Передачу та розподіл електричної енергії, що постачається споживачам, здійснюють оператор системи передачі (ОСП) та оператори систем розподілу (ОСР) відповідно до договорів, що укладаються із споживачем та постачальником електричної енергії відповідно до кодексу системи передачі, кодексу систем розподілу та правил роздрібного ринку.

Структурна схема системи передачі та розподілу електричної енергії показана на рис. 1.

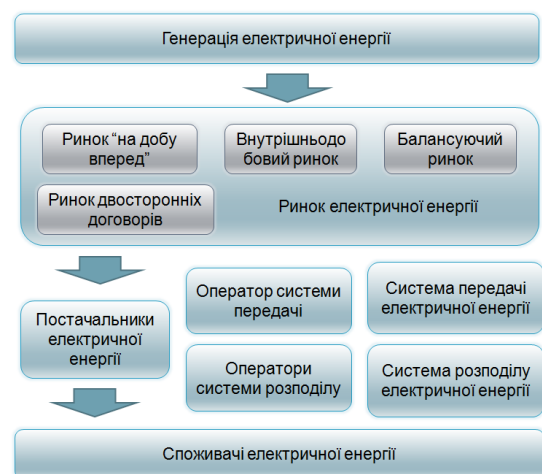


Рисунок 1 – Структурна схема системи передачі та розподілу електричної енергії, що запроваджується в Україні

Згідно з діючим законодавством ОСР надає послуги з розподілу електричної енергії з урахуванням принципу економічної ефективності, планів розвитку територій, вимог щодо охорони навколишнього природного середовища тощо. Для цього ОСР організовує надійну та ефективну роботу системи розподілу, забезпечує недискримінаційний доступ до системи розподілу всім учасникам процесу, забезпечує користувачів системи розподілу необхідною інформацією, забезпечує комерційний облік електроенергії тощо.

Система розподілу електричної енергії складається РЕМ регіонів України, які забезпечують передачу електричної енергії до споживачів. Власниками системи розподілу є окремі регіональні ОСР, які здійснюють експлуатацію РЕМ та забезпечують підтримку їх технічного стану.

Постачальником електричної енергії виступає суб'єкт господарювання, який здійснює продаж електричної енергії у відповідності з договором на постачання електричної енергії споживачу.

Ефективність постачання електричної енергії споживачам при такій системі передачі та розподілу буде залежати від декількох факторів:

- злагодженості та якості роботи запровадженого механізму організації ринку електричної енергії;
- надійності роботи систем передачі та розподілу електричної енергії, яка визначається технічним станом електричних мереж, які безпосередньо здійснюють поставку необхідної кількості потужності кожному споживачу.

Таким чином, при реформуванні ринку електричної енергії в Україні розподільні електричні мережі стають важливим елементом системи розподілу. Їх технічний стан потребує підтримання необхідного рівня для забезпечення ефективної і надійної роботи всієї енергосистеми.

На сьогоднішній день на ринку електричної енергії України діють 40 ліцензіатів на передачу електроенергії розподільними електричними мережами та 147 ліцензіатів на постачання електричної енергії. Станом на початок 2019 року система розподілу електричної енергії в Україні нараховує більше 1 млн. км. повітряних (ПЛ) і кабельних ліній (КЛ) електропередачі напругою 0,4 – 150 кВ і близько 200 тис. трансформаторних підстанцій напругою 6 – 150 кВ.

Система розподілу електричної енергії в Україні розташована на території 27 регіонів і обслуговується регіональними ОСР.

До основних функцій ОСР відносяться:

- забезпечення якості і надійності електропостачання;
- керування режимами роботи системи розподілу;
- експлуатація та ремонт ліній електропередачі, підстанцій та інших об'єктів, що входять до складу розподільної електричної мережі;
- здійснення під'єднання та від'єднання від системи розподілу споживачів;
- встановлення лічильників електричної енергії та моніторинг їх показань.

Сучасний стан розвитку РЕМ України характеризується такими негативними чинниками як:

- незадовільний стан значної частки обладнання електричних мереж, більшість з якого відпрацювала передбачений технічною документацією термін експлуатації і спричиняє значні втрати електричної енергії, недостатню надійність при експлуатації мережі та потребує заміни;
- неефективна конфігурація мереж, яка в першу чергу проявляється у значній довжині ЛЕП, а також в неоптимальній структурі мережі внаслідок поступового розвитку та реконструкції мереж;
- низький рівень автоматизації мереж (на сьогоднішній день рівень оснащення РЕМ засобами автоматичного управління режимами складає менше 50 %, що призводить до значних операційних втрат);
- проблеми з підключенням нових абонентів, зокрема розподіленої генерації, електроопалення та інфраструктури електротранспорту, які виникають через низьку пропускну здатність РЕМ;
- низька якість електропостачання споживачів (низький рівень технічного стану РЕМ сприяє зниженню індексу середньої тривалості відключень (SAIDI) та індексу середньої частоти відключень у системі (SAIFI) міжнародних показників надійності електропостачання споживачів - тривалість перерв електропостачання в Україні сягає від 580 до 870 хвилин, тоді як у країнах ЄС – до 40 хвилин, що представлено на рис. 2, 3 [5]);
- низький рівень оснащення РЕМ автоматизованими системами обліку електроенергії, який станом на 01.01.2019 р. складає лише 3 %.

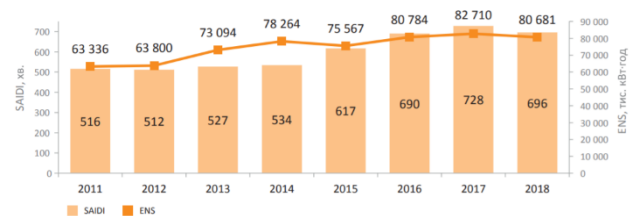


Рисунок 2 – Динаміка показників надійності для розподільних електричних мереж України

Як результат такого незадовільного технічного стану розвитку РЕМ України є:

- збільшення втрат електричної енергії, які становлять від 12 до 17% для розподільних мереж різних енергопостачальних компаній;
- зниження показників надійності роботи електричних мереж;
- зниження ефективності роботи системи розподілу електричної енергії в ОЕС України.





Рисунок 3 – Динаміка відпуску та витрат електричної енергії в РЕМ України

Таким чином, підвищення ефективності функціонування міських РЕМ при впровадженні енергетичного ринку України стає одним з суттєвих шляхів підвищення ефективності роботи ОЕС України в цілому.

Для практичного вирішення зазначених проблем необхідно розробити та запровадити низку заходів щодо покращення функціонування міських РЕМ з урахуванням регіональних особливостей, комплексного підходу до вирішуваної задачі та можливістю залучення сучасних методів і технологій. Основні шляхи підвищення ефективності роботи міських РЕМ представлені на рис. 4.

Кількісне оцінювання ефекту від впровадження запропонованих заходів щодо підвищення ефективності функціонування міських РЕМ України є дуже важливим для висновку щодо їх доцільності. Виконаний аналіз досвіду інших країн показав, що для вирішення цієї задачі застосовується багато методів. Необхідність одночасного врахування багатьох параметрів технічного і економічного характеру є суттєвою при рішенні цієї задачі.

Таким чином, для оцінки ефективності впровадження заходів для підвищення надійності роботи цих мереж доцільно використовувати техніко-економічний критерій, який враховує особливості роботи міських РЕМ в структурі нового ринку електричної енергії в Україні:

$$K_{ef}(x) = \sum_{m=1}^M w_{R_m} \cdot R_m(x) + w_C \cdot C(x) + w_K \cdot K(x) + w_{\eta_{CHE}} \cdot \eta_{CHE}(x), \quad (1)$$

де  $x$  – номер групи заходів з підвищення надійності функціонування міських РЕМ, який характеризується вектором параметрів мережі;

$R_m(x)$  – індекс надійності міських РЕМ (SAIDI, SAIFI, MAIFI, ENS тощо), значення якого визначається відповідно до [6];

$M$  – кількість індексів надійності електричної мережі, які враховуються при розрахунку;

$C(x)$  – сумарні витрати системи розподілу електричної енергії на заходи з підвищення надійності роботи міських РЕМ;

$K(x)$  – сума компенсації споживачам за недотримання гарантованих стандартів якості надання послуг з електропостачання, яку ОСР нараховує і надає споживачу відповідно до [4];

$\eta_{CHE}(x)$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) СНЕ, які застосовуються в міських РЕМ;

$w_{R_m}$ ,  $w_C$ ,  $w_K$ ,  $w_{\eta_{CHE}}$  – вагові коефіцієнти, які враховують значущість індексів надійності електричної мережі, сумарних витрат на заходи з підвищення надійності  $C(x)$  та компенсації споживачам за недотримання стандартів якості надання послуг з електропостачання  $K(x)$  відповідно до поточного стану на ринку електричної енергії, а також ККД застосовуваних СНЕ  $\eta_{CHE}(x)$ .

Індекси надійності електропостачання споживачів в РЕМ відповідають міжнародним показникам і згідно з [6] є обов'язковими для оцінки якості роботи ОСП. Їх значення визначаються на основі спостережень наступним чином:



Рисунок 4 – Класифікація заходів щодо підвищення ефективності роботи міських РЕМ

- індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в мережі (SAIDI) розраховується як відношення сумарної тривалості довгих перерв в електропостачанні в точках комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання, за звітний період до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою [6]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i}{n}, \quad (2)$$

де  $t_i$  – тривалість  $i$ -ої довгої перерви в електропостачанні, хв.;

$n_i$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання у результаті  $i$ -ої довгої перерви в електропостачанні, од.;

$n$  – загальна кількість точок комерційного обліку електричної енергії, од.;

$k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;

$i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ;

$t_i$  – тривалість часу перерв електропостачання споживачів  $i$ -ої ділянки мережі;

$N_i$  – кількість споживачів на  $i$ -ій ділянці мережі;

$N_c$  – загальна кількість споживачів в мережі;

$m$  – кількість ділянок в мережі;

- індекс середньої частоти довгих перерв в електропостачанні в мережі в системі (SAIFI) розраховується як відношення сумарної кількості точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок усіх довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою [6]

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n}; \quad (3)$$

- індекс середньої частоти коротких перерв (до 3 хвилин) в електропостачанні в мережі (MAIFI) розраховується як відношення сумарної кількості відключених точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок усіх коротких перерв в електропостачанні протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії за формулою [6];

- індекс середньої частоти коротких перерв в електропостачанні в системі

$$MAIFI = \frac{\sum_{j=1}^r n_j}{n}, \quad (4)$$

де  $n_j$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання у результаті  $j$ -ої короткої перерви в електропостачанні, од.;

$r$  – кількість коротких перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;

$j$  – номер короткої перерви в електропостачанні,  $j = 1, 2, 3, \dots, r$ ;

- розрахунковий обсяг недовідпущеної електроенергії [6]

$$ENS = \sum_{l=1}^6 \sum_{i=1}^k \frac{n_i^{z_l} \cdot t_i \cdot Q^{z_l}}{43800}, \quad (5)$$

де  $z_l$  – ознака рівня напруги та відповідної території ( $z_1 - 0,4$  кВ - міський населений пункт,  $z_2 - 0,4$  кВ - сільський населений пункт,  $z_3 - 6 - 20$  кВ - міський населений пункт,  $z_4 - 6 - 20$  кВ - сільський населений пункт,  $z_5 - 27,5 - 35$  кВ,  $z_6 - 110/154$  кВ);

$n_i^{z_l}$  – кількість точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок  $i$ -ої довгої перерви з  $z$ -ою ознакою рівня напруги та відповідної території, од.;

$Q^{z_l}$  – середньомісячне споживання електричної енергії в попередньому році на одну точку комерційного обліку електричної енергії з  $z_1$ -ою ознакою рівня напруги та відповідної території, тис. кВт·год;

43800 – звітний період часу (середньомісячний за рік), перерахований у хвилинах.

При визначенні прогностичних значень індексів надійності для розподільних електричних мереж доцільно скористатись виразами для статистичних оцінок показників. Так тривалість перерв в електропостачанні споживачів для розрахунку SAIDI та ENS визначається за виразом

$$t_i = \varpi_i \cdot \tau_i, \quad (6)$$

де  $\varpi_i$  – частота відмов  $i$ -ої ділянки мережі;

$\tau_i$  – середній час відновлення електропостачання для  $i$ -ої перерви в електропостачанні.

Запропонований техніко-економічний критерій ефективності є особливим, оскільки приймає до уваги особливості поточного стану ринку електричної енергії та специфіку методи нарахування компенсації споживачам за порушення стандартів з якості електропостачання в Україні.

Для визначення доцільного заходу з підвищення надійності роботи міських РЕМ з переліку розрахованих критеріїв ефективності визначаємо мінімальний:

$$K_{ef}(x) \rightarrow \min. \quad (7)$$

При вирішенні поставленої задачі необхідно враховувати умови обмеження за технічними характеристиками пристроїв, показниками надійності електропостачання та якості електричної енергії:

$$\begin{aligned} SAIDI(x) &\leq SAIDI_{max}, & SAIFI(x) &\leq SAIFI_{max}, \\ MAIFI(x) &\leq MAIFI_{max}, & ENS(x) &\leq ENS_{max}, \\ \Pi_{ЯЕЕ}(x) &\leq \Pi_{ЯЕЕ ГП}, & \Pi_{реж}(x) &\leq \Pi_{реж ГП}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $SAIDI_{max}$ ,  $SAIFI_{max}$ ,  $MAIFI_{max}$ ,  $ENS_{max}$  – максимальні значення індексів надійності розподільної електричної мережі, які відповідають потрібному рівню надання послуг електропостачання;

$P_{ЯЕЕГП}$  – гранично припустимі значення показників якості електричної енергії;

$SP_{реж ГП}$  – гранично припустимі значення параметрів режиму міської РЕМ (напруги у вузлах мережі, струми в лініях тощо).

Для РЕМ, розташованої на території м. Харків, були розроблені групи заходів з підвищення надійності електропостачання споживачів та функціонування мережі. З використанням розробленого критерію (1) було вибрано найбільш доцільний із розглянутих заходів. Результати розрахунку представлені в табл. 1. Досліджувана міська РЕМ виконана кабельними лініями 10 кВ та 0,4 кВ з використанням проводів марки ААШВ. Мережа розташована на території площею понад 70 км<sup>2</sup> і одержує живлення від 4 понижуючих підстанцій 110/10 кВ. В ТП 10/0,4 кВ встановлено по 2 силових трансформатори, потужність яких становить 1000 кВА, 630 кВА. До складу мережі входить два РП 10 кВ.

Таблиця 1 – Оцінка заходів з підвищення надійності роботи міських РЕМ

Номер групи заходів з підвищення ефективності роботи РЕМ X	Характеристика групи заходів з підвищення ефективності роботи РЕМ	Коефіцієнт ефективності $K_{ef}(x)$ , в.о.
1	Встановлення інтелектуального обладнання на ТП та РП	0,83
2	Переведення мережі з напруги 10 кВ на напругу 20 кВ з використанням захищених проводів	0,89
3	Встановлення реклоузерів	0,68
4	Впровадження розподіленої генерації, зміна режиму роботи релейного захисту	0,89
5	Застосування СНЕ	0,73
6	Впровадження розподіленої генерації, застосування СНЕ	0,65

Як видно з табл. 1, найбільш доцільним для розглянутої міської РЕМ є захід, який передбачає впровадження розподіленої генерації та застосування СНЕ.

#### Висновки.

Виконаний аналіз показав, що незадовільний технічний стан сучасних міських РЕМ України значно знижує показники ефективності та надійності роботи як РЕМ, так і ОЕС України в цілому.

Для підвищення надійності функціонування міських РЕМ необхідно для кожної з регіональних ОРС

розробити та впровадити низку організаційно-технічних заходів, які дозволять оновити структуру та конфігурацію мереж, а також сприятимуть розвитку інтелектуалізації електричних мереж.

Для обґрунтування доцільності застосування заходів щодо підвищення ефективності функціонування міських РЕМ був розроблений техніко-економічний критерій ефективності, який враховує особливості поточного стану ринку електричної енергії та специфіку нарахування компенсацій споживачам за порушення стандартів з якості електропостачання в Україні.

Реалізація проектів з підвищення ефективності та надійності функціонування міських РЕМ потребує ретельної оцінки та державної підтримки.

#### Список літератури

1. Ахромкін А. О. Сучасні характеристики електричних мереж України: регіональний аспект / А. О. Ахромкін // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2015. – № 6 (223). – С. 7-10.
2. Жаркин А.Ф. Решение задачи оптимального секционирования воздушных распределительных сетей в условиях нормирования показателей надежности / А. Ф. Жаркин, В. А. Попов, В. В. Ткаченко // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 61-69.
3. Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical re-view / Progress in Natural Science 19(3):291-312., 2009. DOI:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
4. Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
5. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Офіційний веб-сайт. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895>
6. Форми звітності щодо показників якості електропостачання та інструкції щодо їх заповнення, Затверджено Постановою НКРЕКП, № 374 від 12.06.2018. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0374874-18#n18>

#### References (transliterated)

1. Akhromkin A. O. Suchasni kharakterystyky elektrychnykh merezh Ukrainy: rehionalnyi aspekt / A. O. Akhromkin // Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. – 2015. – vol. 6 (223). – pp. 7-10.
2. Zharkin A.F. Reshenie zadachi optimalnogo sektsionirovaniya vozdushnykh raspredelitelnykh setey v usloviyah normirovaniya pokazateley nadezhnosti / A. F. Zharkin, V. A. Popov, V. V. Tkachenko // Tehnichna elektrodinamika. – 2013. – vol. 5. – pp. 61-69.
3. Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical re-view / Progress in Natural Science 19(3):291-312., 2009. DOI:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
4. Zakon Ukrainy «Pro rynok elektrychnoi enerhii» vid 13.04.2017 № 2019-VIII. - Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
5. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh (NKREKP). Ofitsiinyi veb-sait. – Rezhym dos-tupu: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11895>
6. Formy zvitnosti shchodo pokaznykiv yakosti elek-tropostachannia ta instrukt sii shchodo yikh zapovnennia, Zatverdzheno Postanova NKREKP, № 374 vid 12.06.2018. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0374874-18#n18>

Надійшло (received) 20.11.2019

**Довгалиук Оксана Миколаївна (Довгалиук Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1994-619X>; e-mail: [Dovgalyuk\\_O@khpri.edu.ua](mailto:Dovgalyuk_O@khpri.edu.ua).

**Омельяненко Галина Вікторівна (Омельяненко Галина Викторовна, Omelianenko Halyna Viktorivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: [omeljanenkgalina@i.ua](mailto:omeljanenkgalina@i.ua).

**Піротті Олексій Євгенович (Пиротти Алексей Евгеньевич, Pirotti Alexey Evgenyevich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4357-996X>; e-mail: [alpir@ukr.net](mailto:alpir@ukr.net).

**Бондаренко Роман Вікторович (Бондаренко Роман Викторович, Bondarenko Roman Viktorovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6081-5020>; e-mail: [elektrotehnika245@ukr.net](mailto:elektrotehnika245@ukr.net).

**Сиром'ятнікова Тетяна Віталіївна (Сыромятникова Татьяна Витальевна, Syromyatnikova Tatyana Vitaliyivna)** – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, магістр кафедри електричних станцій, інженер кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9994-943X>; e-mail: [tatianabloschenko@gmail.com](mailto:tatianabloschenko@gmail.com).

**Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Yakovenko Ivan Serhiyovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9934-2841>; e-mail: [i.c.jakovenko@gmail.com](mailto:i.c.jakovenko@gmail.com).

**В. М. ЗОЛОТАРЬОВ, О. В. ЧУЛЄЄВА**

### **ВПЛИВ ТРИОКСИДУ СУРМИ НА ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я В ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЯХ**

Метою статті є визначення впливу триоксиду сурми на поширення полум'я в пожежобезпечних полімерних композиціях. Досліджували пожежобезпечні полімерні композиції на основі поліетилену низької густини та лінійного поліетилену низької густини, галогенвмісних антипіренів та триоксиду сурми. Визначали показники вертикального поширення полум'я поодинокі прокладеного ізолюваного проводу. Показано що для полімерних композицій на основі поліолефінів, які здатні до зшивання силанами, кількість антипіренів зменшується на 24–48 % під час використання антипіренів, що містять суміш галогену та триоксиду сурми в співвідношенні 3:1.

**Ключові слова:** ізоляція самоутримних ізолюваних проводів, антипірени, вертикальне поширення полум'я, пожежобезпечні полімерні композиції.

**В. М. ЗОЛОТАРЕВ, Е. В. ЧУЛЕЕВА**

### **ВЛИЯНИЕ ТРИОКСИДА СУРЬМЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ**

Целью статьи является определение влияния триоксида сурьмы на распространение пламени в пожаробезопасных полимерных композициях. Исследовали пожаробезопасные полимерные композиции на основе полиэтилена низкой плотности и линейного полиэтилена низкой плотности, галогенсодержащих антипиренов и триоксида сурьмы. Определяли показатели вертикального распространения пламени одиночно проложенного изолированного провода. Показано что для полимерных композиций на основе полиолефинов, которые способны к сшиванию силанами, количество антипиренов уменьшается на 24–48% при использовании антипиренов, содержащих смесь галогена и триоксида сурьмы в соотношении 3: 1.

**Ключевые слова:** изоляция самонесущих изолированных проводов, антипирены, вертикальное распространение пламени, пожаробезопасные полимерные композиции.

**V. M. ZOLOTARYOV, O. V. CHULIEIEVA**

### **INFLUENCE OF SURMA TRIOXIDE ON FLUID DISTRIBUTION IN FIRE PROTECTIVE POLYMER COMPOSITIONS**

The purpose of the article is to determine the effect of antimony trioxide on flame propagation in fireproof polymer compositions. Fireproof polymer compositions based on low-density polyethylene and linear low-density polyethylene, halogen-containing flame retardants and antimony trioxide were studied. The parameters of the vertical flame propagation of a single laid insulated wire were determined. It is shown that for polymer compositions based on polyolefins that are capable of crosslinking by silanes, the number of flame retardants is reduced by 24–48% when using flame retardants containing a mixture of halogen and antimony trioxide in a ratio of 3: 1.

**Keywords:** insulation of self-supporting insulated wires, flame retardants, vertical flame propagation, fireproof polymer compositions.

**Вступ.** Для зниження горючості полімерних матеріалів найчастіше застосовують сполуки, що містять галогени, трьох типів: сполуки з аліфатичною, ароматичною або циклоаліфатичною структурою. Залежно від будови сполуки, що містять галогени, піддаються піролізу або в конденсованій фазі, або випаровуються і деструктують вже в газовій фазі. Ефективність антипіренів, що містять галогени зростає в ряду  $F < Cl < Br < I$ . Найчастіше в якості антипіренів застосовуються сполуки хлору і бром, в зв'язку з тим, що вони забезпечують оптимальне співвідношення ціна/якість. Сполуки фтору і йоду не застосовуються як антипірени, тому що сполуки фтору малоефективні, а сполуки йоду мають низьку термостабільність під час переробки [1–4].

Значна частина антипіренів, що містять галогени, застосовується у вигляді синергічних сумішей з оксидами сурми. Сам по собі оксид сурми не стримує горіння, тому що плавиться за температур, які вище ніж температури займання більшості пластмас. Однак в

суміші зі сполуками галогенів оксид сурми утворює галогеніди і оксигалогеніди сурми, які за температури займання знаходяться в газоподібному стані і розбавляють горючі гази. Крім того, галогеніди і оксигалогеніди діють як поглиначі радикалів  $OH^*$  аналогічно дії  $HCl$  і  $HBr$ . Проте вплив триоксиду сурми на пожежобезпечні полімерні композиції для кабельної продукції досліджено недостатньо.

**Мета роботи.** Визначення впливу триоксиду сурми на поширення полум'я в пожежобезпечних полімерних композиціях.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити залежність поширення полум'я в пожежобезпечних полімерних композиціях від їх складу та вмісту тригідрату сурми.

**Результати досліджень.** Проводили дослідження впливу  $Sb_2O_3$  (триоксиду сурми) на вертикальне поширення полум'я одиноко ізолюваного проводу СІП.

Полімерні композиції виготовляли на лінії компаундування компанії ERMAFA на базі двошнекового екструдера BTS 50×35D з діаметром шнеку D, що дорівнює 0,05 м та відношенням довжини шнеку до діаметру, що дорівнює 35.

Для одержання полімерних композицій на основі поліолефінів використовують двошнековий екструдер із зонами дегазації. Привід екструдеру здійснюється від регульованого електродвигуна. Матеріал, що переробляється, згідно рецептурі композиції, безперервно подається через завантажувальний отвір і бокові завантажувальні пристрої до екструдеру.

За характером процесів, що протікають в робочій зоні екструдеру, їх поділяють по довжині на зону живлення, зону стискання та зону дозування.

Під час переміщення матеріалу вздовж циліндру відбувається плавлення і гомогенізація полімерної суміші. Просуваючись, матеріал розігрівается як за рахунок тепла, що виділяється внаслідок в'язкого тертя, так і тепла, що підводиться від розташованих на корпусі нагрівачів. Температура вздовж циліндра регулюється залежно від типу полімерного компаунда. Регулювання всіх параметрів екструзії здійснюється з електронного пульта управління.

Гомогенний розплав надходить до прямої головки екструзійної головки, яка призначена для пресування термопластичного матеріалу в стренги.

Після виходу з формуючого інструменту стренги потрапляють на рольганг, де відбувається їх одночасне охолодження і транспортування. Охолодження здійснюється за допомогою водяного пару (туману), коли окремі краплі води стикаються з поверхнею, що охолоджується. Під час цього не лише безперервно оновлюється нагрітий граничний шар води, але і досягається її переохолодження (внаслідок самовипаровування). Таким чином, забезпечується постійний температурний перепад і усуваються перерви в охолодженні.

Потім стренги потрапляють на рольганг, де відбувається їх подальше повітряне охолодження і обдування за допомогою вентиляторів для видалення вологи з поверхні стренгів.

Охолоджені стренги подаються до вхідного отвору гранулятору і захоплюються валиками подавання всередину головки різання. Після цього стренги розрізають на гранули за допомогою диска різання, що обертається, і нижнього ножа. Необхідний розмір гранул досягається підбором частоти обертання роторів пристрою різання. Транспортування гранул з гранулятору до бункера для розфасовки відбувається повітродувкою транспортування. Для виробництва кабельно-провідникової продукції з пожегобезпечних композицій поліолефінів, які здатні до зшивання силанами на ПАТ «ЗАВОД ПВДЕНКАБЕЛЬ» використовували екструзійну лінію фірми ROSEDAHL Австрія, на базі екструдеру RE 1-120 ARZI з діаметром шнеку 120 мм і відношенням  $L/D = 30$ .

До складу екструзійної лінії входить пристрій для підігріву жили від 373 К до 393 К, що забезпечує кращу адгезію ізоляції до жили і запобігає утворенню в ізоляції газових включень.

Основним вузлом екструзійної лінії є шнековий прес. У циліндрі пресу, що підігрівается, розміщується шнек, який обертаючись подає розплавлений матеріал до кутової голівки з формуючим інструментом. Формуючий інструмент являє собою дорн і матрицю, що утворюють кільцевий зазор для екструзії матеріалу. Гвинтова нарізка шнеку нерівномірна по його довжині: обсяг витка шнеку на виході менше ніж обсяг витка на вході. У результаті забезпечується необхідне ущільнення матеріалу.

Необхідний ступінь ущільнення досягається шляхом зменшення глибини нарізки за збереженням постійності кроку. Зменшення площі поперечного перерізу каналу забезпечує компенсацію зміни об'ємної густини під час переходу пластмаси з твердого стану в розплавлений.

Геометрія шнеку оптимізована за відношенням – довжини до діаметру, зони змішування і розплавлення полімеру адаптовані для даного технологічного процесу, а профіль температур вздовж циліндра оптимізовано і це призводить до високої гомогенізації ізоляційного матеріалу за мінімальної кількості дефектів і гарномурозподілу силану.

Обов'язковою умовою під час накладення ізоляції є ступінчасте охолодження одержаного покриття.

Охолоджувальна ванна має три секції: у першій – для охолодження використовується вода температурою від 353 К до 363 К, у другій від 303 К до 343 К, у третій від 293 К до 313 К. Ступінчасте охолодження виключає можливість утворення надмірних внутрішніх напружень в ізоляції або газових включень. Внутрішні напруження знижують електричну міцність ізоляції і прискорюють зростання водяних тріангів.

Відповідно до вимог стандартів України самоутримні ізольовані проводи, що не розповсюджують горіння, повинні витримувати випробування з розповсюдження полум'я, за умови поодинокого прокладення проводу (EN 60332-1-1:2004 [5]).

Результати вогневих випробувань ізоляції самоутримних ізольованих проводів в залежності від складу антипіренів в пожегобезпечних полімерних композиціях 1–6 наведено в табл. 1–4.

На основі отриманих експериментальних даних можна зробити висновок, що для забезпечення вогнестійкості кабелів з термопластичною ізоляцією на основі поліолефінів і хлорорганічних антипіренів вміст антипірену повинен бути не менше ніж 11 %.

Таблиця 1 – Результати випробування ізоляції СІП на вертикальне поширення полум'я за умови використання пожегобезпечних полімерних композицій з антипіренами ХОС та БОС

Найменування компонентів	Вміст компонентів, % мас.						Вогневі випробування, вертикальне поширення полум'я		
	1	2	3	4	5	6	Метод	Норма	Значення
LDPE (ПТР 2,0)	89,7			87,0			ДСТУ EN 60332-1-2	L <sub>1</sub> > 50 мм L <sub>2</sub> ≤ 540 мм	Поширюють полум'я
LLDPE (ПТР 3,0)		89,7			87,0				
LLDPE (ПТР 2,0)			89,7			87,0			
Антипірен ХОС				8,4	8,4	8,4			
Антипірен БОС	5,3	5,3	5,3						
Світлостабілізатор	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			
Сухий концентрат силану СКС-2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			

Таблиця 2 – Результати випробування ізоляції СІП на вертикальне поширення полум'я за умови використання пожегобезпечних полімерних композицій з антипіренами ХОС і БОС та Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в співвідношенні 5:1

Найменування компонентів	Вміст компонентів, % мас.						Вогневі випробування, вертикальне поширення полум'я		
	1	2	3	4	5	6	Метод	Норма	Значення
LDPE (ПТР 2,0)	89,7			87,0			ДСТУ EN 60332-1-2	L <sub>1</sub> > 50 мм L <sub>2</sub> ≤ 540 мм	Поширюють полум'я
LLDPE (ПТР 3,0)		89,7			87,0				
LLDPE (ПТР 2,0)			89,7			87,0			
Антипірен ХОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5:1)				8,4	8,4	8,4			
Антипірен БОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5:1)	5,3	5,3	5,3						
Світлостабілізатор	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			
Сухий концентрат силану СКС – 2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			

Таблиця 3 – Результати випробування ізоляції СІП на вертикальне поширення полум'я за умови використання пожегобезпечних полімерних композицій з антипіренами ХОС і БОС та Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в співвідношенні 4:1

Найменування компонентів	Вміст компонентів, % мас.						Вогневі випробування, вертикальне поширення полум'я		
	1	2	3	4	5	6	Метод	Норма	Значення
LDPE (ПТР 2,0)	89,7			87,0			ДСТУ EN 60332-1-2	L <sub>1</sub> > 50 мм L <sub>2</sub> ≤ 540 мм	Поширюють полум'я
LLDPE (ПТР 3,0)		89,7			87,0				
LLDPE (ПТР 2,0)			89,7			87,0			
Антипірен ХОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4:1)				8,4	8,4	8,4			
Антипірен БОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4:1)	5,3	5,3	5,3						
Світлостабілізатор	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			
Сухий концентрат силану СКС – 2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			

Таблиця 4 – Результати випробування ізоляції СІП на вертикальне поширення полум'я за умови використання пожегобезпечних полімерних композицій з антипіренами ХОС і БОС та Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в співвідношенні 3:1

Найменування компонентів	Вміст компонентів, % мас.						Вогневі випробування, вертикальне поширення полум'я		
	1	2	3	4	5	6	Метод	Норма	Значення
LDPE (ПТР 2,0)	89,7			87,0			ДСТУ EN 60332-1-2	L <sub>1</sub> > 50 мм L <sub>2</sub> ≤ 540 мм	Не поширюють полум'я
LLDPE (ПТР 3,0)		89,7			87,0				
LLDPE (ПТР 2,0)			89,7			87,0			
Антипірен ХОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3:1)				8,4	8,4	8,4			
Антипірен БОС+Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3:1)	5,3	5,3	5,3						
Світлостабілізатор	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			
Сухий концентрат силану СКС – 2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			

**Висновки.** Для полімерних композицій на основі поліолефінів, які здатні до зшивання силанами, кількість антипіренів зменшується на 24–48 % під час використання антипіренів, що містять суміш галогену та триоксиду сурми в співвідношенні 3:1 (табл. 3.7). У разі зменшення вмісту триоксиду сурми, полімерні композиції поширюють полум'я (табл. 3.4-3.6). Це пояснюється впливом компонентів систем зшивання

(біфункціональних кремнійорганічних сполук), а також формуванням нової надмолекулярної структури в полімерних композиціях, які здатні до зшивання силанами.

## Список літератури

1. Ma, H.; Tong, A L.; Xu, Z. et al. Novel intumescent flame retardant: Synthesis and application in ABS copolymer. *Polymer Degradation and Stability*. 2007, № 92(4) P 720–726.
2. Фомин, Д. Л.; Фомин, Д. Л.; Мазина, Л. А.; Дебердеев, Т. Р.; Ахметчин, Э. С.; Улитин, Н. В. Пожаробезопасные свойства ПВХкомпозиций при использовании некоторых бромсодержащих антипиренов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012, № 15(18), С 104–106.
3. Чулєєва, О. В.; Золотарьов, В. М.; Карпушенко, В. П. та ін. (Закрите акціонерне товариство завод «Південкабель»). Полімерна композиція. Патент України на винахід 86662, Травень 12, 2009.
4. Чулєєва, О. В.; Золотарьов, В. М.; Карпушенко, В. П. та ін. (Закрите акціонерне товариство завод «Південкабель»). Полімерна композиція. Патент України на винахід 86664, Травень 12, 2009.
5. EN 60332-1-1:2004 Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 1-1: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Apparatus. CENELEC, 2016. – 10 p.

## References (transliterated)

1. Kim Y.-M., Lee J.-H., Kim S.-J., Favrat D. Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses. *Entropy*. 2012, vol. 14, pp. 1501-1521.
2. Mohamad F., Teh J., Lai C.-M., Chen L.-R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review. *Energies*. 2018, vol. 11, p. 2278.
3. Madlener I.R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power. *Appl Energy*. 2013, vol. 101, pp. 299-309.
4. Chuleeva O. V., Zolotaryov V. M. Karpushenko V.P. (Pivdenkabel Plant, Joint-Stock Company). Polymer composition. Patent of Ukraine for Invention 86664, May 12, 2009.
5. EN 60332-1-1:2004 Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 1-1: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Apparatus. CENELEC, 2016. – 10 p.

*Надійшла (received) 18.11.2019*

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Золотарьов Володимир Михайлович (Золотарев Владимир Михайлович, Zolotaryov Volodymyr)** – доктор технічних наук, професор, Генеральний директор, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: [zavod@yuzhcable.com.ua](mailto:zavod@yuzhcable.com.ua)

**Чулєєва Олена Володимирівна (Чулєєва Елена Владимировна, Chuličieva Olena)** – кандидат технічних наук, директор науково-технічного центру, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7310-0788>; e-mail: [echuleeva@ukr.net](mailto:echuleeva@ukr.net)



УДК 621.315

*Е. Д. КИМ, В. Н. ТАРАН, Г. В. ЗАЛУЖНАЯ***ОНЛАЙН ДИАГНОСТИКА ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ЛНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

Рассматривается реализуемость онлайн диагностики внутренней электрической изоляции линейных полимерных изоляторов с помощью специальных устройств – индикаторов, встраиваемых к изолятору. Рекомендуется использовать в качестве индикатора слаботочный высоковольтный разрядник, выполненный на основе изолятора тарельчатого типа и присоединяемый последовательно к контролируемому изолятору. Триггерный эффект индикатора достигается шунтированием поверхности изоляционной детали тарельчатого изолятора искровыми промежутками в виде кольцевых электродов. С ухудшением изоляции полимерного изолятора возрастает напряжение на тарельчатом изоляторе и при достижении заранее установленной величины происходит срабатывание индикатора – непрерывное перекрытие искровых промежутков, но не переходящее в дуговую стадию. Интенсивность распространяемых индикатором в активном состоянии высокочастотных излучений, позволяет идентифицировать дистанционно детектором электромагнитных полей, таким образом, устанавливать место расположения электрически дефектного полимерного изолятора еще на ранней стадии деградации. Применением GPS/GPSR технологий информация о местонахождении объекта может быть передана на центральный сервер по сбору и обработки данных.

**Ключевые слова:** индикатор, тарельчатый изолятор, непрерывный искровой разряд, полимерный изолятор, электрическое старение, ранняя диагностика.

*Є. Д. КИМ, В. Н. ТАРАН, Г. В. ЗАЛУЖНАЯ***ОНЛАЙН ДІАГНОСТИКА ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЛНЕЙНИХ ПОЛІМЕРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ**

Розглядається можливість реалізації онлайн діагностики внутрішньої електричної ізоляції лінійних полімерних ізоляторів за допомогою спеціальних пристроїв - індикаторів, вбудованих до ізолятора. Рекомендується використовувати як індикатор слабкострумний високовольтний розрядник, виконаний на основі ізолятора тарілкового типу, який приєднується послідовно до контрольованого ізолятора. Триггерний ефект індикатора досягається шунтуванням поверхні ізоляційної деталі тарілкового ізолятора іскровими проміжками у вигляді кільцевих електродів. З погіршенням ізоляції полімерного ізолятора зростає напруга на тарілкового ізоляторі і при досягненні заздалегідь встановленої величини відбувається спрацювання індикатора - безперервне перекриття іскрових проміжків, але не переходить в дугову стадію. Інтенсивність розповсюджуваних індикатором в активному стані високочастотних випромінювань, дозволяє ідентифікувати дистанційно детектором електромагнітних полів, таким чином, встановлювати місце розташування електрично дефектного полімерного ізолятора ще на ранній стадії деградації. Застосуванням GPS / GPSR технологій інформація про місцезнаходження об'єкта може бути передана на центральний сервер зі збору та обробки даних.

**Ключові слова:** індикатор, тарілковий ізолятор, безперервний іскровий розряд, полімерний ізолятор, електричне старіння, рання діагностика.

*E. D. KIM, V. N. TARAN, G. V. ZALUZHNA***ONLINE DIAGNOSTICS OF INTERNAL INSULATION OF LINEAR COMPOSITE INSULATORS**

The feasibility of online diagnostics of internal electrical insulation of linear composite insulators using special devices - indicators built into the insulator is considered. It is recommended to use a low-current high-voltage arrester on the basis of cap and pin insulator and connected in series to the controlled insulator as an indicator. The trigger effect of the indicator is achieved by shunting the surface of the insulating part of the cap and the pin insulator with spark gaps in the form of ring electrodes. With deterioration in the insulation of the polymer insulator, the voltage on the plate insulator increases and when a predetermined value is reached, the indicator is triggered but do not go into the arc stage. The intensity of the high-frequency radiation propagated by the indicator in the active state makes it possible to identify it remotely by the electromagnetic field detector, thus setting the location of the electrically defective composite insulator at an early stage of degradation. Using GPS / GPSR technologies, information about the location of an object can be transmitted to a central server for data collection and processing.

**Key words:** indicator, cap and pin insulator, continual spark discharge, composite insulator, electric aging, early diagnosis.

**Ведение.** Как отмечают в работах [1, 2], надежность сегодняшнего поколения линейных полимерных изоляторов, изготавливаемых в соответствии с новейшими технологиями, включая жесткий контроль качества на каждом технологическом переделе, сравнима не только традиционными изоляторами, но и по многим технико-экономическим показателям превосходят их. Акцентируются, что для достижения желаемого уровня надежности большое значение имеет обоснованность выбора конструкции изоляторов, изоляторы по своим электрическим и механическим параметрам должны координироваться с реальными эксплуатационными нагрузками,

подвергаемыми в течение всего прогнозируемого срока службы. В этой связи особое внимание уделяется на технические решения по выравниванию потенциала вдоль длины изолятора и снижению максимальной напряженности электрического поля применением градировочной арматуры и оптимизацией формы электродов изолятора.

Наряду с этим на сегодня еще остается нерешенной проблема оперативной оценки остаточного срока безопасной работы изоляторов в режиме реального времени, что позволило бы своевременно выполнять ремонтные работы или провести замену критически поврежденных изоляторов. Несмотря на то, что в

© Е. Д. Ким, В. Н. Таран, Г. В. Залужная 2019

настоящее время апробированы различные способы и инструментарий по диагностике композитных изоляторов, все еще методы оценки остаточного срока службы изоляции не формализованы в виде рекомендации международного комитета по стандартизации. Приведенные обстоятельства представляются основными факторами, сдерживающими широкое применение композитных изоляторов на ВЛ 330 кВ и выше.

**Используемые методы диагностики.** На практике обслуживания высоковольтной линий электропередачи [1] нашли следующие способы диагностики состояния композитных изоляторов:

- визуальный осмотр и оценка гидрофобности защитной оболочки;
- инфракрасная (ИК) термография;
- ультрафиолетовое (УФ) детектирование;
- измерение электрического поля.

Первый способ контроля проводится с подъемом на опору и устанавливают наличие грубых повреждений на поверхности конструкции, однако не выявляет так называемые скрытые электрические дефекты под защитной оболочкой на поверхности стеклопластикового стержня.

Отмечаются о высокой эффективности ИК/УФ контролем, осуществляемых с использованием летательных аппаратов. Но вместе с тем при этих методах остается неустановленным уровень критичности электрического повреждения обнаруженного изолятора. Кроме того, в связи с тем, что инспекция линии проводится с конечным (длительным) интервалом времени, то такое обстоятельство вносит значимую неопределенность в результатах оценки состояния изоляции. Поэтому ИК/УФ диагностику условно можно отнести к качественным методам контроля.

К прямому и количественному методу можно отнести измерение распределения электрических потенциалов вдоль изолятора, методика, которая заимствована из технологии диагностики керамических изоляторов и приспособлена для исследования композитных изоляторов [3]. Сопоставляя матрицы распределения электрического поля контролируемого изолятора и эталонного, устанавливаются местоположение и оценивается величина поврежденного участка изоляции, скрытого под резиновой оболочкой. Вследствие значительной трудоемкости такого вида измерения выполняются выборочно на тех изоляторах, которые по данным визуальных или ИК/УФ наблюдений идентифицированы как проблемные. Следует отметить о постоянном совершенствовании как инструментариев диагностики, так и методов интерпретации регистрируемых параметров в части повышения чувствительности приборов и наполнения программных средств по идентификации характера и уровня повреждения.

Обследование изоляции на ВЛв различных энергокомпаниях осуществляется по собственной программе, но основываются на выше перечисленных способах. В качестве примера на рис.1 представлена

схема инспекции полимерных изоляторов, принятая энергокомпаниями Италии и рекомендованная для воздушной линии класса 420 кВ и выше. Контроль изоляторов осуществляется только в короткие периоды обследования, предусмотренные регламентом обслуживания ВЛ.

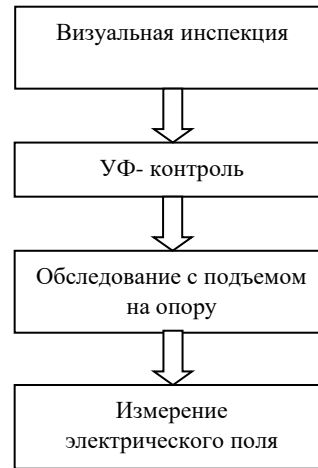


Рисунок 1 – Схема контроля полимерных изоляторов, используемая в Италии

#### **Тарельчатый изолятор в качестве индикатора.**

Отличительной особенностью рассматриваемого подхода диагностики полимерных изоляторов заключается в непрерывном во времени контроле электрического состояния, что в свою очередь, позволяет принимать заблаговременно необходимые меры по их ремонту или замене. Одним из возможных способов онлайн диагностики является использование специальных устройств, встраиваемых в изолирующую подвеску, выполняющих функцию индикатора состояния внутренней изоляции. В качестве такого рода индикатора электрического старения изоляции может служить тарельчатый изолятор, присоединяемый последовательно к полимерному изолятору со стороны токопровода [4,5]. По мере снижения электрической прочности полимерного изолятора, происходит вытеснение электрического поля от полимерного изолятора к тарельчатому, что отражается на тарельчатом изоляторе в виде электрических разрядов на его поверхности. Параметром контроля при таком способе диагностики является интенсивности светового, звукового и высокочастотных электромагнитных излучений, усиливающихся по мере прорастания поврежденного участка в полимерном изоляторе. Заметим, что последовательно присоединенный изолятор тарельчатого типа служит также в качестве элемента снижения максимальной напряженности электрического поля в полимерном изоляторе [6, 7] и механического демпфера импульсных осевых напряжений на полимерный изолятор [4]. Нельзя также не отметить, что наличие в изолирующей подвеске тарельчатого изолятора также упрощает количественную диагностику полимерного изолятора путем непосредственного измерения падения

напряжения на этом изоляторе и сопоставления с заранее нормированными критическими значениями.

Уровень исходящих от такого индикатора сигналов практически линейно зависит от величины приходящего на тарельчатом изоляторе напряжения и остается невысоким, что затрудняет в их идентификации. Как показывают численные и экспериментальные исследования, для полимерных изоляторов относительно по напряжению невысокого класса, 110 кВ и ниже, ошутимое возрастание процесса коронирования на тарельчатом изоляторе отмечается лишь перед «полным» выходом со строя контролируемого объекта. В этом усматривается недостаток рассматриваемого простейшего индикатора.

**Цель исследования:** существенно повысить эффективность индикации путем создания на тарельчатом изоляторе условий скачкообразной и устойчивой ионизации при заранее фиксированном напряжении.

**Поиск решения.** Одним из возможных направлений в решении поставленной задачи – образование искровых промежутков на поверхности тарельчатого изолятора с локально повышенной напряженностью электрического поля формированием проводящих поверхностей. Расчеты электрического поля показывают, что всегда можно расположить металлизированные кольцевые поверхности таким образом, чтобы максимальная напряженность не превышала критическую напряженность начала коронирования при нормальном рабочем напряжении. Так, например, для стандартного стеклянного изолятора U120 с нормированным рабочим напряжением 20 кВ оптимальный разрядный промежуток шапка – металлическая поверхность составляет  $\Delta r \approx 15$  мм (рис. 2). В этом случае можно ожидать, что дополнительные металлические поверхности не приведут к побочным отрицательным эффектам, к повышению уровней электромагнитных излучений – радиопомех при нормальных условиях эксплуатации.



Рисунок 2 – Обострение напряженности электрического поля у торца электрода – шапки изолятора металлизированной поверхностью

Были опробованы модели будущего индикатора, изготовленные на основе стандартных стеклянных изоляторов с металлическим покрытием, выполненным посредством наклеивания алюминиевой фольги как на верхней, так и на нижней поверхностях

изоляционной детали. Наилучший ожидаемый результат достигался в случае, если металлизированные поверхности располагались друг против друга на обеих поверхностях диэлектрика [9].

Результаты поиска иллюстрирует фотография на рис. 3. Как видно из этого рисунка, на модернизированном индикаторе наблюдались потоки искровых разрядов, перемежающихся по всему периметру между фольгой и электродами изолятора. В то же время, при той же величине напряжения на исходном изоляторе отмечались лишь слабые признаки коронирования. Примечательно, что «зажигание» искровых разрядов фиксировалось практически мгновенно при достижении некоторого значения напряжения, определяемого радиальным расстоянием искрового промежутка  $\Delta r$  край шапки – электрод на поверхности диэлектрика. Таким образом, индикатору придается эффект триггера с пороговым напряжением перехода от пассивного состояния в активное состояние.



Рисунок 3 – Стандартный изолятор (слева) и разрядник-индикатор (справа), находящиеся под одним и тем же напряжением

Наблюдаемое поведение модели индикатора можно объяснить следующим образом. На стандартном изоляторе, как было отмечено ранее, с повышением напряжения процессы ионизации протекают относительно плавно, коронирующие нити растекаются по всей поверхности изоляционной детали. Поэтому токи коронирования не превышают десятки микроампер вплоть до самого перекрытия изолятора. Организация проводящих поверхностей на диэлектрике, по сути, создает участок с дополнительной электрической емкостью в стеклотели для протекания распределенного тока смещения сквозь тело стекла, что свою очередь, способствует формированию сосредоточенных каналов токов ионизации в воздушной среде. Вследствие этого реализуется условие развития устойчивых искровых каналов в разрядных промежутках с токами в десятки и более крат превышающими токами коронирования, но в то же время, не переходящих в дуговую стадию, поскольку

токи ограничены сопротивлением дополнительной емкости. Соответственно, уровни световых и шумовых сигналов от индикатора были заведомо многократно сильнее, чем у обычного изолятора и можно их регистрировать без каких – либо усиливающих приборов на расстоянии десятки метров.

Очевидно, амплитудные значения импульса токов разряда определяются величиной заряда на индикаторе и длительностью разряда:

$$I_M \approx \frac{\Delta g_M}{2\Delta t} = \frac{C_{из} \sqrt{2} U_3}{2\Delta t} \quad (1)$$

где емкость тарельчатого изолятора;  $U_3$  – напряжение зажигания индикатора.

Принимаем реальные величины:  $\Delta t = 1 \div 5$  мкс ;  $U_3 = 20$  кВ. В этом случае ожидаемые импульсы токов разряда могут достигать  $I_M \approx 0,1 \div 0,6$  А. Можно показать, что такие импульсы токов могут быть идентифицированы на расстоянии 10 км и далее современными высокочастотными детекторами электромагнитных излучений, основываясь на законе полного тока:

$$\oint H_{МП} dl = I_M \quad (2)$$

где напряженность магнитного поля в зоне приема сигнала, приравняваемая пороговой чувствительностью детектора, 1мкА/м;  $l = \pi D$  – длина кругового контура интегрирования;  $D$  – диаметр, равный расстоянию между индикатором и детектором.

Результаты выполненных исследований обобщены на рис. 4, откуда можно видеть, что чувствительностью такого рода индикатора – напряжение зажигания  $U_3$ , можно управлять не только разрядными промежутками ( $\Delta r$ ) металлизированные покрытия – электроды изолятора, но и шириною покрытий, т.е., величиною электрической емкости.

Для защиты металлизированных поверхностей от внешних воздействий предлагается нанести покрытие из кремнийорганических эластомеров, нашедших широкое применение в электроэнергетике в качестве гидрофобизаторов внешней изоляции. Опыт показывает, что нанесение такого рода защитного покрытия практически не оказывает влияние на функциональную способность предложенного индикатора.

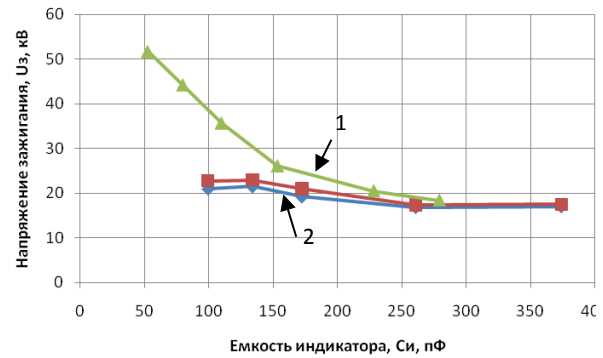


Рисунок 4 – Влияние дополнительной емкости индикатора на напряжение зажигания:

1-  $\Delta r \sim (35 \div 40)$  мм (тип изолятора U120BA)

#### Лабораторное испытание индикаторов.

Общепринято, что электрическое старение внутренней изоляции полимерных изоляторов является следствием проникновения атмосферной влаги и ее конденсация на поверхности стеклопластикового стержня, где ослаблена адгезия с силиконовой резиной. Наиболее слабым участком с этой точки зрения считается область тройной границы: защитная оболочка – оконцеватель – стеклопластиковый стержень, причем со стороны высокого потенциала [10].

Были рассмотрены два вида электрического повреждения внутренней изоляции линейного полимерного изолятора на классы напряжения 220, 330 кВ:

1- проращение проводящей дорожки на поверхности стеклопластикового стержня, начиная от потенциального электрода;

2- электрическое старение поверхности стеклопластикового стержня по всей длине.

Проращение науглероженной дорожки вдоль поверхности стержня имитировалось стальной проволокой диаметром 2 мм, проложенной, начиная от потенциального оконцевателя в сторону заземляемого электрода полимерного изолятора. Электрическое старение внутренней изоляции моделировалось с использованием гидрофильного водного раствора CaCl, рекомендованного для испытания полимерных изоляторов на трекинг – устойчивость. Раствор с различным удельным сопротивлением наносился на стеклопластиковый стержень по всей длине с последующим измерением распределения поверхностного сопротивления уже непосредственно на стержне до и после воздействия каждого испытательного напряжения. Отметим, что для моделирования внутренних дефектов использовались изоляторы раннего поколения, по реберной сборки, что существенно облегчало процедуру реализации электрического повреждения.

Индикатор - разрядник с разным пороговым напряжением зажигания  $U_3$  присоединялся с потенциальной стороны контролируемому полимерному изолятору. К испытываемому объекту подавалось напряжение, которое повышалось до

срабатывания индикатора, но по величине незначительно превышающее наибольшее длительно допустимое фазное напряжение. На рис. 5 запечатлен момент срабатывания индикатора на полимерном изоляторе ЛК-330 кВ с электрическим дефектом стержня.



Рисунок 5 – Полимерный изолятор с электрическим повреждением длиной  $\Delta L$ : левое фото ЛК330+стандартный изолятор; правое фото ЛК330+индикатор, испытательное напряжение  $205 \approx 210$  кВ

Полученные результаты опытов приводились путем пересчета к величине  $U_{ф.н.}$  таким образом устанавливалось соотношение между условной глубиной электрического повреждения полимерного изолятора и пороговым напряжением индикатора  $U_з$  при испытательном напряжении, близким  $U_{ф.н.}$

Усредненные зависимости для случая моделирования прорастания проводящей дорожки на несущем стержне приведены на рис. 6. Откуда видно, что чувствительность диагностики практически линейно зависит от напряжения зажигания индикатора. Вместе с тем, чем выше класс напряжения контролируемого изолятора, тем ранее обнаруживается такого рода повреждение. Так для ЛК-330 с помощью индикаторов  $U_з = (21 \div 23)$  кВ удавалось обнаружить условную потерю электрической прочности на уровне 20% от общей длины, когда как для ЛК-220 те же индикаторы загорались при 50%-ом повреждении. А для ЛК110 кВ при этих же чувствительностях индикация наблюдалась на уровне 80 % поврежденного участка стержня. Такая закономерность, очевидно, связана с тем, что, как известно, чем выше класс напряжения полимерного изолятора (т.е. длиннее), тем сильнее искривляется электрическое поле вдоль изолятора.

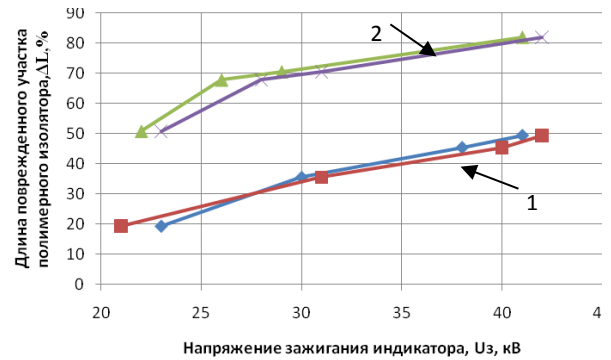


Рисунок 6 – Взаимосвязь между напряжением зажигания индикатора и глубиной ранней диагностики по длине поврежденного участка контролируемого полимерного изолятора:  
1- ЛК-330; 2- ЛК-220

Таким образом, на индикатор приходится большее падение напряжения, что создается лучшее условие для диагностики полимерного изолятора.

### Выводы

1. Последовательно присоединенные изоляторы тарельчатого типа служат не только в качестве дополнительного элемента для снижения напряженности поля полимерного изолятора, но и индикатором электрического старения изолирующей подвески.

2. Двухсторонняя металлизация поверхностей изоляционной детали создает условие локализации ионизационных процессов на индикаторе, характеризуемых наличием порогового напряжения интенсивного коронирования, протекающего в ограниченном пространстве.

3. Пороговое напряжение (по сути, напряжение срабатывания) индикатора определяется радиальными расстояниями между электродами изолятора и металлизированными поверхностями.

3. Гидрофобное покрытие из кремнийорганических эластомеров практически не оказывает влияние на электрофизические процессы на индикаторе

4. На чувствительность индикатора заметное влияние оказывает емкость, образованная металлизированными поверхностями на изоляционной детали.

5. Глубина ранней диагностики электрического состояния полимерного изолятора практически пропорциональна напряжению зажигания индикатора – порогового напряжения перекрытия искровых промежутков: шапка – металлизированные покрытия – стрежень. Для рассмотренного класса напряжения сети 330 кВ удастся выявить полимерный изолятор со скрытым электрическим дефектом с условной 20 % -й по длине поврежденности.

## Список литературы

1. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pigini: "Assessment of the condition of overhead line composite insulators", Paris, CIGRE-2012, b2-214.
2. CIGRE WG 22.03: "Review of "In service diagnostic testing" of composite insulators", ELECTRA, No. 169, December 1996, p.p. 105-119.
3. G. H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, "Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 661-666, Apr. 1998.
4. Ким Е.Д., Калмыков В.Л., Розов В.А., Демидов О.А. Стекланый изолятор как индикатор внутреннего электрического состояния полимерного изолятора. / Энергетика та електрифікація. – 2009. - №4. - С. 29-33.
5. E.D. Kim, K.L. Chrzan, The chain composed of composite insulators and cap and pin insulators (in Polish) Łańcuch złożony z izolatorów kompozytowych i kołpakowych. Przegląd Elektrotechniczny No 10, 2018, pp. 199-202
6. Qing Yang, Rui Wang, WenxiaSima, Tao Yuan and Lei Liao: "Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator" Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 248-252.
7. Jialong Wang\*, Yannan Chen, Jintao Liao, Zongren Peng: "Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators" ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) pp. 628-631.
8. Патент на изобретение. Индикатор электрического состояния полимерных изоляторов (вариант) / Е.Д. Ким (UA), Н.А. Карасев (RU), Е.А. Юданов (RU). - RU2699023 C1 H01B 17/46, опубл. 03.09.2019 - Бюл. №25.
9. <https://www.inmr.com/testing-adhesion-between-fiberglass-rod-housing-in-composite-insulators/>

## References (transliterated)

1. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pigini: "Assessment of the condition of overhead line composite insulators", Paris, CIGRE-2012, b2-214.
2. CIGRE WG 22.03: "Review of "In service diagnostic testing" of composite insulators", ELECTRA, No. 169, December 1996, p.p. 105-119.
3. G.H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, "Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 661-666, Apr. 1998.
4. Kim E.D., Kalmykov V.L., Rozov V.A., Demydov O.A. Steklannyy izolyator kak yndikator vnutrenneho elektrycheskoho sostoyaniya apolymernoho yzolyatora. / Enerhetyka ta elektryfikatsiia. – 2009. - №4. - S. 29-33.
5. E.D. Kim, K.L. Chrzan, The chain composed of composite insulators and cap and pin insulators (in Polish) Łańcuch złożony z izolatorów kompozytowych i kołpakowych. Przegląd Elektrotechniczny No 10, 2018, pp. 199-202
6. Qing Yang, Rui Wang, WenxiaSima, Tao Yuan and Lei Liao: "Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator" Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 248-252.
7. Jialong Wang\*, Yannan Chen, Jintao Liao, Zongren Peng: "Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators" ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) pp. 628-631.
8. Patent na yzobretenye. Yndikator elektrycheskoho sostoyaniya polymernykh yzolyatorov (varyant) / E.D. Kim (UA), N.A. Karasev (RU), E.A. Yudanov (RU). - RU2699023 C1 H01B 17/46, opubl. 03.09.2019 - Biul. №25.
9. <https://www.inmr.com/testing-adhesion-between-fiberglass-rod-housing-in-composite-insulators/>

Надійшла (received) 28.11.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кім Єн Дар (Kim En Dar, Kim En Dar)** – доктор технічних наук, доцент, ННППІ (УПА), м. Бахмут; тел.: (050)3711941; e-mail: ykim@meta.ua.

**Таран Володимир Миколайович (Taran Vladimir Nikolaevich, Taran Vladimir Mikolaevich)** - начальник науково-технічного відділу, ТОВ «Виробниче об'єднання Слов'янський завод високовольтних ізоляторів», м. Слов'янськ; тел.: (095)5050731; e-mail: [tvn\\_1965@ukr.net](mailto:tvn_1965@ukr.net).

**Залужна Галина Володимирівна (Zaluzna Galina Vladimirovna, Zaluzna Galina Volodimirovna)** – кандидат фізико - математичних наук, доцент, ННППІ (УПА), м. Бахмут; тел.: (050)1763623; e-mail: [zalartem@gmail.com](mailto:zalartem@gmail.com).

УДК 621.3.01

**И. А. КОСТЮКОВ****ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RC ЦЕПОЧЕК**

Рассматриваются задачи, связанные с преобразованием импульсов напряжения, вызванных апериодическим разрядом накопительного конденсатора, с использованием дифференцирующей RC цепочки, а также с фильтрацией низкочастотной компоненты напряжения на выходе синхронного детектора с использованием интегрирующей RC цепочки. Для указанных задач приведены формулы для расчета временных зависимостей сигналов на выходе преобразовательной цепочки. Проанализировано влияние постоянной времени дифференцирующей RC цепочки на соотношение между моментами времени, которые соответствуют максимальному значению апериодического импульса на входе цепочки и изменению полярности напряжения на выходе RC цепочки.

**Ключові слова:** интегрирующая цепочка, апериодический импульс напряжения, постоянная времени, импульсная характеристика, преобразование Лапласа.

**I. O. KOSTYUKOV****ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЕЯКИХ СИГНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ RC ЛАНЦЮЖКІВ**

Розглянуті задачі, що пов'язані із перетворенням імпульсів напруги, викликаних апериодичним режимом розряду накопичувального конденсатора, із використанням RC ланцюжка, а також із фільтрацією низькочастотної компоненти напруги на виході синхронного детектору із використанням інтегруючого RC ланцюжка. Для вказаних задач наведені формули для розрахунку залежностей сигналів на виході перетворювального ланцюжка від часу. Проаналізовано вплив постійної часу RC ланцюжка для диференціювання сигналів на співвідношення між моментами часу в які спостерігається максимальне значення апериодичного імпульсу на вході перетворювального ланцюжка та зміна полярності напруги на виході RC ланцюжка.

**Ключевые слова:** интегрирующий ланцюжок, апериодичний імпульс напруги, постійна часу, імпульсна характеристика, перетворення Лапласа.

**I. O. KOSTYUKOV****PARTICULAR QUALITIES OF SOME SIGNALS CONVERSIONS BY MEANS OF APPLYING RC CIRCUITS**

The problems associated with the conversion of voltage pulses caused by overdamped discharge of the storage capacitor using a differentiating RC circuit, as well as filtering the low-frequency component of voltage on the output of a synchronous detector using an integrating RC circuit, are considered. For these tasks, formulas are given for calculating the time dependences of the signals on the output of the converter circuit. The influence of time constant of differentiating RC circuit on ratio between the moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit is analyzed. It was shown that the ratio between the moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit can be used in order to determine the accuracy of differentiating of voltage pulses caused by overdamped discharge of the storage capacitor. The increasing of accuracy of differentiating is accompanied by the decreasing of difference between moments of time that correspond to the maximum value of the overdamped pulse on the input of RC circuit and to the change in the polarity of the voltage at the output of the RC circuit.

**Keywords:** RC circuit for integration, overdamped voltage pulse, time constant, Laplace transform.

**Введение.** Во многих технических приложениях возникает необходимость анализировать результаты преобразований, связанных с прохождением различных аналоговых сигналов через интегрирующие и дифференцирующие RC цепочки с различной величиной постоянной времени. К типичным примерам относятся: выделение низкочастотной составляющей на выходе синхронных детекторов в различных радиотехнических устройствах [1-3], определение моментов времени в которые сигнал принимает максимальные значения, а также определение величины заряда, который переносится через разрядную цепь вследствие разряда накопительного конденсатора [4]. Методы решения задач, связанных с преобразованием сигналов вследствие их прохождения через линейные цепи, в

частности через RC цепочки, разработаны достаточно подробно. В то же время, для удобства практического применения целесообразно иметь выражения для описания сигналов на выходе преобразовательных цепочек, как функций времени, для достаточно большого количества различных сигналов. В данной статье приводятся формулы для расчета временных зависимостей напряжения на выходе преобразовательной RC цепочки при воздействии на нее напряжения с выхода умножителя аналоговых сигналов синхронного детектора, а также с повторителя напряжения, на входе которого действует напряжение, повторяющее по форме кривую разрядного тока при апериодическом разряде накопительного конденсатора.

© И. А. Костюков, 2019

**Цель статьи** заключается в анализе выражений для определения напряжения на выходе преобразовательной цепи, как функции времени, при воздействии на  $RC$  цепочку сигнала, имеющего в своем составе по отношению к опорному сигналу компоненты на суммарной и разностной частоте, а также при воздействии на  $RC$  цепочку экспоненциальных импульсов, возникающих при апериодическом разряде конденсатора.

**Воздействие напряжения с выхода синхронного детектора на интегрирующую  $RC$  цепочку.** Напряжение на выходе  $RC$  цепочки обычно получают в виде свертки импульсной характеристики фильтра и сигнала на входе цепочки:

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_0^t U_{\text{вх}}(\tau) h(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $h(t)$  импульсная характеристика интегрирующей  $RC$  цепочки, которая может быть записана в следующем виде [5]:

$$h(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (2)$$

где  $R$  – активное сопротивление преобразовательной цепочки;

$C$  – величина емкости преобразовательной цепочки.

Временную зависимость входного сигнала, который получается как результат умножения опорного сигнала на анализируемый сигнал, можно записать в виде:

$$U_{\text{вх}}(t) = A_1 A_2 \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t + \varphi), \quad (3)$$

где  $A_1, A_2$  – амплитуды сигналов перемножаемых сигналов;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  – угловая частота перемножаемых сигналов;

$\varphi$  – величина фазового сдвига между перемножаемыми сигналами.

Напряжение на выходе  $RC$  цепочки будем определять в виде суммы двух слагаемых  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , которые соответствуют разностной и суммарной частоте сигнала в (3).

$$U_{\text{вых}}(t) = u_1(t) + u_2(t). \quad (4)$$

В таком случае, выполняя интегрирование согласно (1), напряжение на выходе  $RC$  цепочки можно записать в виде:

$$u_1(t) = \frac{0.5 A_1 A_2 (\Omega_0 - \Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 + \Omega_5) e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + M^2 \tau^2}, \quad (5)$$

где все  $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  могут быть определены по формулам (6-11):

$$\Omega_0 = -\cos(\varphi), \quad (6)$$

$$\Omega_1 = M\tau \sin(\varphi), \quad (7)$$

$$\Omega_2 = e^{\frac{t}{\tau}} \cos(tM) \cos(\varphi), \quad (8)$$

$$\Omega_3 = e^{\frac{t}{\tau}} \sin(tM) \sin(\varphi), \quad (9)$$

$$\Omega_4 = e^{\frac{t}{\tau}} M\tau \sin(tM) \cos(\varphi), \quad (10)$$

$$\Omega_5 = e^{\frac{t}{\tau}} M\tau \cos(tM) \sin(\varphi). \quad (11)$$

В формулах (6-11) постоянная  $M$  определяется в соответствии с (12):

$$M = 2\pi(f_2 - f_1). \quad (12)$$

Определение компоненты напряжения на выходе, обусловленной компонентом входного сигнала на суммарной частоте  $u_2(t)$ , можно проводить по формулам (5-12), с заменой  $M$  на  $m$ , определяемую согласно (13):

$$m = 2\pi(f_2 + f_1). \quad (13)$$

В качестве примера на рис. 1 приведена временная зависимость напряжения на выходе интегрирующей  $RC$  цепочки при воздействии на входе сигнала с параметрами:  $A_1 = A_2 = 1$  В,  $\varphi = 60^\circ$ , Параметры интегрирующей цепочки принимались равными:  $R = 10^6$  Ом,  $C = 1$  мкФ.

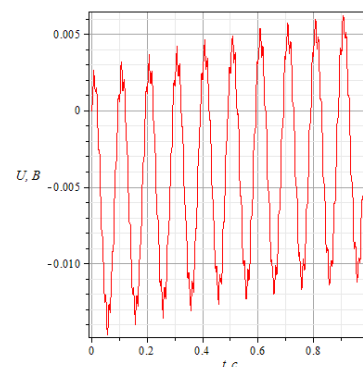


Рисунок 1 – Напряжение на выходе  $RC$  цепочки

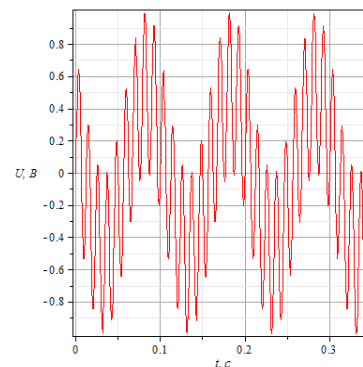


Рисунок 2 – Напряжение на входе  $RC$  цепочки

**Воздействие на  $RC$  цепочку импульса напряжения, возникающего вследствие**



**апериодического разряда накопительного конденсатора.** При определении напряжения на выходе дифференцирующей цепочки искомое напряжение будем определять как оригинал от изображения, равного произведению передаточной характеристики  $RC$  цепочки и преобразованию Лапласа от входного сигнала. Передаточная характеристика дифференцирующей  $RC$  цепочки может быть записана в виде [5]:

$$K(p) = \frac{p\tau}{1 + p\tau}. \quad (14)$$

Апериодический импульс входного напряжения обычно может быть описан как сумма двух экспонент:

$$U_{\text{вх}}(t) = Ae^{Bt} + Ce^{Dt}. \quad (15)$$

В таком случае преобразование Лапласа от входного напряжения (15) может быть записано в виде:

$$U_{\text{вх}}(p) = \frac{A}{p - B} + \frac{C}{p - D}. \quad (16)$$

Принимая во внимание (14) и (16), напряжение на выходе дифференцирующей  $RC$  цепочки при наличии на входе апериодического импульса, возникающего вследствие разряда накопительного конденсатора, в операторной форме может быть записано в соответствии с (17):

$$U_{\text{вых}}(p) = \left( \frac{A}{p - B} + \frac{C}{p - D} \right) \cdot \frac{p\tau}{(1 + p\tau)} = \frac{p^2\tau A - p\tau AD + p^2\tau C - p\tau CB}{(1 + p\tau)(p - B)(p - D)}. \quad (17)$$

В соответствии с одной из общих схем определения оригинала операторного выражения, оригинал выражения для напряжения на выходе  $RC$  цепочки будем искать в виде:

$$U_{\text{вых}}(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{Y(p_k)}{J'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (18)$$

где все  $p_k$  соответствуют корням уравнения (19):

$$(p - B)(p - D)(1 + p\tau) = 0. \quad (19)$$

Все  $Y(p_k)$  в (18) соответствуют значениям числителя из (17) в точках, соответствующих корням уравнения (19), все  $J'(p_k)$  в (18) соответствуют значениям производной от знаменателя из (17) по параметру  $p$  в точках, соответствующих корням уравнения (19).

Производная от знаменателя в (19) по параметру  $p$  может быть записана в виде:

$$\frac{dJ}{dp} = 2p - D - B + 3p^2\tau - 2p\tau D - 2s\tau B + \tau BD. \quad (20)$$

Таким образом, с учетом (20), оригинал выражения (17), которое определяет напряжение на активном сопротивлении  $RC$  цепочки в операторной форме, можно записать согласно (21):

$$U_{\text{вых}}(t) = \Theta_1(t) + \Theta_2(t) + \Theta_3(t). \quad (21)$$

где  $\Theta_1(t)$ ,  $\Theta_2(t)$ , и  $\Theta_3(t)$  могут быть определены с использованием (22-24):

$$\Theta_1(t) = \frac{B^2\tau A - B\tau AD}{B - D + B^2\tau - \tau BD} e^{Bt}, \quad (22)$$

$$\Theta_2(t) = \frac{D^2\tau C - D\tau CB}{D - B + D^2\tau - \tau BD} e^{Dt}, \quad (23)$$

$$\Theta_3(t) = \frac{A + D\tau A + C + p\tau CB}{1 + D\tau + \tau B + \tau^2 BD} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (24)$$

На рис. 3-5 приведены графики, характеризующие общие закономерности влияния постоянной времени на напряжение на выходе  $RC$  цепочки.

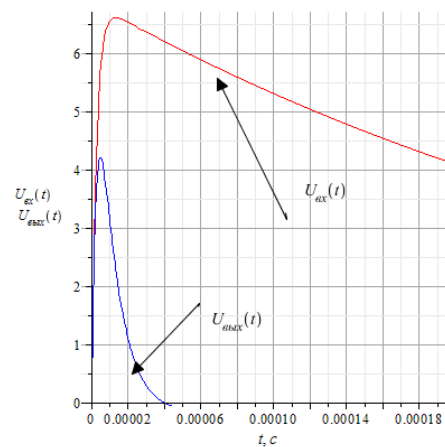


Рисунок 3 – Зависимости напряжения на входе и выходе  $RC$  цепочки при  $C = 99.57 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ ,  $R = 100 \text{ Ом}$

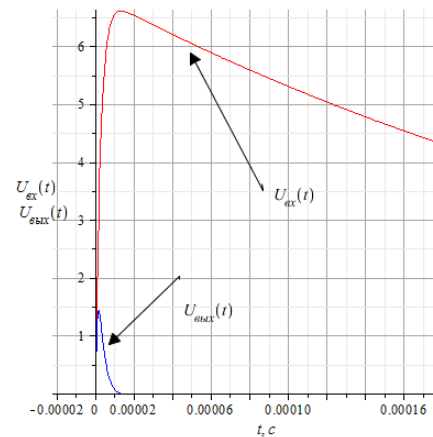


Рисунок 4 – Зависимости напряжения на входе и выходе  $RC$  цепочки при  $C = 99.57 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$

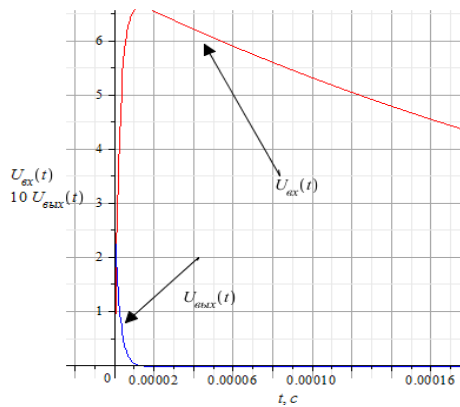


Рисунок 5 – Зависимости напряжения на входе и выходе  $RC$  цепочки при  $C = 99.57 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $R = 1$  Ом.

Увеличение крутизны фронта импульса на выходе  $RC$  цепочки сопровождается переносом эффективной ширины спектра сигнала в область высоких частот. Для практических приложений, например при необходимости определения длительности фронта аperiodического импульса, представляет интерес точка, в которой происходит изменение полярности напряжения на выходе  $RC$  цепочки. При аperiodическом разряде накопительного конденсатора в момент времени соответствующий максимальному значению разрядного тока напряжение на индуктивности разрядной цепи, пропорциональное производной по времени от разрядного тока, уменьшается до нуля.

Таким образом, одним из критериев правильности выбора постоянной времени  $RC$  цепочки при дифференцировании аperiodического импульса напряжения может являться совпадение моментов времени, в которые наблюдается изменение полярности импульса на выходе  $RC$  цепочки и максимальное значение импульса напряжения на входе  $RC$  цепочки. Влияние постоянной времени  $RC$  цепочки на момент времени  $t_0$ , в который наблюдается изменение полярности напряжения на выходе цепочки, рассчитанное по данным на рис. 3-5 показано на рис. 6.

Как видно из данных на рис. 6, при уменьшении постоянной времени разница между  $t_m$  и  $t_0$  уменьшается, что свидетельствует об увеличении точности дифференцирования сигнала.

**Выводы.** В статье приведены формулы для расчета временных зависимостей напряжения на выходе интегрирующей  $RC$  цепочки при воздействии на нее напряжения с выхода умножителя аналоговых сигналов синхронного детектора, а также при воздействии на дифференцирующую  $RC$  цепочку экспоненциальных импульсов, возникающих при аperiodическом разряде конденсатора. Показано, что определение точности дифференцирования таких импульсов можно проводить

путем сравнения моментов времени, в которые происходит смена полярности напряжения на выходе цепочки с моментом времени, в которые экспоненциальный импульс на входе цепочки принимает максимальное значение.

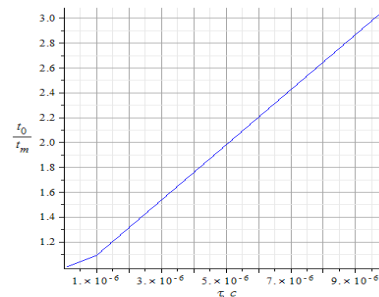


Рисунок 6 – Влияние постоянной времени  $RC$  цепочки на соотношение между моментами времени, в которые происходит изменение полярности напряжения на выходе цепочки ( $t_0$ ) и наблюдается максимальное значение напряжения на входе цепочки ( $t_m$ )

#### Список литературы

1. Ворох Д. А., Данилин А. И., Бояркина У. В. Синхронный детектор для мостикового вихретокового преобразователя. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19, № 4. С. 167 – 170.
2. Ворох Д. А., Данилин А. И., Дудкина Е. Е. Математическая модель синхронного детектора для мостикового вихретокового преобразователя. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 5. С. 391 – 394.
3. Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. Electrocomponent Science and Technology. 1977. № 1. P. 37 – 42.
4. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.
5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988. 448 с.

#### References (transliterated)

1. Voroh D. A., Danilin A. I., Bojarkina U. V. Matematicheskaja model' sinhronnogo detektora dlja mostikovogo vihretokovogo preobrazovatelja. [Synchronous detector for bridge eddy current probes]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2017. Vol. 19, no. 5. pp. 167 – 170.
2. Voroh D. A., Danilin A. I., Dudkina E. E. Matematicheskaja model' sinhronnogo detektora dlja mostikovogo vihretokovogo preobrazovatelja. [Mathematical model of synchronous detector for bridge vortex-converter converter]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2018. Vol. 20, no. 5. pp. 391 – 394.
3. Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. Electrocomponent Science and Technology. 1977. № 1. P. 37 – 42.
4. Pejton A. Dzh., Volsh V. Analogovaja jelektronika na operacionnyh usiliteljah [Analog electronics on operational amplifiers]. Moscow, BINOM Publ., 1994. 352 p.
5. Baskakov S. I. Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio circuits and signals]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1988. 448 p.

Поступила (received) 16.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Костюков Иван Александрович (Костюков Иван Александрович, Kostiukov Ivan)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail iakostiukow@gmail.com

*О. В. КУЛАПИН, К. В. МАХОТИЛО*

### **ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТА СТАН РОЗВИТКУ КОНЦЕПЦІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ І ВІРТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

У роботі виконано аналіз сучасного стану розвитку та нормативного визначення концепцій інтелектуальних енергосистем, енергетичних просьюмерів і віртуальних електростанцій в Європейському Союзі та США. Визначено базові складові поняття Smart Grid, які є спільними для підходів в цих країнах, а також ключові особливості, що їх відрізняють. Показано взаємозв'язок понять енергетичних просьюмерів та віртуальних електростанцій. Зазначено, що ключовими факторами, що забезпечують розвиток усіх цих технологій, є стрімке зростання відновлюваної генерації та невпинні зусилля з запобігання змінам клімату в усьому світі. Виконано аналіз розроблених схем організації віртуальних електростанцій та функцій їх учасників. Показано, що технологічною базою для їх функціонування мають стати інтелектуальні електромережі. Грунтуючись на огляді літератури, зроблено висновки про актуальність впровадження інтелектуальних електромереж та віртуальних електростанцій в об'єднаній енергосистемі України задля підтримки подальшого розвитку відновлюваної генерації. При цьому відмічена необхідність застосування не лише нормативних документів ЄС, але й врахування підходів США.

**Ключові слова:** смарт мережа, споживач-просьюмер, віртуальна електростанція.

*A. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO*

### **ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И СОСТОЯНИЮ РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В работе выполнен анализ современного состояния развития и нормативного определения концепций интеллектуальных энергосистем, энергетических просьюмеров и виртуальных электростанций в Европейском Союзе и США. Определены базовые составляющие понятия Smart Grid, которые являются общими для подходов в этих странах, а также ключевые особенности, которые их отличают. Показана взаимосвязь понятий энергетических просьюмеров и виртуальных электростанций. Отмечено, что ключевыми факторами, определяющими развитие всех этих технологий, является стремительный рост возобновляемой генерации и неустанные усилия по предотвращению изменения климата во всем мире. Выполнен анализ разработанных схем организации виртуальных электростанций и функций их участников. Показано, что технологической базой для их функционирования должны стать интеллектуальные электросети. Основываясь на обзоре литературы, сделаны выводы об актуальности внедрения интеллектуальных электросетей и виртуальных электростанций в объединенной энергосистеме Украины для поддержания дальнейшего развития возобновляемой генерации. При этом отмечена необходимость использования не только нормативных документов ЕС, но и учета подходов США.

**Ключевые слова:** смарт сеть, потребитель-просьюмер, виртуальная электростанция.

*O. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO*

### **APPROACHES TO THE DEFINITION AND DEVELOPMENT STATE OF SMART GRID AND VIRTUAL POWER PLANTS CONCEPTS**

The paper analyzes the current state of development and regulatory definition of the Smart Grid, energy Prosumers and Virtual Power Plants concepts in the European Union and the USA. The basic components of the Smart Grid that are common to these countries approaches are identified, as well as the key features that distinguish them. The connection of the Prosumers and Virtual Power Plants concepts is shown. It is stated that the key factors that drive the development of all these technologies are the worldwide rapid growth of renewable generation and the continued efforts to prevent climate change. The possible Virtual Power Plants schemes and their participant's functions are analyzed. It has been shown that Smart Grid should become the technological base for its functioning. Based on the literature review, it is concluded that the implementation of Smart Grids and Virtual Power Plants in power system of Ukraine is urgent in order to support the further renewable generation grow. At the same time, it is noted the need to apply not only EU regulations acts, but also take into account US regulation approaches.

**Keywords:** smart grid, prosumer, virtual power plant

**Вступ.** У світі спостерігається швидке зростання попиту на енергію. International Energy Outlook 2019 прогнозує [1], що в період між 2018 та 2050 рр. через зростання попиту, збільшення частки відновлюваної генерації, економічні та політичні чинники щорічне збільшення світового споживання енергії становитиме 3%. Загальносвітовою тенденцією в цей час стане перехід від невідновлюваних до відновлюваних джерел енергії. Крім того, для керування більш масштабними енергосистемами односпрямована модель енергетики «постачальник-споживач» має перетворитися на двонаправлену енергоінформаційну модель [2]. Базою для цих перетворень має стати концепція розумних

(інтелектуальних) енергомереж (енергосистем), відомих як «Smart Grid».

Термін Smart Grid почав широко вживатись з 2003 р., коли його вперше було використано в статті М. Бург [3]. Зокрема, в цій роботі було представлено бачення економічних та технічних проблем енергосистем, які можуть бути компенсовані шляхом створення Smart Grid систем. Надалі в різноманітних дослідженнях поняття «Smart Grid» почало розвиватись і варіюватись, зберігаючи, тим не менш, декілька ключових ознак.

Так у доповіді Канадської електричної асоціації [4], на основі аналізу провідних наукових робіт, стійкими економічними і безпековими особливостями

© О. В. Кулапін, К. В. Махотіло 2019

усіх варіантів систем Smart Grid визначено: комунікацію [5], інтеграцію та автоматизацію [6]. Відповідно до цих особливостей, в [4] надано наступне визначення. «Smart Grid» – це набір застосунків, заснованих на сучасних інформаційних технологіях, методах автоматизації процесів та досягнутому високому рівні автоматизації електромереж, який поєднує поведінку усіх підключених споживачів і дії усіх джерел енергії за допомогою розосереджених засобів зв'язку, щоб забезпечити стійке, економічне і надійне енергопостачання. Smart Grid використовує інформаційні та комунікаційні технології для підвищення надійності, доступності, гнучкості та ефективності енергопостачання [7].

На сьогодні основним рушієм розвитку та впровадження Smart Grid є усвідомлення зацікавленими сторонами (комунальними підприємствами, постачальниками енергії, виробниками, регулюючими органами, споживачами і їх суспільними представниками), а також урядами країн необхідності вирішення складних питань подальшого розвитку енергетики. При цьому особливості місцевих факторів і проблем в різних країнах суттєво впливають на пріоритети в підходах до створення і розвитку інтелектуальних енергосистем.

Зараз у всьому світі широкі суспільні кола активно чинять тиск на владні інститути з метою рішучого скорочення викидів парникових газів та збільшення частки виробництва енергії відновлюваними джерелами. Smart Grid розглядаються як важливий інструмент, що дозволить досягнути цієї мети. Але й поза економічними і політичними мотивами, широке впровадження Smart Grid все більше відповідає сучасному стану розвитку інформаційних технологій, засобів зв'язку, систем зберігання енергії та готовності споживачів відігравати активну роль в оптимізації роботи енергосистеми. Більш того, Smart Grid можуть стати технологічною основою для розвитку нових спільнот споживачів типу просьюмер [8] та їх об'єднання у віртуальні електричні станції.

**Мета статті.** Аналіз підходів до визначення і особливостей розвитку концепції інтелектуальних енергосистем в країнах ЄС та США, виявлення її взаємозв'язку з іншими концепціями сталого розвитку енергетики, такими як споживачі-просьюмери та віртуальні електростанції.

**Концепція Smart Grid в ЄС та США.** В країнах ЄС одним з головних факторів, що забезпечив зростання уваги до розвитку Smart Grid стала лібералізація енергетичного ринку в період між 1996 і 2009 рр. Ця зміна правил регулювання надала учасникам ринку недискримінаційний і прозорий доступ до енергетичних мереж, юридично розмежувала діяльність з виробництва, розподілу й постачання енергії. Також вона відкрила шлях до широкого використання децентралізованих відновлюваних джерел енергії та перетворення звичайних споживачів електроенергії в активних споживачів, та в їх новий тип – просьюмерів [9].

Викликане цими змінами значне зростання швидкості процесів, що відбуваються на

енергетичному ринку, кількості його учасників та обсягів обміну інформацією вимагає створення нових інтелектуальних енергосистем.

Інший фактор, що визначає необхідність створення та розвитку Smart Grid в ЄС, – це активна підтримка розвитку відновлюваної енергетики. Вона закладена в основу політики розвитку енергетики ЄС стратегією «Європа 2020» та довгостроковою всеохоплюючою «Дорожньою картою 2050 року» [10]. Ці стратегії та відповідна їм Директива RES (2009/28/EC) про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел [11], зокрема, встановлюють обов'язкову мету збільшити до 2030 р. частку відновлюваних джерел енергії в ЄС щонайменше до 27% та кількість цільових приєднань відновлюваних джерел енергії до електромереж щонайменше на 15%.

В ЄС досі немає окремого юридичного визначення технічних вимог до самих Smart Grid, проте вони згадуються у інших нормативах та керівних документах. Так в преамбулі Директиви ІЕМ (2005/89/EC) про внутрішні енергетичні ринки [12] зазначається, що «держави-члени повинні заохочувати модернізацію розподільних мереж, наприклад, шляхом введення інтелектуальних мереж, які повинні бути побудовані таким чином, щоб залучати децентралізовану генерацію та енергоефективні системи». Організація Європейська технологічна платформа для Smart Grid (Smart Grid ETP) [13] просуває закріплення визначення поняття Smart Grid, запропонованого Канадською електричною асоціацією. Проте наразі, в ЄС до категорії Smart Grid відносяться будь-які модернізовані електричні мережі, в які були додано двосторонній цифровий зв'язок між постачальником і споживачем та інтелектуальні системи вимірювання й моніторингу.

В той же час, в нормативних документах ЄС багато уваги приділяється визначенню елементів та учасників енергетичного ринку, які будуть активно взаємодіяти в межах Smart Grid. Наприклад, переглянуті версії Директиви ІЕМ, [12] та Директиви RES [11], вводять наступні важливі поняття.

Активний споживач – абонент електричної мережі, який споживає, зберігає або продає електроенергію, вироблену в його помешканні. Устаткування активного споживача для виробництва енергії може управлятися третьою стороною.

Відновлюваний самоспоживач – активний споживач, який споживає і може зберігати й продавати відновлювану електроенергію, вироблену в його приміщеннях, включаючи багатоквартирні будинки, комерційні або суспільні об'єкти.

Точка зарядки електромобілю – інтерфейс, здатний заряджати або замінювати акумулятор одного електромобіля за один раз. Робота точки зарядки за певних умов може управлятися оператором розподільчої системи.

Агрегатор – учасник ринку, який об'єднує численні навантаження або генерацію електроенергії споживачів для продажу або купівлі на будь-якому організованому енергетичному ринку.

Місцевий енергетичне співтовариство – кооператив, некомерційна організація або інша юридична особа, контрольована місцевими учасниками, що беруть участь у розподіленій генерації, яка виконує обов'язки оператора розподільної системи, постачальника або агрегатора на місцевому рівні.

Спільнота відновлюваної енергії – об'єднання, яке має право виробляти, споживати, зберігати і продавати відновлювану енергію.

Завдання Smart Grid, згідно цим оновленим директивам, полягає в тому, щоб дозволити вказаним активним учасникам ринку самостійно споживати енергію без невикористаних обмежень і отримувати винагороду за електроенергію, яку вони передають в мережу.

В США історія розвитку Smart grid має свої особливості як у визначенні термінів так і у пріоритетах.

Міністерство енергетики США (DOE) визначає Smart Grid [14] як автоматизовану, широко розподілену енергетичну мережу, яка характеризується двостороннім потоком електроенергії та інформації, здатна контролювати всі елементи енергосистеми: від електростанцій до клієнтів і окремих пристроїв, надає енергосистемі можливості розподілених обчислень і комунікації для обробки інформації в режимі реального часу, забезпечення майже постійного балансу попиту та пропозиції на рівні пристроїв.

Завдання створення Smart Grid енергомереж в США закріплене законом про енергетичну незалежність і безпеку (EISA-2007) [15]. Згідно з ним енергетична політика держави полягає в підтримці модернізації національної системи передачі і розподілу електроенергії, підтримці надійної і безпечної електроенергетичної інфраструктури, здатної відповідати майбутньому зростанню попиту. Метою політики є досягнення наступних параметрів, які разом характеризують оновлену електроенергетичну інфраструктуру як Smart Grid:

- широке використання цифрової інформації та технологій управління для підвищення надійності, безпеки та ефективності електричної мережі;
- динамічна оптимізація операцій і ресурсів енергосистеми, при повній кібербезпеці;
- розгортання і інтеграція розподіленої генерації, включаючи відновлювані ресурси;
- розробка й інтеграція в процес керування ресурсів зі сторони попиту і ресурсів енергоефективності;
- розгортання Smart-технологій (автоматизованих інтерактивних технологій оптимізації роботи мережевих та споживчих пристроїв у реальному часі) для вимірювання, передачі даних про роботу й стан мережі та автоматизації розподілу енергії;
- інтеграція Smart приладів і Smart споживчих пристроїв;
- розгортання і інтеграція технологій управління піковим навантаженням та зберіганням енергії, включаючи електричні транспортні засоби та системи кондиціонування з накопиченням тепла;

– надання споживачам своєчасної інформації і варіантів управління;

– виявлення та зниження необґрунтованих або непотрібних бар'єрів для впровадження технологій, практик і послуг Smart Grid.

Порівнюючи розвиток концепції Smart Grid в країнах ЄС та США можна відмітити, що офіційне визначення цього поняття за суттю не відрізняється. Так саме і з функціональної точки зору, в усіх країнах-лідерах за Smart Grid закріплюються завдання полегшення підтримання балансу виробництва і споживання на рівні споживачів, полегшення інтеграції до управління енергосистемою споживачів, систем зберігання енергії і ресурсів енергоефективності, забезпечення постійного обміну інформацією [16].

Але законодавчо закріплені пріоритети створення та розвитку Smart Grid мають свої особливості. Так в країнах ЄС розвиток технологій Smart Grid, в першу чергу, розглядається як шлях суттєвого збільшення частки відновлюваної генерації. В США серед цілей розвитку Smart Grid більший акцент робиться на створення надійної та безпечної (зокрема кібербезпечної) енергосистеми.

**Просьюмери та віртуальні електростанції в межах концепції Smart Grid.** Розвиток технологій інтелектуальних мереж взаємопов'язаний з виникненням та розвитком нового типу активного споживача енергії – «просьюмера».

Неологізм «просьюмер» походить від поєднання англійських слів «виробник» та «споживач», та широко застосовується в сучасній економічній теорії. В енергетиці просьюмери відрізняються від традиційних споживачів електроенергії тим, що не лише споживають з мережі, але й генерують, активно передають та зберігають енергію. Просьюмери можуть продавати надлишкову електроенергію не лише просто в мережу, а й адресно своїм власним споживачам [17]. До просьюмерів відносяться, перш за все, власники систем відновлюваної генерації, зокрема фотоелектричних систем.

В ЄС Директива RES (2009/28/EC) [11] характеризує просьюмера як активного «самоспоживача», який генерує енергію для самостійно споживання та, можливо, для продажу в електромережу. В нормативах США просьюмером вважається споживач, який протягом певних годин доби виробляє більше енергії, ніж споживає (без уточнення факту продажу).

С точки зору енергосистеми просьюмери здатні покращити ефективність роботи енергомережі, підтримати баланс місцевого попиту і пропозиції [18], зменшити коливання потужності та перетоки енергії в розподільних мережах за рахунок власних ресурсів керування споживанням побутових приладів та накопичення енергії [19].

Інформаційна та технічна підтримка діяльності такого типу споживачів вимагає наявності у енергомережі інтелектуальних властивостей. Тому згідно з визначенням в [20] просьюмери також характеризуються використанням інтелектуальних вимірювальних приладів, здатних здійснювати облік та

керування генерацією енергії, інтегруватися з системами управління побутовими електроприладами, накопичувачами енергії, електромобілями, підтримувати роботу з системами «мережа-мережа» в межах Smart Grid.

Окрім розвитку технологій Smart Grid до чинників, що підтримують виникнення і поширення просьюмерів, також належать урядові програми стимулювання і заохочення участі в роботі енергосистеми, та активні громадські кампанії щодо зменшення шкідливого впливу енергетики на навколишнє середовище [21].

Подальшим розвитком концепції просьюмерів є об'єднання в спільноти чи мережі просьюмерів, які мають спільну мету і схожу поведінку (в сенсі режимів споживання та генерування енергії), задля спільної участі у конкурентному енергетичному ринку. При досягненні певного обсягу такі спільноти можуть виступати як єдина потужна віртуальна електростанція (ВіртЕС).

Концепція ВіртЕС була вперше запропонована в 2005 р. в рамках проекту FENIX [22] («Гнучка електрична мережа для інтеграції очікуваної еволюції енергії»). Тоді її головна мета визначалась, перш за все, як інтеграція ВЕР в роботу енергосистеми і операції на енергоринку. Велика кількість малопотужних розподілених відновлюваних джерел енергії мають бути об'єднані у єдину віртуальну електростанцію для спрощення керування енергосистемою, підтримання балансу споживання і генерації, забезпечення стійкості та надійності роботи мережі.

На сьогодні точні визначення поняття ВіртЕС варіюються від «комбінація розподіленої генерації, постійних і змінних навантажень, інтегрованих лініями зв'язку і методами управління в реальному часі» [23], до «система управління енергоспоживанням спільноти активних споживачів, що виглядає для енергоринку, як реальна електростанція» [24].

На рис. 1 зображені типові компоненти ВіртЕС згідно [25].

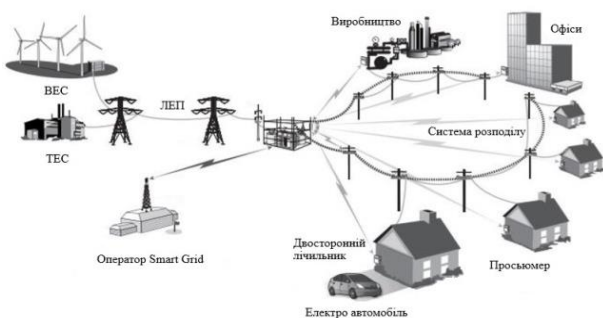


Рисунок 1 – Концептуальна схема ВіртЕС

Основою ВіртЕС є центр дистанційного управління, та Smart Grid мережа, що поєднує всіх учасників станції в межах енергосистеми. Програмне забезпечення центра дистанційного управління, ефективно координує і контролює роботу розподілених генераторів, систем зберігання енергії та регульованого навантаження, зокрема просьюмерів.

Стохастичний характер генерації окремих відновлюваних джерел енергії компенсується в межах ВіртЕС великою кількістю генераторів, ресурсами управління споживанням та акумулюванням енергії. В результаті, для енергосистеми всі ці об'єкти виступають, як велика централізована електростанція зі звичайним, чи навіть більш високим рівнем керованості та маневреності.

З точки зору просьюмерів метою створення ВіртЕС є мінімізація їх витрат на виробництво і максимізація прибутку від володіння обладнанням. Просьюмери в «колективній» формі отримують можливість доступу до ринку електроенергії включно з ринком системних послуг. Це дозволяє їм отримувати значний прибуток навіть без спеціальних «зелених» тарифів та далі збільшувати свою потужність без обмежень зі сторони енергосистеми [26].

Існують й інші концепції ВіртЕС [27], які передбачають не централізовану, а багаторівневу ієрархічну структуру системи управління станцією та запровадження оператора ВіртЕС. Оператором ВіртЕС може бути як незалежна компанія, так і оператор місцевої розподільної мережі. Він несе відповідальність за управління ВіртЕС, координацію роботи з оператором енергоринку і локальними постачальниками комунальних послуг. В ієрархічній ВіртЕС технічне управління здійснюється засобами інтелектуальних пристроїв, встановлених у споживачів та на локальному рівні, а загальні функції диспетчеризації станції здійснюються хмарним центром управління на верхньому рівні оператора.

Варто відзначити, що, будь-яка архітектура ВіртЕС передбачає пріоритетність загальної стратегії оперативного управління станцією і певні обмеження рішень окремих учасників: споживачів, генераторів чи просьюмерів. В той же час подальший розвиток ідеї енергетичного просьюмеризма і залучення до об'єднаної енергосистеми мільйонів активних споживачів практично неможливий без координації їх роботи в межах віртуальних електростанцій.

**Висновок.** Проведений аналіз виникнення і розвитку концепцій інтелектуальних енергомереж, просьюмерів та віртуальних електростанцій свідчить, що вони досі знаходяться на етапі становлення, проте, швидко розвиваються і вже набувають точного юридичного визначення. Цей процес відбувається на фоні і значною мірою завдяки зростанню відновлюваної генерації та постійним зусиллям з запобігання змін клімату в усьому світі, і зокрема в ЄС та США. Перехід цих технологій від стану концепцій до реального широкого впровадження здатен розпочати в енергетичній галузі нову еру високої безпеки й енергоефективності енергопостачання, а також повної відкритості ринку електричної енергії.

Стрімкий розвиток відновленої генерації робить актуальним впровадження інтелектуальних енергомереж та віртуальних електростанцій і в Об'єднаній енергосистемі України. Цьому процесу сприятиме те, що Україна як Асоційований член ЄС вже адаптує нормативну базу в енергетичній сфері до загальноєвропейських норм. З іншого боку, враховуючі

зовнішні виклики національній безпеці, при розвитку Smart Grid в Україні слід використати досвід США і закріпити в базових принципах цих технологій вимоги кібербезпеки.

Враховуючи, що головним рушієм змін в енергетиці України в останній роки став «сонячний просьюмеризм», можна очікувати, що впровадження інтелектуальних енергомереж та віртуальних електростанцій також буде відбуватись «знизу», з рівня просьюмерів – власників фотоелектричних систем потужністю до кількох МВт. Тому завдання розвитку теоретичної і технологічної бази для їх функціонування в межах об'єднаної енергосистеми для суспільного блага є актуальною і важливою науковою задачею.

#### Список літератури

1. EIA. International Energy Outlook 2019. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php> (accessed on 11.01.2020).
2. El-hawary, M.E. The Smart Grid State-of-the-art and Future Trends. *Electr. Power Compon. Syst.* 2014, 42, 239–250.
3. Burr M. T. Reliability demands drive automation investments. *Public Utilities Fortnightly*, Technology Corridor department, Nov. 1, 2003.
4. Canadian Electricity Association. The smart grid. Available at: [www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf](http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf) (accessed on 11.01.2020).
5. Murphy, P., Angemeer, M., Collie, D., Fraser, N., Haines, A., McFadden, D., Major, K., Nathwani, J., Shervill, P. and Smith, W. September 2010. Enabling tomorrow's electricity system: Report of the Ontario Smart Grid Forum. Available at: [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grid\\_Forum-Report.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum-Report.pdf) (accessed on 11.01.2020).
6. mmissions The National Association of Regulatory Utility Commissioners. June 2010. Available at: [http://www.naruc.org/Publications/NARUC\\_Smart\\_Grid\\_Factsheet%205\\_09.pdf](http://www.naruc.org/Publications/NARUC_Smart_Grid_Factsheet%205_09.pdf) (accessed on 11.01.2020).
7. DOE. Request for information. Available at: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-05-11/html/2010-11129.htm> (accessed on 11.01.2020).
8. Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. - 2012. № 5. С. 52-67.
9. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
10. European Commission. Smart Grids: from innovation to deployment, Brussels. 2011.
11. Directive 2009/28/ec of the european parliament and of the council of 23 April 2009. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (accessed on 11.01.2020).
12. Directive 2005/89/ec of the european parliament and of the council of 18 January 2006. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/89/oj> (accessed on 11.01.2020).
13. European Technology Platform (ETP) SmartGrids. Available at: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/policy/eu-steering-initiatives/smart-grids-european-technology-platform/> (accessed on 11.01.2020).
14. Department of Energy (DOE). Available at: <https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid> (accessed on 11.01.2020)
15. Energy independence and security act of 2007. Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (accessed on 11.01.2020).
16. Koirala, B.; Hakvoort, R. Integrated Community-Based Energy Systems: Aligning Technology, Incentives, and Regulations. In *Innovation and Disruption at the Grid's Edge*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 363–387
17. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. An innovative approach to manage prosumers in Smart Grid. In *Proceedings of the IEEE World Congress on Sustainable Technologies (WCST)*, London, UK, 7–10 November 2011; pp. 141–146.
18. Potdar, V.; Chandan, A.; Batol, S.; Patel, N. Big Energy Data Management for Smart Grids—Issues, Challenges and Recent Developments. In *Smart Cities*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 177–205.
19. El-Batawy, S.; Morsi, W.G. Optimal Design of Community Battery Energy Storage Systems with Prosumers Owning Electric Vehicles. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017.
20. Al-Kuwari, A.M.A.; Ortega-Sanchez, C.; Sharif, A.; Potdar, V. User friendly smart home infrastructure: BeeHouse. In *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST)*, Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 257–262.
21. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
22. D. Pudjianto, C. Ramsay, "The virtual power plant: enabling integration of distributed generation and demand". *FENIX Bulletin*, 2008; vol. 2, pp. 10-16.
23. C. Chunwu, L. Na. "International experience and Enlightenment of virtual power plant development". *Power grid Technology*, 2013; vol. 37, no. 8, pp. 2258-2263.
24. Y. Renfeng, A. Qian, "Virtual power plant technology discussion", *Electrical and Energy Efficiency Management Technology*, 2014; vol. 63, no. 9, pp. 33-38,
25. H. Shahzeb,\*, M. Hafiz, A. Zenab, N. Haq, DSM Using Fish Swarm Optimization and Harmony Search Algorithm Using HEMS in Smart Grid. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2018.
26. Morstyn, T.; Farrell, N.; Darby, S.J.; McCulloch, M.D. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nat. Energy* 2018; pp. 94–101.
27. Rekik, M.; Chtourou, Z.; Mitton, N.; Atieh, A. Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid. *Sustain. Cities Soc.* 2016; pp. 39–48.

#### References (transliterated)

1. EIA. International Energy Outlook 2019. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php> (accessed on 11.01.2020).
2. El-hawary, M.E. The Smart Grid State-of-the-art and Future Trends. *Electr. Power Compon. Syst.* 2014, 42, 239–250.
3. Burr M. T. Reliability demands drive automation investments. *Public Utilities Fortnightly*, Technology Corridor department, Nov. 1, 2003.
4. Canadian Electricity Association. The smart grid. Available at: [www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf](http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf) (accessed on 11.01.2020).
5. Murphy, P., Angemeer, M., Collie, D., Fraser, N., Haines, A., McFadden, D., Major, K., Nathwani, J., Shervill, P. and Smith, W. September 2010. Enabling tomorrow's electricity system: Report of the Ontario Smart Grid Forum. Available at: [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grid\\_Forum-Report.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum-Report.pdf) (accessed on 11.01.2020).
6. Keogh, M. The smart grid: Frequently asked questions for state commissions The National Association of Regulatory Utility Commissioners. June 2010. Available at: [http://www.naruc.org/Publications/NARUC\\_Smart\\_Grid\\_Factsheet%205\\_09.pdf](http://www.naruc.org/Publications/NARUC_Smart_Grid_Factsheet%205_09.pdf) (accessed on 11.01.2020).
7. DOE. Request for information. Available at: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-05-11/html/2010-11129.htm> (accessed on 11.01.2020).
8. B.S. Stohnii, O.V. Kyrlyenko, A.V. Prakhovnyk, S.P. Denysiuk. Eviolutsiia intelektualnykh elektrychnykh merezh ta yikhni perspektivy v Ukraini. *Tekhnichna elektrodynamika*. - 2012. № 5. S. 52-67.
9. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels. 2006.
10. European Commission. Smart Grids: from innovation to deployment, Brussels. 2011.
11. Directive 2009/28/ec of the european parliament and of the council of 23 April 2009. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (accessed on 11.01.2020).
12. Directive 2005/89/ec of the european parliament and of the council of 18 January 2006. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/89/oj> (accessed on 11.01.2020).
13. European Technology Platform (ETP) SmartGrids. Available at: <https://www.edsoforsmartgrids.eu/policy/eu-steering-initiatives/smart-grids-european-technology-platform/> (accessed on 11.11.2019).

14. Department of Energy (DOE). Available at: <https://www.energy.gov/science-innovation/electric-power/smart-grid> (accessed on 11.01.2020)
15. Energy independence and security act of 2007. Available at: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf> (accessed on 11.01.2020).
16. Koirala, B.; Hakvoort, R. Integrated Community-Based Energy Systems: Aligning Technology, Incentives, and Regulations. In Innovation and Disruption at the Grid's Edge; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 363–387
17. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. An innovative approach to manage prosumers in Smart Grid. In Proceedings of the IEEE World Congress on Sustainable Technologies (WCST), London, UK, 7–10 November 2011; pp. 141–146.
18. Potdar, V.; Chandan, A.; Batol, S.; Patel, N. Big Energy Data Management for Smart Grids—Issues, Challenges and Recent Developments. In Smart Cities; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 177–205.
19. El-Batawy, S.; Morsi, W.G. Optimal Design of Community Battery Energy Storage Systems with Prosumers Owning Electric Vehicles. IEEE Trans. Ind. Inform. 2017.
20. Al-Kuwari, A.M.A.; Ortega-Sanchez, C.; Sharif, A.; Potdar, V. User friendly smart home infrastructure: BeeHouse. In Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 257–262.
21. European Commission. SmartGrids European Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, Brussels, 2006.
22. D. Pudjianto, C. Ramsay, "The virtual power plant: enabling integration of distributed generation and demand". FENIX Bulletin, 2008; vol. 2, pp. 10–16.
23. C. Chunwu, L. Na, "International experience and Enlightenment of virtual power plant development". Power grid Technology, 2013; vol. 37, no. 8, pp. 2258–2263.
24. Y. Renfeng, A. Qian, "Virtual power plant technology discussion", Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2014; vol. 63, no. 9, pp. 33–38.
25. H. Shahzeb,\*, M. Hafiz, A. Zenab, N. Haq, DSM Using Fish Swarm Optimization and Harmony Search Algorithm Using HEMS in Smart Grid. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2018.
26. Morstyn, T.; Farrell, N.; Darby, S.J.; McCulloch, M.D. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. Nat. Energy 2018; pp. 94–101.
27. Rekik, M.; Chtourou, Z.; Mitton, N.; Atieh, A. Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid. Sustain. Cities Soc. 2016; pp. 39–48.

Надійшла (received) 19.12.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кулапін Олександр Валентинович (Кулапин Александр Валентинович, Kulapin Olexander Valentinovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9283-6910; e-mail: [sasha.kulapin@gmail.com](mailto:sasha.kulapin@gmail.com)

**Махотіло Костянтин Володимирович (Махотило Константин Владимирович, Makhotilo Kostiantyn Volodymyrovych)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7081-071X; e-mail: [kvmahotilo@gmail.com](mailto:kvmahotilo@gmail.com)



УДК 621.311

*С. Г. ЛОМОВ***ТОПОЛОГИЯ ЭКРАННЫХ ТОКОВ В СИЛОВЫХ 3-ФАЗНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ**

Рассмотрены физические причины токов в экранах силовых 3-фазных кабельных линий при двухстороннем заземлении экранов. На основе теории электромагнитного поля предложена уточненная методика расчета «продольных» токов в экранах кабельных линий плоскостной укладки и проложенной «треугольником».

**Ключевые слова:** силовая 3-фазная кабельная линия, кабельная линия плоскостной укладки, кабельная линия проложенная «треугольником», электромагнитный экран, «продольные» токи.

*С. Г. ЛОМОВ***ТОПОЛОГІЯ ЕКРАННИХ СТРУМІВ В СИЛОВИХ 3-ФАЗНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ**

Розглянуто фізичні причини струмів в екранах силових 3-фазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів. На основі теорії електромагнітного поля запропонована уточнена методика розрахунку «поздовжніх» струмів в екранах кабельних ліній площинного укладання і прокладеної «трикутником».

**Ключові слова:** силовая 3-фазная кабельная линия, кабельная линия площинного прокладання, кабельная линия прокладена «трикутником», електромагнітний екран, «поздовжні» струми.

*S. G. LOMOV***TOPOLOGY OF SHIELD CURRENTS IN POWER 3-PHASE CABLE LINE**

The physical causes of currents in the shields of the power 3-phase cable lines with two-sided grounding of the shields are considered. Based on the theory of electromagnetic fields, an improved methodology for calculation «longitudinal» currents in shields of flat cable line and cable line laid by «triangle» is proposed.

**Keywords:** power 3-phase cable line, flat lay cable line, cable line laid by «triangle», electromagnetic shield, «longitudinal» currents.

**Введение** Основными характеристиками силовых кабельных линий (КЛ) являются мощность такой линии и удельный расход активных материалов. И хотя мощность современных КЛ подошла к гигаваттной отметке, реальные плотности рабочих токов в эксплуатации зачастую не превышают 1 А/мм<sup>2</sup> даже для медных жил. Такое положение дел для современного энергетического оборудования ни с технической ни с экономической точек зрения не должно признаваться нормальным.

Ограничивает мощность КЛ теплоотвод от кабелей этой линии. При этом основными являются два фактора. Прежде всего, это тепловые сопротивления изоляции кабеля и грунта, причем, последнее является преобладающим и весьма нестабильным. Вторым фактором являются тепловые потери в медно-проволочном электромагнитном экране (ЭМЭ). Эти потери играют роль «теплого затвора» на пути отвода теплового потока от токопроводящих жил КЛ. Очевидно, что правильная оценка и уменьшение этих потерь представляют актуальную задачу.

**Цель работы:** Целью данной статьи является рассмотрение с позиций теории электромагнитного поля механизма возникновения э.д.с и «продольных» токов при двустороннем заземлении ЭМЭ силовых трехфазных КЛ, как плоскостной укладки, так и проложенных «треугольником», и их количественная

оценка с целью уточнения некоторых общепринятых в отраслевой литературе подходов к расчету этих токов.

**Материалы исследования:** Потери в ЭМЭ рассматриваемых КЛ вызываются так называемыми «продольными» токами и вихревыми токами, физические причины возникновения которых различны. Механизм возникновения потерь от вихревых токов и их количественный анализ для сплошных ЭМЭ (оболочек) приводятся в фундаментальной литературе по технической электродинамике, например в [2].

В данной статье рассмотрены механизм возникновения и количественная оценка только «продольных» токов для кабельных линий плоскостной укладки и проложенных «треугольником». При плоскостной укладке межосевое расстояние между кабелями КЛ составляет 0,16 м, а в при прокладке «треугольником» кабели соприкасаются своими внешними оболочками.

**а) расчет «продольных» токов в ЭМЭ КЛ плоскостной укладки.**

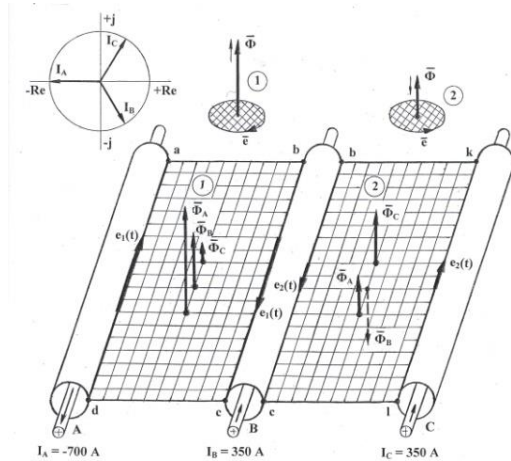


Рисунок 1 – Магнитное потокоцепление в КЛ плоскостной укладке

Замкнутые между собой ЭМЭ на концах КЛ образуют контуры 1 и 2 (рис.1), в которых в соответствии с законом электромагнитной индукции магнитные составляющие электромагнитных волн (магнитные потоки  $\Phi_A(t)$ ,  $\Phi_B(t)$ ,  $\Phi_C(t)$ ), вызванные фазными токами  $I_A(t)$ ,  $I_B(t)$  и  $I_C(t)$ , создают э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ . На рис.1 для определенного момента поворота симметричной трехфазной системы токов  $I_A(t_i)$ ,  $I_B(t_i)$  и  $I_C(t_i)$  показаны действительные действующие значения э.д.с.  $e_1(t_i)$  и  $e_2(t_i)$  в контурах 1 и 2 и действительные максимальные значения магнитных потоков  $\Phi_A(t_i)$ ,  $\Phi_B(t_i)$  и  $\Phi_C(t_i)$ . Направление э.д.с. в контурах 1 и 2 представляет собой левовинтовую или правовинтовую систему и определяется в соответствии с динамикой изменения суммарного значения магнитных потоков в данных контурах [9]. Для расчетов необходимо задаться начальным моментом и системой направлений составляющих магнитных потоков через контуры 1 и 2 в соответствии с принятым расположением фаз в КЛ (рис.1). Как это обычно принято, в начальный момент вектор тока фазы А совпадает с действительной осью при вращении симметричной трехфазной системы токов против движения часовой стрелки, то есть мгновенные действительные значения фазных токов в КЛ определяются

$$\begin{aligned} i_A &= I \cdot \cos \omega t \\ i_B &= I \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ i_C &= I \cdot \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

За положительное направление магнитных потоков, пересекающих плоскости контуров 1 и 2, принято направление concentрических силовых линий этих потоков, создающих с вызвавшими их токами в жилах КЛ, правовинтовую систему. Мгновенное действительное максимальное значение

магнитного потока  $\Phi_A^1(t)$ , вызванного током  $i_A(t)$  в фазе А и пересекающего плоскость контура 1, на один метр длины КЛ определяется как

$$\begin{aligned} \Phi_A^1(t) &= \int_{r_3}^{3r_3+ab} B_A^1(t, r) dr = \int_{r_3}^{3r_3+ab} \mu_0 H_A^1(t, r) dr = \\ &= \frac{\mu_0 \sqrt{2} I \cos \omega t}{2\pi} \int_{r_3}^{3r_3+ab} \frac{1}{r} dr = A_1 \cos \omega t, \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $r_3$  - внешний радиус ЭМЭ, м;

$$A_1 = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-7} I \cdot \ln \frac{S+r_3}{r_3}, \frac{B\delta}{m}; S=ab+2r_3$$

Аналогично определяется мгновенное действительное максимальное значение потока  $\Phi_A^2(t)$  от тока  $i_A(t)$  в фазе А, пересекающего плоскость контура 2, на один метр длины КЛ.

$$\Phi_A^2(t) = B_1 \cos \omega t, \text{ Вб/м}, \quad (3)$$

где:  $B_1 = 2 \cdot 2^{0.5} \cdot 10^{-7} \cdot I \cdot \ln[(2S+r_3)/(S+r_3)]$

Мгновенные действительные максимальные значения суммарных магнитных потоков, связанных с контурами 1 и 2, определяются как

$$\begin{aligned} \sum \Phi^1(t) &= A_1 \cos \omega t - A_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) - \\ &- B_1 \cos(\omega t + 4\pi/3), \text{ Вб/м} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum \Phi^2(t) &= B_1 \cos \omega t + A_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) - \\ &- A_1 \cos(\omega t + 4\pi/3), \text{ Вб/м} \end{aligned} \quad (5)$$

По закону электромагнитной индукции в контурах 1 и 2 наводятся э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ , которые являются основной причиной протекания «продольных» токов в ЭМЭ рассматриваемой топологии КЛ. Анализируя закон электромагнитной индукции (экспериментальный закон Фарадея)  $e = -\partial\Phi/\partial t$  и его математическое обобщение – второе уравнение Максвелла, сформулированное в дифференциальной форме как  $\text{rot} \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$  можно сделать вывод, что при синусоидальном изменении суммарных магнитных потоков  $\Sigma\Phi^1(t)$  и  $\Sigma\Phi^2(t)$  через контуры 1 и 2 мгновенные значения э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  также представляют собой синусоиды, опережающие соответствующие (вызвавшие их) суммарные магнитные потоки на угол  $\pi/2$ . Величины этих э.д.с. определяются следующим образом [1]. В общем случае при заданной форме кривой  $\Phi=f(t)$  изменения потокоцепления с контуром соответствующую кривую индуктированной в контуре э.д.с.  $e = -\partial\Phi/\partial t$  можно получить дифференцируя кривую

потокосцепления. При введении понятия о коэффициенте формы  $k_\Phi$  кривой потокосцепления получается весьма важное выражение для действующего значения э.д.с., индуцируемой в контуре при периодическом изменении потокосцепления с контуром. Обозначив величины максимального и минимального потокосцепления через  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  для среднего значения индуцированной э.д.с.  $E_{\text{ср}}$  имеем

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \cdot dt = \int_0^{T/2} \left( -\frac{d\Phi}{dt} \right) dt =$$

$$= -\frac{2}{T} \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} d\Phi = 2f(\Phi_{\max} - \Phi_{\min}), \quad \frac{B}{M} \quad (6)$$

Так как среднее значение вычисляется за положительную полуволну, то есть от  $\Phi = \Phi_{\max}$ , когда  $e(t)$  возрастая проходит через ноль до  $\Phi = \Phi_{\min}$ . Если кривая магнитного потокосцепления симметрична и  $\Phi_{\min} = -\Phi_{\max}$ , то для действующего значения  $E$  э.д.с.  $e(t)$  получается  $E = k_\Phi \cdot E_{\text{ср}}$ . Для синусоиды  $k_\Phi = 1,11$ . Таким образом, при синусоидальном изменении потокосцепления  $\Phi = f(t)$  для одновиткового контура получаем

$$E = 4fk_\Phi \Phi_{\max} = 4,44 f \Phi_{\max}, \quad \frac{B}{M} \quad (7)$$

Учитывая в нашем случае, что (7) дает действительное действующее значение индуцированной в контуре э.д.с., можно записать формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  в контурах 1 и 2 (рис1).

В дальнейшем во всех расчетных формулах под значениями э.д.с.  $e(t)$  и токов  $i(t)$  понимаются действительные действующие значения этих величин.

Таким образом, э.д.с., индуцируемые в контурах 1 и 2, определяются как

$$e_1(t) = 2ACos(\omega t + \pi/2) -$$

$$- 2ACos(\omega t + 7\pi/6) -$$

$$- 2BCos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (8)$$

$$e_2(t) = 2BCos(\omega t + \pi/2) +$$

$$+ 2ACos(\omega t + 7\pi/6) -$$

$$- 2ACos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (9)$$

$$A = 5,24 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln \frac{S + r_3}{r_3}, \quad \frac{B}{M} \quad (10)$$

$$B = 5,24 \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln \frac{2S + r_3}{S + r_3}, \quad \frac{B}{M} \quad (11)$$

Зная величины э.д.с. в контурах 1 и 2 можно получить формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений  $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$  и  $e_C(t)$ , наведенных в электромагнитных экранах каждого кабеля КЛ на один метр длины ЭМЭ. Эти формулы получены при учете следующих физических соображений:

- направление э.д.с.  $e_C(t)$  противоположно направлению э.д.с.  $e_A(t)$  при одинаковых направлениях э.д.с.  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  в контурах 1 и 2;

- в ЭМЭ среднего кабеля КЛ э.д.с.  $e_B(t)$  равна алгебраической полуразности значений, полученных по (8,9);

- э.д.с.  $e_A(t)$  и  $e_C(t)$  на один метр длины ЭМЭ крайних кабелей в КЛ равны половине значений  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ .

После преобразований и упрощений получаем значения э.д.с., наведенные на один метр длины ЭМЭ в каждом кабеле КЛ.

$$e_A(t) = 0,5e_1(t) = ACos(\omega t + \pi/2) -$$

$$- ACos(\omega t + 7\pi/6) -$$

$$- BCos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (12)$$

$$e_B(t) = [e_2(t) - e_1(t)]/2 =$$

$$= (B - A) \cdot Cos(\omega t + \pi/2) +$$

$$+ 2ACos(\omega t + 7\pi/6) +$$

$$+ (B - A) \cdot Cos(\omega t + 11\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (13)$$

$$e_C(t) = -0,5e_2(t) = ACos(\omega t + 11\pi/6) -$$

$$- BCos(\omega t + \pi/2) -$$

$$- ACos(\omega t + 7\pi/6), \quad \frac{B}{M} \quad (14)$$

Основным допущением при расчете «продольных» токов в ЭМЭ является представление КЛ плоскостной укладкой, как линии электрически симметричной.

При этом допущении дальнейшие расчеты токов в ЭМЭ мы можем вести не с различными векторами полных фазных проводимостей  $Y_A$ ,  $Y_B$ , и  $Y_C$ , а с одинаковым для всех фаз в симметричной КЛ модулем комплексной полной проводимости  $|Y|$ . Учитывая (15-17) и принятое допущение, принимается, что активные сопротивления каждого из ЭМЭ в КЛ равны  $R_3$ , Ом/м, а реактивные (индуктивные) сопротивления  $x_3$  также равны и определяются как

$$x_3 = \omega(L - M_{AB}), \quad \text{Ом/м} \quad (15)$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} [\ln(2/r_3) - 1], \quad \text{Гн/м} \quad (16)$$

$$M_{AB} = 2 \cdot 10^{-7} [\ln(2/S) - 1], \quad \text{Гн/м} \quad (17)$$

$r_3$  – внешний радиус ЭМЭ, м;

$S$  – межосевое расстояние КЛ, м.

При принятых равенствах во всех экранах  $R_3$  и  $x_3$  одинаковым является и угол  $\phi$ , на который в каждом ЭМЭ «продольный» ток отстает от вызвавшей его э.д.с. Этот угол определяется как  $\phi = \arctg(x_3 / R_3)$ . Принятые допущения незначительно изменяют амплитудные и фазовые значения «продольных» токов и э.д.с. в экранах КЛ, но намного упрощают нижеприведенные расчеты «продольных» токов.

По предложенной упрощенной расчетной схеме определение для нашей КЛ мгновенных действительных действующих значений «продольных» токов представляет собой простую задачу, решаемую методом

наложения с помощью основных законов Кирхгофа в виде

$$i_A(t) = e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_B(t) \cdot |Y| - 0,5e_C(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (18)$$

$$i_B(t) = e_B(t) \cdot |Y| - 0,5e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_C(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (19)$$

$$i_C(t) = e_C(t) \cdot |Y| - 0,5e_A(t) \cdot |Y| - 0,5e_B(t) \cdot |Y|, \quad A \quad (20)$$

$$\vec{Z} = R_{\Sigma} - jx_{\Sigma}, \quad Ом/м$$

$$\sum \vec{Z} = \vec{Z} + \vec{Z}/2, \quad Ом/м$$

$$\vec{Y} = 1/\sum \vec{Z}, \quad См \cdot м$$

$|Y| = 1/[(ReY)^2 + (ImY)^2]^{0,5}$ , См·м  
 $R_{\Sigma}$  для ЭМЭ сечением 120 мм<sup>2</sup> при 70°C составляет  $18 \cdot 10^{-5}$  Ом/м. С учетом (12-14) после преобразования и упрощения получаем мгновенные действительные действующие значения «продольных» токов в ЭМЭ каждой фазы КЛ плоскостной укладки как

$$i_A(t) = |Y| \cdot ((1,5A \cdot \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi) - 1,5A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) - 1,5B \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi)), \quad A \quad (21)$$

$$i_B(t) = |Y| \cdot (((3A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) + (1,5B - 1,5A) \cdot (\cos \omega t + \pi/2 - \varphi) + \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi))), \quad A \quad (22)$$

$$i_C(t) = |Y| \cdot ((1,5A \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6 - \varphi) - 1,5A \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6 - \varphi) - 1,5B \cdot \cos(\omega t + \pi/2 - \varphi)), \quad A \quad (23)$$

**б) расчет «продольных» токов в ЭМЭ КЛ, проложенной «треугольником», при расположении кабелей встык внешними оболочками.**

Такая КЛ является электрически симметричной, что позволяет проводить расчеты только для одного ЭМЭ любой фазы. В экранях остальных фаз значения э.д.с. и токов будут равны по величине и сдвинуты на 120 электрических градусов.

Необходимо учитывать, что геометрия магнитного потокосцепления внешних магнитных полей с ЭМЭ кабеля конкретной фазы трехфазной КЛ, проложенной «треугольником», сложнее, чем для КЛ плоскостной укладки из-за эффекта «самоэкранирования» этих полей токопроводящими жилами соседних фаз. Расчет такого экранирования круглыми ТПЖ достаточно сложен и при его расчете было сделано допущение, что ТПЖ кабеля имеет форму плоской жилы такого же сечения, что и круглая ТПЖ, с шириной, равной её диаметру. С расчетом экранирования внешнего магнитного поля такой плоской жилой можно познакомиться в [2]. Для рассматриваемого сечения ТПЖ кабеля расчет показал, что приближенно можно считать, что

внешнее магнитное поле от соседних ТПЖ кабеля не проходит в ЭМЭ через рассматриваемую ТПЖ.

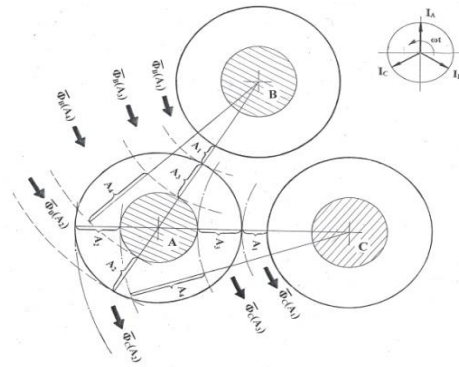


Рисунок 2 – Магнитное потокосцепление в КЛ, проложенной «треугольником»

На рис. 2 показана геометрия магнитного потокосцепления с ЭМЭ кабеля фазы А для начального момента времени (действительное значение рабочего тока в фазе А имеет максимальное значение). Учитывая вышеприведенные выводы, получаем для данного типа КЛ следующие формулы для расчета мгновенных действительных действующих значений э.д.с. в ЭМЭ всех фаз

$$e_A(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6) + C_2 \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6)), \quad B/м \quad (24)$$

$$e_B(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + 11\pi/6) + C_2 \cdot \cos(\omega t + \pi/2)), \quad B/м \quad (25)$$

$$e_C(t) = I \cdot ((C_1 \cdot \cos(\omega t + \pi/2) + C_2 \cdot \cos(\omega t + 7\pi/6)), \quad B/м \quad (26)$$

$$C_1 = 2A_2 + 2A_3 + A_4 - A_1, \quad B/м \quad (27)$$

$$C_2 = A_1 + 2A_2 + 2A_3, \quad B/м \quad (28)$$

$$A_1 = k \cdot f \cdot \ln \frac{r_{\Sigma} + 2\Delta_2}{r_{\Sigma}}, \quad B/м \quad (29)$$

$$A_2 = k \cdot f \cdot \ln \frac{3R_K - \Delta_2}{3R_K - \Delta_2 - \Delta_1}, \quad B/м \quad (30)$$

$$A_3 = k \cdot f \cdot \ln \frac{r_{\Sigma} + \Delta_2 + \Delta_1}{r_{\Sigma}}, \quad B/м \quad (31)$$

$$A_4 = k \cdot f \cdot \ln \frac{3R_K - \Delta_2 - \Delta_1}{R_K + \Delta_2 + \Delta_1}, \quad B/м \quad (32)$$

$$\text{где: } k = 5,24 \cdot 10^{-7}, \quad B/А \cdot м \cdot Гц$$

$R_K$  – внешний радиус кабеля, м;  $\Delta_1$  – толщина основной электрической изоляции кабеля с учетом толщин ЭМЭ, двух слоев электрических полупроводящих экранов, слоя водонабухающих волокнистых материалов и слоя алюмополимерной ленты (если применяется), м;  $\Delta_2$  – толщина внешней защитной оболочки кабеля, м.

Расчетная схема и методика расчета «продольных» токов в экранях КЛ, проложенной

«треугольником», аналогичны тем, что приняты при расчетах таких токов в КЛ плоскостной укладки с учетом того, что при расчете модуля полной проводимости  $|Y|$  ЭМЭ используется величина межосевого расстояния  $S$ , равная 0,08 м, а не величина  $S$ , принятая в расчетах для КЛ плоскостной укладки  $S=0,16$  м.

Таким образом, мгновенные действительные действующие значения «продольных» токов, протекающих в электромагнитных экранах каждой из фаз КЛ, проложенной «треугольником», определяются как

$$i_A = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2 / 2) \cos(\omega t + 7\pi / 6) + (C_2 - C_1 / 2) \cos(\omega t + 11\pi / 6) - ((C_1 + C_2) / 2) \cos(\omega t + \pi / 2))), A \quad (33)$$

$$i_B(t) = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2 / 2) \cos(\omega t + 11\pi / 6) + (C_2 - C_1 / 2) \cos(\omega t + \pi / 2) - ((C_1 + C_2) / 2) \cos(\omega t + 7\pi)), A \quad (34)$$

$$i_C(t) = I \cdot |Y| \cdot (((C_1 - C_2 / 2) \cos(\omega t + \pi / 2) + (C_2 - C_1 / 2) \cos(\omega t + 7\pi / 6) - ((C_1 + C_2) / 2) \cos(\omega t + 11\pi / 6))), A \quad (35)$$

Необходимо отметить, что расчет этих токов более точен в сравнении с аналогичным расчетом для КЛ плоскостной укладки, так как КЛ, проложенная «треугольником», является электрически симметричной и вследствие этого активные и индуктивные сопротивления экранов всех кабелей КЛ соответственно одинаковы.

Для расчетов был принят кабель марки АПВЭГАП-1×630/120-64/110 при действующем значении фазного рабочего тока 700 А с двухсторонним соединением и заземлением электромагнитных экранов в КЛ.

Косвенной проверкой формул (12-14, 21-26, 32-35) является то, что в любой момент времени суммы э.д.с.  $e(t)$  и «продольных» токов  $i(t)$  в ЭМЭ всех трех фаз КЛ равны нулю, что и происходит при выполнении полного цикла транспозиции экранов. Анализ этих формул позволяет получить величины действующих э.д.с.  $E_{\Sigma}$  и «продольных» токов  $I_{\Sigma}$  в ЭМЭ двух типов КЛ.

Для среднего кабеля КЛ плоскостной укладки действующие величины наведенной э.д.с.  $E_{\Sigma m}$  и «продольного» тока  $I_{\Sigma m}$  при двухстороннем соединении экранов между собой соответственно равны

$$E_{\Sigma m} = k_1 \cdot I \cdot (3 \cdot \ln((S + r_3) / r_3) - \ln((2S + r_3) / (S - r_3))), B / M \quad (36)$$

$$I_{\Sigma m} = k_1 \cdot I \cdot |Y| \cdot (4,5 \cdot \ln((S + r_3) / r_3) - 1,5 \cdot \ln((2S + r_3) / (S - r_3))), A \quad (37)$$

где:  $k_1 = 2,62 \cdot 10^{-5}$ ,  $B / A \cdot M$

Для крайних кабелей КЛ плоскостной укладки эти величины равны

$$E_{\Sigma} = k_1 \cdot I \cdot (1,71 \cdot \ln((S + r_3) / r_3) + 0,172 \cdot \ln((2S + r_3) / (S - r_3))), B / M \quad (38)$$

$$I_{\Sigma} = k_1 \cdot I \cdot |Y| \cdot (2,58 \cdot \ln((S + r_3) / r_3) + 0,27 \cdot \ln((2S + r_3) / (S - r_3))), A \quad (39)$$

Для КЛ, проложенной «треугольником», действующие величины наведенной э.д.с.  $E_{\Sigma}$  и «продольного» тока  $I_{\Sigma}$  одинаковы для всех ЭМЭ кабелей КЛ и соответственно равны

$$E_{\Sigma} = k_1 I (2 \ln((3R_K - \Delta_2) / (3R_K - \Delta_{\Sigma})) + 2 \ln((r_3 + \Delta_{\Sigma}) / r_3)) - k_1 I (0,15 \ln((r_3 + 2\Delta_2) / r_3) - 0,6 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma}) / (R_K + \Delta_{\Sigma}))) B / M \quad (40)$$

где:  $\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + \Delta_2$ ,  $M$

$$I_{\Sigma} = k_1 I |Y| (3 \ln((3R_K - \Delta_2) / (3R_K - \Delta_{\Sigma})) + 3 \ln((r_3 + \Delta_{\Sigma}) / r_3)) + k_1 I |Y| (0,5 \ln((r_3 + 2\Delta_2) / r_3) + 0,5 \ln((3R_K - \Delta_{\Sigma}) / (R_K + \Delta_{\Sigma}))), A \quad (41)$$

На рисунке 3а,б представлены векторные диаграммы действующих значений э.д.с. и «продольных» токов в электромагнитных экранах двух рассмотренных типов КЛ.

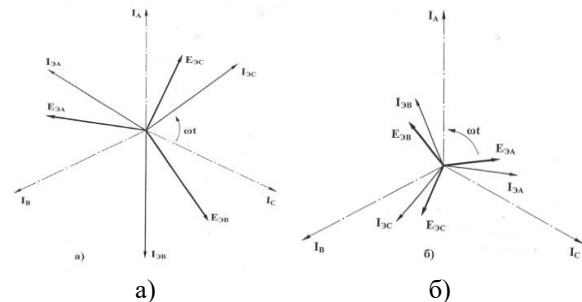


Рисунок 3 – Векторные диаграммы э.д.с. и  $E_{\Sigma}$  «продольных» токов  $I_{\Sigma}$  в ЭМЭ КЛ:  
а – КЛ плоскостной укладки,  
б – КЛ, проложенная «треугольником»

**Выводы:** В качестве вывода для данной статьи в таблице приведены значения э.д.с. и токов в ЭМЭ двух типов КЛ, которые рассчитаны по предложенной в статье методике и по методикам, предложенным в нескольких авторитетных нормативных и литературных источниках. Отличие полученных результатов по мнению автора подтверждает актуальность статьи и практическую ценность представленных результатов.

Таблица 1 – Э.д.с и токи в экране кабеля

Лит.	Е <sub>э</sub> и I <sub>э</sub> в ЭМЭ кабеля АП <sub>в</sub> Э <sub>г</sub> ДП-1×630/120-64/100 при действующей величине фазного тока I=700 А					
	КЛ плоскостной укладки при S=0,16 м				КЛ, пролож. «Δ» при S=0,08 м	
	Е <sub>э</sub> , мВ/м		I <sub>э</sub> , А		Е <sub>э</sub> , мВ/м	I <sub>э</sub> , А
средн. кабель	крайн. кабель	средн. кабель	крайн. кабель			
[3]	76		385		36	385
[4]	118		нет расчета		83	н/р
[5]	67		365	395-430	36	328
[6]	1340	1940	нет расчета		364	20
Предл.	74,5	58	370	284	31	163

## Список литературы

1. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, в 3-х томах. Теория электромагнитного поля. –М.: ГЭИ, 1959, 232 с.
2. Туровский Я. Техническая электродинамика. Пер. с польского.-М.: «Энергия», 1974, 488 с.
3. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Стандарт организации «ФСК ЕЭС», Россия, СТО 56947007 29. 060. 20. 103 - 2011 .
4. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ. Под ред. акад. НАН Украины А.К. Шидловского и к.т.н. В.М. Золотарева. Хариков, «Майдан», 2006, 62 с.
5. Основы кабельной техники. Под ред. Привезенцева В.А. –М.: «Энергия», 1975, 472 с.
6. Белорусов Н.И. Электрические кабели и провода. –М.: «Энергия», 1971, 512 с.

7. Основы кабельной техники. Под ред. И.Б. Пешкова. –М.: Издат. центр «Академия», 2006, 432 с.
8. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. –М.: Энергоатомиздат, 1984, 368 с.
9. Боев В.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебное пособие. Киев, ИСЮ, 1994, 274 с.

## References (transliterated)

1. Neyman L.R., Kalantarov P.L. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki, v 3-kh tomakh. Teoriya elektromagnitnogo polya. - M.: GEI, 1959, 232
2. Turovskiy A. Tekhnicheskaya elektrodinamika. Per. s pol'skogo. - M.: "Energiya", 1974, 488 s.
3. Silovyye kabeli. Metodika rascheta ustroystv zazemleniya ekranov, zashchity ot perenapryazheniy izolyatsii silovyykh kabeley na napryazheniye 110 - 500 kV s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena. Standart organizatsii "FSK YEES", Rossiya, STO 56947007 29. 060. 20. 103 - 2011.
4. Rukovodyashchiy tekhnicheskyy material po sooruzheniyu, ispytaniyam i ekspluatatsii kabel'nykh liniy s ispol'zovaniyem kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena na napryazheniye 64/110 kV. Pod red. akad. NAN Ukrainy A.K. Shidlovskogo i k.t.n. V.M. Zolotareva. Khar'kov, "Maydan", 2006,62s
5. Osnovy kabel'noy tekhniki. Pod red. Privezentseva V.A. - M.: "Energiya", 1975, 472 s.
6. Belorussov N.I. Elektricheskiye kabeli i provoda. - M.: "Energiya", 1971, 512 s.
7. Osnovy kabel'noy tekhniki. Pod red. I.B. Peshkova. - M.: Izdat. tsentr "Akademiya", 2006,432s.
8. Larina E.T. Silovyye kabeli i kabel'nyye linii. -M.: Energoatomizdat, 1984, 368 s.
9. Boyev V.M. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole. Uchebnoye posobiye. Kiyev, ISIO, 1994, 274 s.

Надійшло (received) 09.11.2019

## Сведения об авторах /Відомості про авторів/ About the Authors

**Ломов Сергей Георгиевич (Ломов Сергій Георгійович, Lomov Serhii)** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника», e-mail: [segelom47@gmail.ua](mailto:segelom47@gmail.ua), [sgl47@rambler.ru](mailto:sgl47@rambler.ru)

*А. А. МИРОШНИК, М. М. СИВЕНКО*

### МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ «SMARTGRID»

Предложена усовершенствованная система электроснабжения, на базе технологии «SMARTGRID». Проанализированы путем моделирования несколько вариаций интеллектуальной двунаправленной системы электроснабжения в различных режимах работы. Полученные результаты после моделирования в среде Matlab / Simulink / SymPowerSystems были занесены в сравнительную таблицу. Так же были проведены расчеты максимального КПД и уровня уменьшения потерь сети электроснабжения путем использования силового фильтра и генерации энергии солнечными электростанциями. Это позволит увеличить количество солнечных электростанций и в целом долю возобновляемых источников энергии в общем производстве электроэнергии Украины.

**Ключові слова:** сеть электроснабжения, технология, smart grid, фотоэлектрические станции, энергетика, моделирование, модернизация, солнечные панели

*О.О. МИРОШНИК, М. М. СИВЕНКО*

### МОДЕРНИЗАЦІЯ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ «SMARTGRID»

Запропоновано удосконалену систему електропостачання, на базі технології «SMARTGRID». Проаналізовано шляхом моделювання кілька варіацій інтелектуальної двоспрямованої системи електропостачання в різних режимах роботи. Отримані результати після моделювання в середовищі Matlab / Simulink / SymPowerSystems були занесені в порівняльну таблицю. Так само були проведені розрахунки максимального ККД та рівня зменшення втрат мережі електропостачання шляхом використання силового фільтра і генерації енергії сонячними електростанціями. Це дозволить збільшити кількість сонячних електростанцій і в цілому частку поновлюваних джерел енергії в загальному виробництві електроенергії України.

**Ключевые слова:** сеть электроснабжения, технология, smart grid, фотоэлектрические станции, энергетика, моделирование, модернизация, солнечные панели

*O. O. MIROSHNYK, M. M. SYVENKO*

### MODERNIZATION OF ELECTRICITY SUPPLY NETWORKS USING «SMARTGRID» TECHNOLOGY

An advanced power supply system based on SMARTGRID technology is proposed. Several variations of the intelligent bi-directional power supply system in different operating modes are analyzed by simulation. The results obtained after modeling in the Matlab / Simulink / SymPowerSystems environment were recorded in a comparative table. The calculations of the maximum efficiency and the level of reduction of losses of the power supply network by using a power filter and the generation of energy by solar power plants were also carried out. This will increase the number of solar power plants and the overall share of renewable energy in Ukraine's total electricity production.

**Keywords:** power supply network, technology, smart grid, photoelectric stations, energy, modeling, modernization, solar panels

**Введение.** Изменение концепции развития современной энергетики обусловлена растущим интересом к возобновляемым источникам энергии. Наиболее быстрыми темпами среди маломощных распределенных возобновляемых источников энергии развиваются солнечные фотоэлектрические станции, работающие как автономно, так и могут быть интегрированы в промышленной сети, установленная мощность которых колеблется в диапазоне от нескольких киловатт до ста мегаватт. Для солнечных электростанций в общем производстве электроэнергии Украины составляет около 1%, хотя в соответствии с обязательствами перед Европейским энергетическим сообществом до 2020 года должна достигать 7%.

**Цель исследований.** Опытный анализ интеллектуальной системы электроснабжения с двунаправленным энергетическим потоком «SmartGrid».

**Основные материалы исследований.** Функционирование системы электроснабжения SmartGrid обусловлено режимами работы

промышленной сети, возобновляемых источников энергии и переменным графиком нагрузки. Поэтому на перед проектной стадии следует промоделировать работу интеллектуальной системы электроснабжения в рабочих режимах.

Для определения ежедневной облученности необходимо учитывать угол установки солнечных модулей и определить среднемесячное поступление солнечного излучения в кВт·ч/месяц.

Склонение Солнца (угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора) в средний день месяца, град:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360 \cdot (284 + n) / 365) = \\ = 23.45 \cdot \sin(360 \cdot (284 + 228) / 365) = 22.10^\circ, \quad (1)$$

где  $n$  – порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января (номер среднего расчетного дня для каждого месяца года).

Для остальных месяцев расчёт проводится аналогично и занесен в табл. 1, для наглядности данные

таблицы, с помощью программного обеспечения «MS Excel» перенесены на график (рис. 1).

Таблица 1 – Угол склонения Солнца по месяцам

МЕСЯЦ	ЯНВ	ФЕВ	МРТ	АПР	МАЙ	ИЮНЬ	ИЮЛЬ	АВГ	СЕНТ	ОКТ	НОЯ	ДЕК
δс, град	-21,27	-13,29	-2,82	9,41	18,79	23,31	21,52	13,78	2,22	-9,60	-19,00	-23,34



Рисунок 1 – Угол склонения Солнца по месяцам

Для обеспечения условий поглощения солнечной энергии солнечными панелями, его поглощающая поверхность должна быть ориентирована на юг с углом наклона  $\beta_{\text{опт}}$ , который будет равен:

$$\beta_{\text{опт}} = \varphi_p - \delta_c \quad (2)$$

де  $\varphi_p$  – широта местности, где рассматривается проектирование ФЭС (табл. 2).

Таблица 2 – Оптимальный угол установки фотоэлементов

МЕСЯЦ	ЯНВ	ФЕВ	МРТ	АПР	МАЙ	ИЮНЬ	ИЮЛЬ	АВГ	СЕНТ	ОКТ	НОЯ	ДЕК
$\beta_{\text{опт}}$ , град	26,73	34,71	45,8	57,41	66,76	71,31	69,52	61,78	50,22	38,4	29	24,66

Согласно рис. 2 оптимальным углом наклона солнечных батарей составит 45 градусов, что показывает аппроксимация на графике.

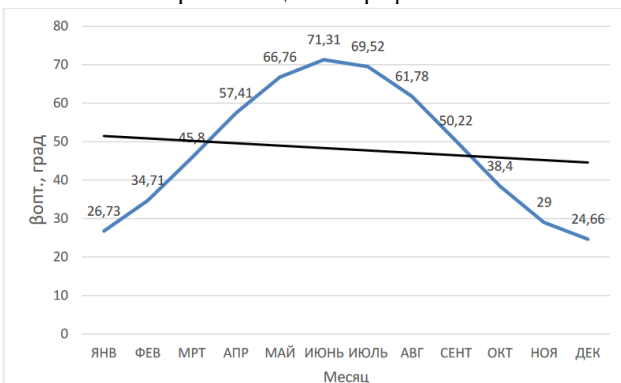


Рисунок 2 – Оптимальный угол установки фотоэлементов

В качестве объекта для моделирования рассмотрим локальную систему электроснабжения, которая представляет собой совокупность мелких домохозяйств, электроснабжение которых осуществляется от трансформаторной подстанции по магистральной схеме четырехжильным кабельной линией 0,4 кВ.

Отличительной особенностью такой традиционной системы электроснабжения является

однаправленность энергетического потока от сети к нагрузке. Установленная мощность нагрузок составляет может быть до 30 кВт. Предположим, что на некоторых домохозяйствах установлено распределены солнечные электростанции разной номинальной мощностью, подключаются по условиям «зеленого тарифа» для передачи избытка возобновляемой энергии к сети.

Модель состоит из трех блоков SolarStation, имитирующие распределены солнечные электростанции разной номинальной мощности, блока EnergyStorage, имитирующий системный накопитель, блоков Load, имитирующие линейные активно-реактивные и нелинейные нагрузки, и блоков PAF, имитирующие параллельные силовые активные фильтры.

Реализация SmartGrid осуществляется посредством установления специализированного силового оборудования, работа которого контролируется информационно-управляющей системе в соответствии с состоянием сети в текущий момент времени.

На равном удалении от распределенных солнечных электростанций устанавливается системный энергоёмкий накопитель, который предназначен для решения двух ключевых задач – выполнение функции резервного источника питания в автономных режимах работы системы и выравнивания графика нагрузки, то есть устранения суточных пиков и провалов в энергопотреблении.

Реализация указанных функций совместно с установкой силовых активных фильтров позволит минимизировать потери в линии и элементах системы электроснабжения. Результаты выполненных расчетов показали, что в зависимости от параметров системы теоретически возможно уменьшение мощности потерь находится в диапазоне от 2 до 15%. Если уровень уменьшения потерь будет больше потери в оборудовании, устанавливается, то реализация указанных мероприятий является энергетически обоснованной. Сложившаяся сетевая структура позволяет отдельно реализовать систему электропитания постоянного тока.

Системный накопитель энергии заряжается от распределенных солнечных электростанций, а в случае полного заряда включаются сетевые инверторы и возобновляемые источники отдают энергию в сеть переменного тока. В автономном режиме, когда автоматический выключатель в начале питающей линии переменного тока разомкнут, с помощью автономного инвертора формируется синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и электропитания нагрузок подключенных к SmartGrid осуществляется от системного энергоёмкого накопителя. К автономной сети постоянного тока могут подключаться соответствующие маломощные нагрузки или электромобили, как для подзарядки бортовых аккумуляторов и в качестве дополнительных резервных источников.

Многообразие режимов работы SmartGrid обеспечивается дополнительным информационным уровнем, на котором собирается информация о состоянии



каждого элемента системы и в соответствии с приоритетными алгоритмами формируются управляющие воздействия, обрабатываются силовыми полупроводниковыми преобразователями.

После моделирования в среде Matlab / Simulink / SymPowerSystems были получены данные о работе сети и занесены в сравнительной таблице. 3, где приведены сопоставления энергетических характеристик SmartGrid в различных режимах работы при неизменном нагрузке и заряженного системного накопителя.

Модель солнечного фотомодуля в среде Matlab создан с использованием стандартных блоков SolarCell библиотеки SimElectronics, воспроизводящих детализированную математическую модель солнечного элемента, которая учитывает особенности его электрических и тепловых характеристик.

В Matlab-модели реализовано моно-кристаллический солнечный фотомодуль CHN200-72M с характеристиками: максимальная мощность -  $P_m = 200$  Вт; количество элементов на модуль -  $N = 72$ ; напряжение холостого хода  $U_{oc} = 45$  В; ток короткого замыкания -  $I_{sc} = 5,8$  А; напряжение в точке отбора максимальной мощности -  $U_{mp} = 38,8$  В; ток в точке отбора максимальной мощности -  $I_{mp} = 5,15$  А; максимальное напряжение системы постоянного тока -  $U_{DCmax} = 1000$  В; температура при нормальных условиях -  $NOCT = 45 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; температурный коэффициент напряжения холостого хода -  $K_{oc} = -0,34\% / ^\circ\text{C}$ ; температурный коэффициент тока короткого замыкания -  $K_{sc} = +0,66\% / ^\circ\text{C}$ ; температурный коэффициент максимальной мощности -  $K_{Pm} = -0,44\% / ^\circ\text{C}$ ; КПД - 18,31%.

Таблица 3 - Сопоставление энергетических характеристик SmartGrid в различных режимах работы

Режим работы	Сеть без SG	Сеть з SG	Сеть с SG без ФЕС	Сеть с SG без САФ	Автономный без САФ
$P_s$ , Вт	20271	5976	19301	7070	0
$Q_s$ , Вт	13103	-34,5	25,7	15101	0
$P_{ES}$ , Вт	0	0	0	0	25,032
$Q_{ES}$ , ВАР	0	0	0	0	-12313
$P_{LS}$ , Вт	15964	19964	16085	19882	23338
$Q_{LS}$ , ВАР	13101	16365	13205	16299	19139
$P_{st1}$ , Вт	0	9001	0	8990	0
$P_{st2}$ , Вт	0	3789	0	3968	0
$P_{st3}$ , Вт	0	1906	0	1907	0
$\Delta P$ , Вт	4307	707,4	3216	2054	1643
$\eta$	0,7875	0,9685	0,8334	0,9064	0,9343

Сопоставление данных таблицы предоставляет наглядное представление об уменьшении уровня потерь при введении SmartGrid. Резерв повышения КПД путем введения SmartGrid, имеет две составляющие, первая из которых связана с нормализацией режима электропотребления, а вторая - с оптимизацией структуры сети, когда сокращаются расстояния между источниками энергии и потребителями и уменьшается плотность сетевого энергетического потока и магистральной линии. Причем вторая составляющая вносит более существенный вклад в увеличение КПД системы электроснабжения. По принятым в модели параметрам участков питающей линии применения силового активного фильтра приводит к увеличению КПД практически на 4,6%, а перераспределение энергетических потоков, за счет генерации энергии солнечными электростанциями, приводит к увеличению КПД на 11,9%. Таким образом общесистемные потери в исследуемой SmartGrid уменьшаются в 6 раз, а КПД системы электроснабжения повышается на 16,5%, при снижении среднесуточного потребления электроэнергии от сети питания в летний период на 70%.

**Выводы.** 1. Моделированием в пакете Matlab локализованной системы электроснабжения с конкретными параметрами показало, что реализация концепции SmartGrid с использованием технической базы силовой электроники, энергоёмких накопителей, и возобновляемых источников энергии, например, распределённых солнечных электростанций, позволяет решить несколько ключевых задач: повысить надёжность электроснабжения; улучшить качественные показатели электроэнергии; минимизировать потери в элементах системы; реализовать гибкие режимы с выравниванием пиковых нагрузок; реализовать независимую систему электропитания постоянного тока; снизить расходы на оплату электроэнергии.

2. Полученные аналитические соотношения для расчета максимально возможного и реального КПД трехфазной трехпроводной сети с симметричными синусоидальными напряжениями источника в прямом, обратном и двунаправленном потоках, а также соотношение для определения максимального значения коэффициента возврата энергии. Проверка полученных соотношений показала, что соотношение для расчета максимально возможного КПД сети не дают погрешности, погрешность расчета реального КПД не превышает 1%.

3. КПД трехфазной трехпроводной сети с симметричными синусоидальными источниками напряжения в двунаправленном потоке будет зависеть от коэффициента передачи энергии, коэффициента скорости передачи энергии, максимально возможного КПД в прямом однонаправленном потоке, коэффициентов дополнительных потерю в прямом и обратном потоках, определяются средне-квадратичными значениями реактивной мощности и мощности, обусловленной пульсациями мгновенной активной мощности.

4. Результаты компьютерного моделирования трехфазной трехпроводной сети с двунаправленным

потоком подтвердили тезис о том, что КПД такой системы может быть незначительным, даже при высоких значениях КПД, в отдельно взятых прямом и обратном потоках. Например, для сети с  $k_{SC} = 50$  и коэффициенте возврата  $k_E = 0.5$ , максимально возможные КПД в прямом и обратном потоках  $\eta_{max} \rightarrow = 0.9796$ ,  $\eta_{max} \leftarrow = 0.9899$ , а максимально возможный КПД в двунаправленном потоке  $\eta_{max} \leftrightarrow = 0.949$ . Если в сети находятся дополнительные потери, то реальный КПД в двоспрянованому потоке будет еще ниже.

5. Резерв повышения КПД путем реализации SmartGrid, имеет две составляющие, первая из которых связана с нормализацией режима электропотребления, а вторая - с оптимизацией структуры сети, когда сокращаются расстояния между источниками энергии и потребителями и уменьшается плотность сетевого энергетического потока в магистральной линии. Причем вторая составляющая вносит более существенный вклад в увеличение КПД системы электроснабжения.

#### Список литературы

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.10.14 № 902-р «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року».
2. Smolenski R. Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. – Springer-Verlag London, 2012. – 160 p.
3. Gow J.A. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J.A. Gow, C.D. Manning // IEEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146. – No. 2. – P. 193-199.
4. NIST Framework and Road map for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0 // Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2014. – 246 p.
5. Жемеров Г. Г. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2015. – №4. – С. 66–70.
6. Козюков Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в Matlab/Simulink / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №. 112. – С. 1–16.
7. Артеменко, М. Ю. Аналіз можливості збільшення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації / М. Ю. Артеменко, Батрак Л. М., Михальський В. М., Поліщук С. Й. // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. С. 12–18.
8. Артеменко, М. Ю. Потужність втрат трифазної чотирипровідної системи живлення / М. Ю. Артеменко, В.О. Лесик, С.Й. Поліщук // Електроніка та зв'язок. – 2016. – № 5. С. 25–30. – doi: 10.20535/2312-1807.2016.21.5.81925.
9. Жемеров Г. Г. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – № 1. – С. 45-57.
10. Жемеров Г. Г. КПД трехфазных систем электроснабжения с двунаправленным потоком энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, И. В. Берчук, С. В. Котелевец // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – Вип. 26. – С. 34-38.

#### References (transliterated)

1. Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukraїni vid 01.10.14 № 902-r «Pro Nacional'nij plan dij z vidnovl'juvanoї energetiki na period do 2020 roku».[ Ordinance of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 01.10.14 No. 902-p “On the National Renewable Energy Action Plan for the Period up to 2020”]
2. Smolenski R. Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. – Springer-Verlag London, 2012. – 160 p.
3. Gow J.A. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J.A. Gow, C.D. Manning // IEEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146. – No. 2. – P. 193-199.
4. NIST Framework and Road map for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0 // Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2014. – 246 p.
5. Zhemerov G. G. Zavisimost' dopolnitel'nyh poter' v trehfaznyh sistemah jelektrosnabzhenija ot reaktivnoj moshhnosti i pul'sacij mgnovennoj aktivnoj moshhnosti [Dependence of additional losses in three-phase power supply systems on reactive power and ripple instantaneous active power] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj // Tehnichna elektrodinamika. – Kіiv: IED NANU. – 2015. – №4. – S. 66–70.
6. Kozjukov D. A. Modelirovanie karakteristik fotoelektricheskikh modulej v Matlab/Simulink [Modeling the characteristics of PV modules in Matlab / Simulink] / D. A. Kozjukov, B. K. Cygankov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo sudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – №. 112. – С. 1–16.
7. Artemenko, M. Ju. Analiz mozhlivosti zbil'shennja KKD trifaznoї chotiriprovідної системи zhivlennja zasobami paralel'noї aktivnoї fil'tracії [Analysis of the possibility of increasing the efficiency of a three-phase four-wire power supply by means of parallel active filtration] / M. Ju. Artemenko, Batrak L. M., Mihal's'kij V. M., Polishhuk S. J. // Tehnichna elektrodinamika. – 2015. – № 6. S. 12–18.
8. Artemenko, M. Ju. Potuzhnist' vtrat tryfaznoї chotyryprovідної systemy zhivlennja [Power loss of three-phase four-wire power system] / M. Ju. Artemenko, V.O. Lesyk, S.J. Polishhuk // Elektronika ta zv'jazok. – 2016. – № 5. S. 25–30. – doi: 10.20535/2312-1807.2016.21.5.81925.
9. Zhemerov G. G. Energyja y moshhnost' v systemah jelektrosnabzhenija s poluprovodnykovymy preobrazovatel'jamy y nakopytel'jamy energyy [Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2014. – № 1. – S. 45-57.
10. Zhemerov G. G. KPD trehfaznyh system jelektrosnabzhenija s dvanapravlennym potomkom energyy [Efficiency of three-phase power supply systems with a bi-directional energy descendant] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj, Y. V. Berchuk, S. V. Kotelevic // Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «Harkiv's'kyj politehničnyj instytut». – Harkiv: NTU «HPІ». – 2018. – Vyp. 26. – S. 34-38

Надійшла (received) 15.11.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Сивенко Михайло Максимович (Сивенко Михаил Максимович, Syvenko Mykhailo Maksymovych)** – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, студент; м. Харків, Україна; michael.syvenko@gmail.com.

**Мірошник Олександр Олександрович (Мирошник Александр Александрович, Miroschnyk Alexander Alexandrovych)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; omiroshnyk@ukr.net

**Н.А. САВЧЕНКО, С.Ю. ШЕВЧЕНКО**

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ**

Целью статьи является теоретическое исследование экономических и технических показателей, позволяющих определить эффективность работы кинетических накопителей энергии при подключении в систему электроснабжения потребителя с целью регулирования суточного графика нагрузки. Являясь реверсивными устройствами, кинетические накопители энергии позволяют частично или полностью разделить во времени процессы выработки и потребления энергии и таким образом эффективно регулировать графики нагрузки. В инерционных накопителях энергии, установленных в систему электроснабжения потребителя, аккумуляция энергии осуществляется из электрической сети или альтернативных источников энергии, ее хранение и выдача при необходимости на электроприемники потребителя. Для проведения исследований использовались теория основ электротехники и теоретической механики, теория построения графиков электрической нагрузки и определения его характеристик, методы экономических расчетов эффективности внедрения новых технологий при различных тарифах оплаты мощности в электрических сетях. Представлены технические показатели оценки эффективности применения кинетических накопителей энергии при регулировании суточных графиков нагрузки потребителя, на основании анализа которых выполнен выбор группы показателей, оказывающих влияние на повышение равномерности графиков нагрузки и выбора метода регулирования. Обосновано применение экономических методов расчета эффективности внедрения кинетических накопителей энергии при двухставочном и дифференциальном тарифах оплаты мощности, что позволит минимизировать затраты потребителя на оплату электроэнергии. Разработанная методика комплексного определения эффективности применения кинетических накопителей энергии для регулирования графиков нагрузки потребителя позволяет обосновать выбор накопителя энергии в каждом конкретном случае выравнивания графика нагрузки.

**Ключевые слова:** кинетический накопитель энергии (КНЭ), график электрической нагрузки (ГЭН), технические показатели эффективности, экономические показатели эффективности.

**Н.П. САВЧЕНКО, С.Ю. ШЕВЧЕНКО**

### **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КІНЕТИЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ СПОЖИВАЧА**

Метою статті є теоретичне дослідження економічних і технічних показників, що дозволяють визначити ефективність роботи кінетичних накопичувачів енергії при підключенні до системи електропостачання споживача з метою регулювання добового графіка навантаження. Будучи реверсивними пристроями, кінетичні накопичувачі енергії дозволяють частково або повністю розділити в часі процеси вироблення та споживання енергії і таким чином ефективно регулювати графіки навантаження. У інерційних накопичувачах енергії, встановлених в систему електропостачання споживача, акумулювання енергії здійснюється з електричної мережі або альтернативних джерел енергії, її зберігання та видача при необхідності на електроприймачі споживача. Для проведення досліджень використовувалися теорія основ електротехніки та теоретичної механіки, теорія побудови графіків електричного навантаження і визначення його характеристик, методи економічних розрахунків ефективності впровадження нових технологій при різних тарифах оплати потужності в електричних мережах. Представлені технічні показники оцінки ефективності застосування кінетичних накопичувачів енергії при регулюванні добових графіків навантаження споживача, на підставі аналізу яких виконаний вибір групи показників, що впливають на підвищення рівномірності графіків навантаження і вибору методу регулювання. Обґрунтовано застосування економічних методів розрахунку ефективності впровадження кінетичних накопичувачів енергії при двоставковому і диференціальному тарифах оплати потужності, що дозволить мінімізувати витрати споживача на оплату електроенергії. Розроблена методика комплексного визначення ефективності застосування кінетичних накопичувачів енергії для регулювання графіків навантаження споживача дозволяє обґрунтувати вибір накопичувача енергії в кожному конкретному випадку вирівнювання графіка навантаження.

**Ключові слова:** кінетичний накопичувач енергії (КНЕ), графік електричного навантаження (ГЕН), технічні показники ефективності, економічні показники ефективності.

**N. SAVCHENKO, S. SHEVCHENKO**

### **ANALYSIS OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF KINETIC ENERGY STORAGE TO ADJUST THE CONSUMER LOAD SCHEDULE**

The aim of the article is a theoretical study of economic and technical indicators that allow to determine the efficiency of kinetic energy storage when connected to a consumer power supply system in order to regulate the daily load schedule. Being reversible devices, kinetic energy storage devices allow to partially or completely separate in time the processes of energy production and consumption and thus effectively regulate load schedules. In inertial energy storage devices installed in the consumer's power supply system, energy storage is carried out from the electric network or alternative energy sources, its storage and delivery, if necessary, to the consumer's power consumers. The research was carried out using the theory of the foundations of electrical engineering and theoretical mechanics, the theory of constructing graphs of electrical load and determining its characteristics, methods of economic calculations of the effectiveness of introducing new technologies at various rates for paying for power in electric networks. Technical indicators are presented for assessing the effectiveness of the use of kinetic energy storage devices for regulating daily consumer load schedules, based on the analysis of which a group of indicators has been selected that affect the uniformity of load schedules and the choice of regulation method. The application of economic methods for calculating the efficiency of introducing kinetic energy storage devices at two-stage and differential tariffs for power payment is substantiated, which will minimize consumer spending on electricity. The developed methodology for the comprehensive determination of the effectiveness of the use of kinetic energy storage devices for regulating consumer load schedules makes it possible to justify the choice of energy storage in each specific case of balancing the load schedule.

**Key words:** kinetic energy storage (KES), electric load graph (LEG), technical performance indicators, economic performance indicators.

**Введение.** Необходимость решения проблемы аккумуляции энергии в энергетической сфере хозяйствования привела в последние годы к бурному развитию кинетических накопителей энергии, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими видами накопителей, такими как высокая удельная энергетическая емкость, абсолютная экологичность, широкий диапазон варьирования режимами заряда и разряда, и практически неограниченным сроком эксплуатации. Применение КНЭ для регулирования суточных графиков нагрузки потребителя на данный момент теоретически и экспериментально исследуется во многих научных трудах, поэтому определение эффективности их применения является актуальной задачей. Методики оценки эффективности работы накопителей энергии достаточно разнообразны и каждая имеет представление определенной группой показателей, но в целом условно они могут быть разделены на технические и экономические, которые могут быть взаимосвязаны между собой. Определяющими факторами при выборе методики является во-первых вид накопителя энергии и его конструкция, что определяет его технические показатели эффективности, во-вторых область и цель применения накопителя, соответственно определяет экономические показатели эффективности. В результате исследования научных трудов, в которых основополагающими были технические показатели эффективности работы кинетических накопителей энергии, установлено что увеличение энергоемкости накопителя прямопропорционально зависит от массы маховика, который является одним из основных элементов, а конструктивное исполнение накопителя имеет прямое влияние на КПД устройства в целом [1-4]. Методики, основанные на оценке эффективности работы любого вида накопителей энергии с помощью экономических показателей, базируются на сведениях к минимуму затрат на стоимость электроэнергии для потребителя [5,6]. Таким образом, единого подхода по определению показателей эффективности применения кинетических накопителей энергии для регулирования ГЭН потребителя на данном этапе не разработано.

Отсутствие единой методики определения эффективности работы накопителей в системах электроснабжения потребителей существенно затрудняет оценку целесообразности их применения в сравнении с другими вариантами накопителей.

**Цель исследования.** Разработать методику, которая содержит минимальную группу экономических и технических показателей, позволяющих проанализировать эффективность применения кинетических энергонакопителей для регулирования суточных графиков нагрузки потребителя.

**Методы, объект и предмет исследования.** В основу работы положен системный подход при проведении теоретических исследований, основанный на фундаментальных положениях теории расчета электрических сетей, теории расчета механических систем, основ экономической теории. *Объект исследования* – процесс выравнивания нагрузки при

подключении в систему электроснабжения потребителя КНЭ. *Предмет исследования* – группы технических и экономических показателей, характеризующих эффективность применения КНЭ.

#### Основной материал.

Подключение кинетических накопителей в систему электроснабжения потребителей позволяет решить ряд задач: первостепенной – регулирование графика нагрузки потребителя и попутных – регулирование качества электрической энергии, обеспечение бесперебойного питания, что значительно повышает надежность и энергоэффективность работы электрических сетей напряжением 0,4 кВ.

Регулирование графиков нагрузки потребителей является основой энергоэффективности процессов производства, передачи и потребления энергии.

Процесс регулирования (выравнивания) графика нагрузки заключается в том что в часы спада нагрузки КНЭ работает как потребитель электроэнергии, а в часы максимума как генератор, что позволяет управлять режимами энергопотребления внутренней системы электроснабжения потребителя [7]. Таким образом, эффективность применения КНЭ в системе электроснабжения потребителя будет выражаться в получении более сглаженного графика нагрузки как представлено на рис.1.

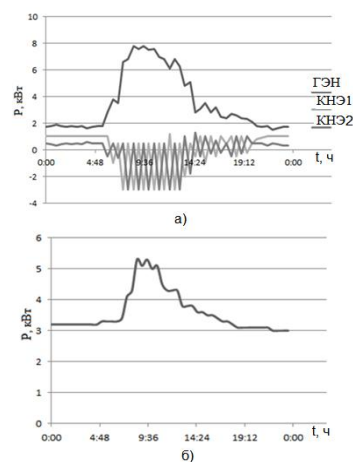


Рис.1. Регулирование ГЭН потребителя:

а) исходный ГЭН потребителя с нагрузочными диаграммами КНЭ; б) суммарный ГЭН потребителя

Для оценки эффективности применения КНЭ следует выделить его основные технические показатели такие как энергоемкость, быстродействие, время заряда и разряда, количество циклов работы, к.п.д.

Аккумулирующим элементом в составе КНЭ является маховик, от характеристик которого зависят все вышеназванные показатели.

Уравнения движения маховика, которое справедливо как в режиме заряда так и разряда, имеет вид [8]

$$M_m = M_{din} - M_{tr} = J \frac{d\omega}{dt} - M_{tr}, \quad (1)$$

где  $M_m$  – внешний момент, который является активным (движущим) моментом при заряде, или реактивным (тормозным) моментом при разряде маховика;

$M_{din}$  – динамический момент, знак которого определяется угловым ускорением  $\frac{d\omega}{dt}$ ;

$M_{tr}$  – момент трения.

Уравнение баланса энергии будет выглядеть [8]:

$$J \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2} - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{tr} dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_m dt \quad (2)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – начальная и конечная угловые скорости маховика;

$t_1, t_2$  – соответствующие значения времени.

В общем виде уравнение (2) имеет вид

$$W_k - W_{tr} = W, \quad (3)$$

где  $W_k$  – кинетическая энергия;

$W_{tr}$  – энергия потерь на трение;

$W$  – полная энергия, которая отводится от маховика.

Максимальная мощность, накопленная КНЭ с маховиком зависит от его массы, геометрических размеров и скорости вращения [9]:

$$P_{max.KЭН}(t) = M_{din,max} \cdot \omega_{max}(t) \quad (4)$$

где  $M_{din,max}$  – максимальный динамический момент [9]:

$$M_{din,max} = J \cdot \omega_{max}(t), \quad (5)$$

тогда

$$P_{max.KЭН}(t) = J \cdot \omega_{max}^2(t) \quad (6)$$

Время разряда маховика на среднюю нагрузку определяется по формуле:

$$t_r = \frac{W_k}{P_{sr}}, \quad (7)$$

где  $P_{sr}$  – средняя потребляемая мощность.

Взаимосвязь параметров накопителя при заряде и разряде определяется законом сохранения энергии и выражается очевидным соотношением [37]:

$$P_z t_z \eta = P_r t_r, \quad (8)$$

где  $P_z$  и  $P_r$  – средние значения мощностей зарядного и разрядного процессов;

$\eta$  – КПД накопителя энергии.

Таким образом при регулировании графика нагрузки эффективность применения КНЭ может быть определена минимальным набором технических показателей, выраженной формулой (8).

Применение КНЭ также влечет за собой экономические выгоды для потребителя при различной

тарифной политике энергоснабжающих организаций. Перенос нагрузки в низкооплачиваемые тарифные зоны ведет к снижению стоимости потребленной электроэнергии.

Возможности потребителей минимизировать свои расходы на закупку электроэнергии в общем виде определяются критерием [5]:

$$\min \sum_{k=1}^K Z_k, \quad (9)$$

где  $Z_k$  – расходы потребителя на покупку электрической энергии (мощности) или ее генерацию;

$K$  – количество интервалов времени, на которые разбивается суточный ГЭН.

Тогда при двухставочном тарифе с платой за мощность, при пиковом значении максимума нагрузки в энергосистеме, и электроэнергию вышеупомянутый критерий примет вид [5]

$$\min(C_p P_{max} + \sum_{k=1}^K C_{e,k} W_k), \quad (10)$$

где  $C_p$  – удельная стоимость одного киловатта суточного максимума нагрузки;

$C_{e,k}$  – удельная стоимость одного киловатт-часа электроэнергии на интервале времени  $k$ ;

$P_{max}$  – максимум нагрузки у потребителя (в часы, определенные энергосистемой)

$W_k$  – количество потребляемой электроэнергии на интервале времени  $k$ .

Экономия средств за заданный интервал времени  $T$  при использовании КНЭ:

$$E_k = C_n \Delta P_n k + C_E \sum_{i=1}^n \Delta W_{pi} + C_E \sum_{i=1}^n \Delta W_{ti} - W_{KES}(1-\eta)C_E - C_{KES} - C_O \quad (11)$$

где  $C_n$  – стоимость заявленной мощности;

$\Delta P_n$  – снижение заявленной мощности;

$C_E$  – цена потребленной энергии;

$W_{pi}$  – снижение потерь энергии на нагрев в  $i$ -м проводнике за  $T$ ;

$W_{ti}$  – снижение потерь энергии в  $i$ -м трансформаторе за  $T$ ;

$W_{KES}$  – энергия, перераспределенная КНЭ за  $T$ ;

$C_{KES}$  – стоимость КНЭ;

$C_O$  – стоимость обслуживания КНЭ.

При дифференцированном тарифе на электроэнергию критерий (9) примет вид [10]

$$\min \sum_{i=1}^T C_e^i \sum_{k \in K^i} W_k, \quad (12)$$

где  $T$  – количество зон, на которые разбивается суточный график потребления электроэнергии;

$C_e^i$  – удельная стоимость одного киловатт-часа электроэнергии в зоне суток  $t$ ;

$K^i$  – множества, определяющие интервалы времени внутри соответствующих зон  $t \in T$ .

Экономия средств за заданный интервал времени  $T$  использования КНЭ при дифференцированном тарифе:

$$E_k = \sum_{j=1}^m (W_{j1} C_{Ej} + W_{j2} C_{Ej} + C_{Ej} \sum_{i=1}^n \Delta W_{ni} + C_{Ej} \sum_{i=1}^n \Delta W_{ni} - W_{KES} (1 - \eta) C_{Ej}) - C_{KES} - C_0, \quad (13)$$

где  $C_{Ej}$  – стоимость потребленной энергии в  $j$ -й тарифной зоне;

$W_{j1}$  – потребленная энергия в  $j$ -й тарифной зоне до введения КНЭ;

$W_{j2}$  – потребленная энергия в  $j$  тарифной зоне после введения КНЭ;

$m$  – число тарифных зон.

В целом анализ экономических показателей эффективности применения КНЭ при регулировании ГЭН сводится к снижению затрат на закупку электроэнергии независимо от вида тарифного плана путем минимизации потерь в элементах системы электроснабжения и стремления к равномерному распределению нагрузки в течении суток.

**Выводы.** Полученные результаты проведенного теоретического исследования методов определения эффективности применения кинетических накопителей энергии в процессе выравнивания графиков нагрузки потребителя позволили выявить основные группы технических и экономических показателей, на основе расчета которых может быть принято решение о целесообразности их применения в процессе регулирования графиков нагрузки. Таким образом, была сформирована методика определения эффективности применения кинетических накопителей энергии, учитывающая как технические так и экономические показатели.

#### Список литературы

1. Солодовников Д.Н. Применение накопителей энергии в энергетических системах транспортных и технологических машин // Теория и практика современной науки. 2017. № 2 (20). – С. 534-538.
2. Андреев С.А. Аккумуляция энергии в маломощных геосистемах автономного электроснабжения / С.А. Андреев, В.И. Загинайлов, Д.В. Шибаров // Вестник. 2017. № 5 (20). С. 70-76.
3. Воропай Н.И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н.И.Воропай, В.А.Стенников // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. – С. 64 - 73.
4. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И.Смоленцев // Ползуновский вестник. 2013.№4(2). – С. 176 –181.
5. Находов В. Ф. Оценка потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки / В. Ф. Находов, А. И. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, В. В. Чекамова. // Вісник НТУ«ХП». 2016. № 4.(1176) . – С. 21–31.
6. Воропай Н.И. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей / Н.И. Воропай, З.А. Стычински, Е.В. Козлова, В.С. Степанов, К.В. Суслов // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. – С. 84-90.
7. Shevchenko S. Yu. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when

connecting the kinetic energy storage to the power supply system / S. Yu. Shevchenko, N. A. Savchenko, A. V. Tretjak // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №6. – С. 69 – 73. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.11.

8. Бут Д.А. Накопители энергии / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. Под редакцией Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

9. Ассоциация «НП Совет рынка». Исследование №2 «Новые энергетические технологии» [Электронный ресурс] / Д.О.Станкевич, А.Г.Николаев, Е.В.Андреева, М.Н.Путляева, В.И.Клепиков, А.В.Шалаев. – Москва, 2017. – 144с. Режим доступа: [https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr\\_pages/SR\\_0V055968/i2\\_novye\\_energeticheskie\\_tehnologii.pdf](https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf).

10. Находов В. Ф. Определение первоочередных направлений совершенствования дифференцированных тарифов на электрическую энергию. / В. Ф. Находов, А. И. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, Ю. Н. Исаенко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1(78). – С. 24–32.

#### References (transliterated)

1. Solodovnikov D.N. Primeneniye nakopiteley energii v energeticheskikh sistemakh transportnykh i tekhnologicheskikh mashin // Teoriya i praktika sovremennoy nauki. 2017. № 2 (20). – pp. 534-538.
2. Andreyev S.A. Akkumulirovaniye energii v malomoshchnykh geliosistemakh avtonomnogo elektrosnabzheniya / S.A. Andreyev, V.I. Zaginaylov, D.V. Shibarov // Vestnik. 2017. № 5 (20). pp. 70-76.
3. Voropay N.I. Integrirovannyye intellektual'nyye energeticheskiye sistemy / N.I.Voropay, V.A.Stennikov // Izvestiya RAN. Energetika. 2014. №1. – pp. 64 - 73.
4. Smolentsev N.I. Nakopiteli energii v lokal'nykh elektricheskikh setyakh / N.I.Smolentsev // Polzunovskiy vestnik. 2013.№4(2). – pp. 176 –181.
5. Nakhodov V. F. Otsenka potentsiala snizheniya zatrat energosistemy v rezul'tate vyravnvaniya sutochnykh grafikov yeye elektricheskoy nagruzki / V. F. Nakhodov, A. I. Zamulko, Mokhammad Al' Sharari, V. V. Chekamova. // Visnik NTU«KHP». 2016. № 4.(1176) . – pp. 21–31.
6. Voropay N.I. Optimizatsiya sutochnykh grafikov nagruzki aktivnykh potrebiteley / N.I. Voropay, Z.A. Stychinski, Ye.V. Kozlova, V.S. Stepanov, K.V. Suslov // Izvestiya RAN. Energetika. 2014. №1. – pp. 84-90.
7. Shevchenko S. Yu. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system / S. Yu. Shevchenko, N. A. Savchenko, A. V. Tretjak // Yeletrotekhnika i yeletromekhanika. – 2017. – №6. – pp. 69 – 73. doi: 10.20998/2074-272KH.2017.6.11.
8. But D.A. Nakopiteli energii / D.A. But, B.L. Aliyevskiy, S.R. Mizyurin, P.V. Vasyukevich. Pod redaktsiyey D.A. Buta. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 400 p.
9. Assotsiatsiya «NP Sovet rynka». Issledovaniye №2 «Novyye energeticheskiye tekhnologii» [Yeletronniy resurs] / D.O.Stankevich, A.G.Nikolayev, Ye.V.Andreyeva, M.N.Putlyayeva, V.I.Klepikov, A.V.Shalayev. – Moskva, 2017. – 144p. Rezhim dostupa: [https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr\\_pages/SR\\_0V055968/i2\\_novye\\_energeticheskie\\_tehnologii.pdf](https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf).
10. Nakhodov V. F. Opredeleniye pervoocherednykh napravleniy sovershenstvovaniya differentsirovannykh tarifov na elektricheskuyu energiyu. / V. F. Nakhodov, A. I. Zamulko, Mokhammad Al' Sharari, YU. N. Isayenko. // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2015. – №1(78). – pp. 24–32.

Поступила (received) 01.11.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Савченко Наталья Афанасьевна (Савченко Наталя Панасівна, Natalya Savchenko )** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра машиностроєння ДонНАСА; г. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7046-0633>; e-mail: [natalia\\_savchenko@ukr.net](mailto:natalia_savchenko@ukr.net)

**Шевченко Сергій Юрьевич (Шевченко Сергій Юрійович, Sergey Shevchenko)** – доктор технічних наук, професор, кафедра передачі електричної енергії, НТУ «ХПІ»; г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: [syurik42@gmail.com](mailto:syurik42@gmail.com).

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, Х. ДЖ. АБУДЖОХ, С. МАРКО, А. СЕНЬКО*

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ С ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ПРИ ЕЁ МОДЕЛИРОВАНИИ**

Исследуется проблема, возникающая при измерениях отдаваемой источником и потребляемой нагрузкой мощностей в системах с нелинейными элементами. Парадокс ситуации заключается в несбалансированности измеренных мощностей, что противоречит классической теории мощности. В качестве примера рассматривается простейшая электрическая система, в которой резистивная нагрузка питается через идеальный электрический вентиль от источника синусоидального напряжения. На виртуальной SimPowerSystem модели такой системы продемонстрировано, что измерения мощностей в источнике и нагрузке при помощи PQ-измерителей мощности приводит к ошибочным результатам. Такое неравенство мощностей обусловлено тем, что в основу PQ-измерителя положено измерение основных гармоник токов и напряжений, что является неприемлемым для систем с нелинейными элементами, так как такая оценка не учитывает наличие интервалов нулевого тока в системах с вентилями. Схожее несоответствие результатов дает и применение виртуальных измерителей, оценивающих мощность по действующим значениям тока и напряжения элемента. Для достижения точного замера мощностей разработан виртуальный измеритель мощности, основанный на использовании мгновенной мощности элемента. Именно мгновенная мощность учитывает отсутствие потребления мощности для случаев, когда присутствует лишь одна из величин, определяющих мощность, то есть либо при отсутствии напряжения, либо при нулевом токе. Ключевым элементом такого измерителя служит интегратор, который осуществляет интегрирование мгновенной мощности. Адекватность оценок мощности при использовании его в системе с вентилем продемонстрирована на визуальной модели. Проведено исследование влияния угла управления тиристором на амплитуду и угол, первой гармоники, сдвиг тока относительно питающего напряжения и мощности источника и на нагрузке. Установлено, что при изменении угла управления расхождений между потребляемой и отдаваемой мощностями не наблюдается.

**Ключевые слова:** электрическая система, идеальный вентиль, виртуальный измеритель мощности, действующее значение тока, мгновенная мощность, интервал нулевого тока

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, Х. ДЖ. АБУДЖОХ, С. МАРКО, А. СЕНЬКО*

### **ОБЧИСЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ В КОЛІ З ВЕНТИЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ПРИ ЙОГО МОДЕЛЮВАННІ**

Досліджується проблема, що виникає при вимірах потужностей, що віддається джерелом і споживається навантаженням в системах з нелінійними елементами. Парадокс ситуації полягає в несбалансованості вимірних потужностей, що суперечить класичній теорії потужності. Як приклад розглядається найпростіша електрична система, в якій резистивне навантаження живиться через ідеальний електричний вентиль від джерела синусоїдальної напруги. На віртуальній SimPowerSystem моделі такої системи продемонстровано, що вимірювання потужностей в джерелі і навантаженні за допомогою PQ-вимірювачів потужності призводить до помилкових результатів. Така нерівність потужностей обумовлена тим, що в основу PQ-вимірювача покладений вимір основних гармонік струмів і напруг, що є неприйнятним для систем з нелінійними елементами, так як така оцінка не враховує наявність інтервалів нульового струму в системах з вентилями. Подібна розбіжність результатів дає і застосування віртуальних вимірників, що оцінюють потужність по діючим значенням струму і напруги елемента. Для досягнення точного виміру потужностей розроблений віртуальний вимірювач потужності, заснований на використанні миттєвої потужності елемента. Саме миттєва потужність враховує відсутність споживання потужності для випадків, коли присуття лише одна з величин, що визначає потужність, тобто або за відсутності напруги, або при нульовому струмі. Ключовим елементом такого вимірювача служить інтегратор, який здійснює інтегрування миттєвої потужності. Адекватність оцінок потужності при використанні його в системі з вентилем продемонстрована на візуальній моделі. Проведено дослідження впливу кута управління тиристором на амплітуду і кут, першої гармоніки, зрушення струму щодо напруги живлення і потужності джерела і на навантаженні. Встановлено, що при зміні кута управління розбіжностей між споживаною і віддаваною потужностями не спостерігається.

**Ключові слова:** електрична система, ідеальний вентиль, віртуальний вимірювач потужності, діюче значення струму, миттєва потужність, інтервал нульового струму

*V. G. YAGUP, E. V. YAGUP, H. J. ABUJOH, S. MARCO, A. SENKO*

### **CALCULATION OF POWER IN A CHAIN WITH A FAN ELEMENT IN ITS MODELING**

The problem that arises in measurements given by the source and the consumed power load in systems with non-linear elements is investigated. The paradox of the situation lies in the imbalance of the measured powers, which contradicts the classical theory of power. As an example, we consider the simplest electrical system in which a resistive load is supplied through an ideal electric valve from a sinusoidal voltage source. On a virtual SimPowerSystem model of such a system, it was demonstrated that measuring power in the source and load using PQ power meters leads to erroneous results. This power inequality is due to the fact that the basis of the PQ meter is the measurement of the main harmonics of currents and voltages, which is unacceptable for systems with nonlinear elements, since this estimate does not take into account the presence of zero current intervals in systems with valves. A similar discrepancy in the results is also obtained by the use of virtual meters that evaluate power by the effective values of the current and voltage of the element. To achieve accurate power metering, a virtual power meter is developed, based on the use of the instantaneous power of the element. It is the instantaneous power that takes into account the absence of power consumption for cases when there is only one of the quantities that determine the power, that is, either in the absence of voltage or at zero current. The key element of such a meter is an integrator that integrates instantaneous power. The adequacy of power ratings when used in a valve system is demonstrated on a visual model. The effect of the thyristor control angle on the amplitude and angle, the first harmonic, the current shift relatively to the supply voltage and power of the source, and on the load are studied. It is established that when the control angle is changed, no discrepancy between the consumed and given power is observed.

**Keywords:** electrical system, ideal valve, virtual power meter, effective current value, instantaneous power, zero current interval

**Введение.** Одним из ключевых вопросов в электроэнергетике является правильная оценка количества потребляемой электроэнергии и контроля качества электроэнергии в электроснабжающих системах [1, 2]. Современные концепции компенсации реактивной мощности также основаны на определении составляющих полной мощности [3], а снижение реактивной мощности в электрической сети означает уменьшение потерь и повышение коэффициента полезного действия. Особого подхода требуют оценки мощности в случаях питания нагрузки через нелинейные элементы.

**Анализ состояния проблемы.** При анализе научной литературы [4-6] в области представлений понятий о мощности в электрической системе и различных её составляющих наблюдается противоречивость. Особый интерес вызывают трактовки составляющих мощности применительно [7, 8]. В таких системах токи и напряжения подвержены искажениям синусоидальной формы. Таким образом, теория мощности переменного тока, известная по классическим учебникам теоретической электротехники, в непосредственном формальном её применении нарушается. Например, в [9] определяются энергетические соотношения в системе, в которой рассматривается питание нагрузки, представленной резистором с единичным сопротивлением, через идеальный неуправляемый вентиль от источника синусоидального напряжения с единичной амплитудой. Наблюдаемый и описанный в статье [9] парадокс заключается в неравенстве мощностей, потребляемой нагрузкой и отдаваемой источником электрической энергии, что противоречит общеизвестному закону баланса мощностей [5, 6].

**Цель статьи** состоит в исследовании на визуальной модели электрической системы с неуправляемым и управляемым идеальными электрическими вентилями для определения отдаваемой источником мощности и потребляемой нагрузкой мощности при различных способах построения виртуальных измерителей мощности.

**Метод решения проблемы.** На рис. 1 представлена виртуальная модель исследуемой системы со стандартными виртуальными измерителями мощности самой системы SPS.

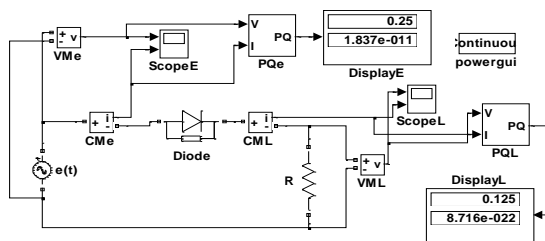


Рисунок 1 – Модель системы с виртуальными PQ-измерителями мощности SPS

В модели источник напряжения  $e(t)$  генерирует синусоидальное напряжение с амплитудой 1 В и частотой 0,5 Гц. Параметры виртуального диода Diode заданы таким образом, чтобы вентиль можно было

полагать близким к идеальному. Мощность, рассеиваемая на таком вентиле близка к нулю, что позволяет рассматривать баланс мощностей лишь в отношении источника и нагрузки. Нагрузка представлена активным сопротивлением резистора R с сопротивлением 1 Ом. Соответствующие временные диаграммы напряжений и токов по результатам моделирования (рис. 2) демонстрируют адекватность модели.

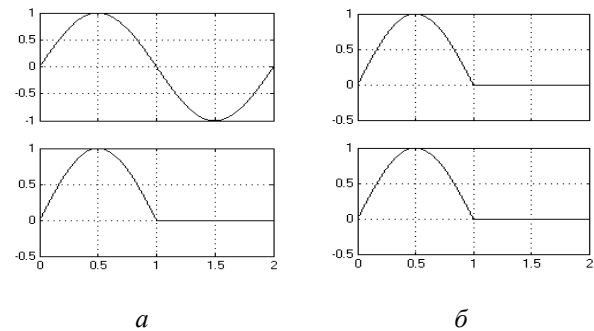


Рисунок 2 – Временные диаграммы напряжения и тока: а – источника; б - нагрузки

Активная мощность источника равна  $S=0,25$  Вт, а потребляемая нагрузкой активная мощность –  $P=0,125$  Вт. Таким образом, проявляется явление парадокса [9], состоящего в неравенстве мощностей, потребляемой нагрузкой и отдаваемой источником. Следует отметить, что значения мощностей источника и нагрузки отличаются от указанных в [9], где они составляют величины, равные 0,3536 и 0,25 Вт соответственно и дают отношение 1,4. В случае моделирования это отношение равно 2,0. Проанализируем структуру виртуального измерителя мощности системы SPS (рис. 3).

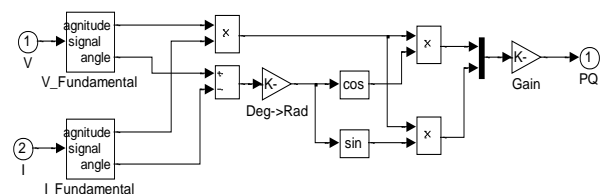


Рисунок 3 – Виртуальный измеритель мощности системы SPS

Здесь напряжение и ток, обуславливающие измеряемую мощность, поступают на блоки V\_Fundamental и I\_Fundamental, которые представляют собой анализаторы гармонических составляющих заданного порядка. Структура модели первого виртуального прибора показана на рис.4.

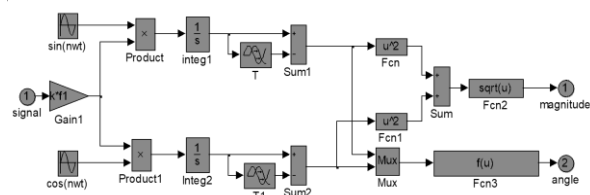


Рисунок 4 – Виртуальный анализатор гармоник системы SPS (V-Fundamental)



В результате анализа блоков, из которых состоит стандартный виртуальный измеритель PQ-мощностей системы SPS можно прийти к выводу, что он фактически измеряет мощности, обусловленные основными гармониками напряжения и тока. На источнике напряжения учитываются полное напряжение источника в течение периода с единичной амплитудой и основная гармоника тока с амплитудой 0,5 А. Следовательно стандартный виртуальный измеритель PQ-мощностей обеспечивает адекватные показания лишь при синусоидальных напряжениях и токах, создающих мощность на переменном токе.

Из математических выкладок [9] мощности вычисляются путём умножения действующего значения напряжения на действующее значение тока. Таким образом, для вычисления мощности фактически используется формула:

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (1)$$

Модель исследуемой системы, в которой реализованы измерения мощностей источника и нагрузки по действующим значениям напряжения и тока, приведена на рис. 5.

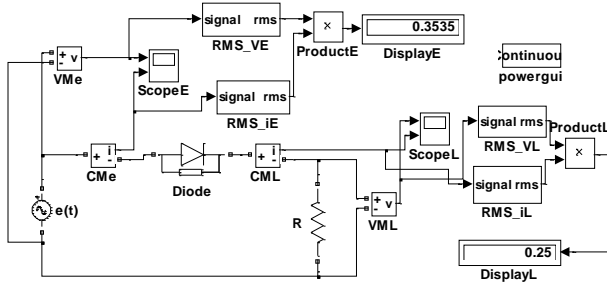


Рисунок 5 – Модель системы с виртуальными измерителями мощности по действующим значениям напряжения и тока

Здесь для вычисления действующих значений напряжений и токов использован виртуальный прибор RMS системы SPS. Структура этого прибора изображена на рис. 6.

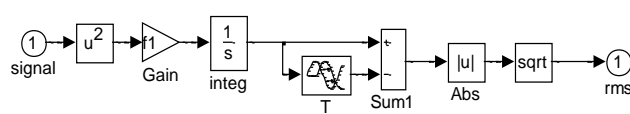


Рисунок 6 – Виртуальный вычислитель действующего значения системы SPS

В таком варианте результаты моделирования показывают именно те значения мощностей, которые получены в [9].

Следует учесть, что во втором полупериоде как в нагрузке, так и в источнике работа не совершается. В нагрузке это представляется более наглядно, потому что во втором полупериоде и напряжение на нагрузке и её ток равны нулю. Это обстоятельство сказывается на вычислениях как амплитуд основных гармоник напряжения и тока по первой модели (рис. 1), так и действующих значений напряжения и тока по второй модели (рис. 5). При вычислениях мощности источника

напряжение в обоих рассмотренных случаях оказывается учтённым в двух полупериодах. Однако во втором полупериоде отдаваемая источником мощность отсутствует, поскольку отсутствует ток, потребляемый от источника.

Для адекватных вычислений активной мощности для случая периодических несинусоидальных напряжений и токов исследуемого элемента предложим разделить период T на n интервалов длительностью  $\Delta t = T/n$ , полагая, что в течение каждого k-го интервала напряжение и ток имеющими постоянные усредненные на интервале значения  $u_k$  и  $i_k$ . Тогда работа  $A_k$ , совершаемая электрическим током на k-м интервале определится выражением  $A_k = \Delta t u_k i_k$ .

Просуммировав все элементарные работы на периоде и усреднив полученной значение полной работы на интервале периода, найдем активную мощность

$$P = \frac{1}{T} \left( \sum_{k=1}^n u_k i_k \Delta t \right). \quad (2)$$

Замена суммы интегралом при неограниченном увеличении числа интервалов n приводит это выражение к интегральному виду:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (3)$$

Последнее выражение представляет собой известное выражение активной мощности через мгновенную мощность, представляющую собой произведение мгновенных величин напряжения и тока исследуемого элемента [10].

Исходя из приведенных соображений, можно создать виртуальный измеритель активной мощности на основе интегрирования мгновенной мощности. Такой измеритель представлен на рис. 7.

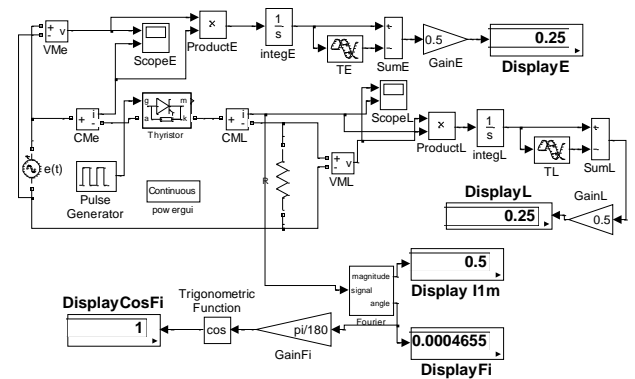


Рисунок 7 – Модель системы с виртуальными измерителями мощности на основе мгновенных мощностей

Виртуальные измерители мощности собраны здесь на основе использования понятия мгновенной мощности. В модели на рис. 7 диод заменён тиристором, управляемым от источника импульсов Pulse Generator. Это позволяет повторить анализ системы при изменении угла управления тиристором. В изображённом на рис. 7 случае установлен нулевой угол управления, что

фактически превращает тиристор в диод. Таким образом, последняя модель эквивалентна по поведению силовой части ранее рассмотренным двум моделям (рис. 1 и рис. 5). Как видно из представленной на рис. 7 модели, показания виртуальных приборов при определении мощности по (3) совершенно одинаковы и совершенно не парадоксальны. Обе мощности составляют величины 0,25 Вт.

Исследование системы с управляемым тиристором в данном случае также не приводит к парадоксу неравенства отдаваемой и потребляемой мощностей. Результаты изменения угла управления в пределах значений, приведённых в [9], отображены в таблице.

Таблица 1 – Результаты моделирования системы с тиристором

Угол управления $\alpha$	0	30	60	90	120	150
$I_{m1}$	0,5	0,487	0,420	0,296	0,154	0,042
Угол 1-й гармоники $\varphi$	0	-4,68	-16,5	-32,5	-50,7	-70,1
$\cos \varphi$	1	0,997	0,959	0,844	0,634	0,341
Мощность источника $S$	0,25	0,243	0,201	0,125	0,049	0,0072
Мощность на нагрузке $P$	0,25	0,243	0,201	0,125	0,049	0,0072
Отношение	1	1	1	1	1	1

Результаты моделирования системы с тиристором при изменении угла управления свидетельствуют о том, что при использовании мгновенной мощности для оценки генерируемой и потребляемой мощностей расхождений между их значениями не наблюдается. Увеличение отношения мощностей  $S/P$  при увеличении угла управления, отмеченное в [9], происходит потому, что при этом увеличивается интервал нулевого тока в нагрузке и в источнике. В нагрузке это обстоятельство правильно учитывается, поскольку здесь интервал нулевого тока и напряжения совпадают. В источнике же напряжение на всём периоде полагается ненулевым, и при раздельном учете напряжения и тока по выражению (1) это приводит к неправильным результатам. Эти ошибочные результаты и содержатся в строке  $S$  таблицы работы [9], отображающей активную мощность источника.

**Выводы.** При моделировании электрических систем, содержащих нелинейные элементы в виде неуправляемых и управляемых электрических вентилях, необходимо критически подходить к возможностям оценки мощностей в системе при помощи стандартных виртуальных измерителей РО-мощностей. Неадекватность показаний этих виртуальных приборов обусловлена тем обстоятельством, что их показания основаны на выделении основных гармоник тока и напряжения исследуемого элемента. Такая оценка не учитывает наличие интервалов нулевого тока в системах с вентилями.

Аналогичные неадекватные результаты дают виртуальные измерители, в которых мощность

определяется произведением действующих значений напряжения и тока исследуемого элемента.

Использование мгновенной мощности, определяемой произведением напряжения элемента на его ток, с последующим интегрированием и усреднением, позволило создать виртуальный измеритель активной мощности для использования его при моделировании системы с вентилем.

#### Список литературы

1. Сокол Е.И. Качество электрической энергии. / Е.И.Сокол, Д.А.Гапон, О.Г.Гриб и др. – Т.2. Контроль качества электрической энергии. – Х.: Тим Паблш Груп, 2014. – 244 с.
2. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю. А. Сиротин // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. Сб. тр. VI МНТК, EPQ-2008. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ. – 2008. – С. 211–214.
3. Зорин В.В. Концепция компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях / В.В. Зорин // Промелектро.– 2005. – №3. – С. 24 – 26.
4. Czamecki L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned/ L. S. Czamecki // IEEE Trans. Instr. Meas.– 1987. – IM-36. – no.3. – pp.834–837.
5. Крögerис А.Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крögerис, К.К.Рашенин, С.И.Трейманис – Рига: Физ.-энерг. Ин-т Латв.АН, 1993.– 294 с..
6. Тонкаль В.Е. Баланс энергии в электрических цепях / [В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др.] – Киев: Наукова думка. – 1992. – 312 с.
7. Маевский О.А. Энергетические показатели вентилях преобразователей / О.А. Маевский – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
8. Чаплыгин Е. Е. Теория мощности в силовой электронике/ Е. Е. Чаплыгин, Н. Г. Калугин. Учеб. пособие по специальности "Промышленная электроника". – М.: МЭИ (ТУ), 2006. -56 с – Режим доступа: promel2000.narod.ru/posobia/tm.doc
9. Долбяк В.Т. Об одном парадоксе, возникающем при анализе цепей с выпрямителями (в порядке обсуждения) // Наукотехнічний журнал "Електроінформ", "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 448–451.
10. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379
11. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

#### References (transliterated)

1. Sokol Ye.I. Kachestvo elektricheskoy energii. / Ye.I.Sokol, D.A.Gapon, O.G.Grib i dr. – T.2. Kontrol' kachestva elektricheskoy energii. – KH.: Tim Pabllsh Grup, 2014. – 244 p.
2. Sirotin YU. A. Uravneniye moshchnosti i shtrafnyye sanktsii za asimmetrichnyuyu nagruzku / YU. A. Sirotin // Effektivnost' i kachestvo elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Cb. tr. VI MNTK, EPQ-2008. – Mariupol': Izd-vo PGTU. – 2008. – P. 211–214.
3. Zorin V.V. Kontseptsiya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh / V.V. Zorin // Promelektro.– 2005. – №3. – P. 24 – 26.
4. Czamecki L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned/ L. S. Czamecki // IEEE Trans. Instr. Meas.– 1987. – IM-36. – no.3. – PP.834–837.
5. Krogeris A.F. Moshchnost' peremennogo toka / A. F. Krogeris, K.K.Rashenin, E.I.Treymanis – Riga: Fiz.-energ. In-t Latv.AN, 1993.– 294 p.
6. Tonkal' V.Ye. Balans energii v elektricheskikh tseyakh / [V.Ye. Tonkal', A.V. Novosel'tsev, S.P. Denisjuk i dr.] – Kiyev: Naukova dumka. – 1992. – 312 p.
7. Mayevskiy O.A. Energeticheskiye pokazateli ventil'nykh preobrazovateley / O.A. Mayevskiy – M.: Energiya, 1978. – 320 p.
8. Chaplygin Ye. Ye. Teoriya moshchnosti v silovoy elektronike/ Ye. Ye. Chaplygin, N. G. Kalugin. Ucheb. posobiye po spetsial'nosti "Promyshlennaya elektronika". – M.: MEI (TU), 2006. - 56 p – Rezhim dostupa: promel2000.narod.ru/posobia/tm.doc

9. Dolbnya V.T. Ob odnom paradokse, vznikayushchem pri analize tsepey s vypryamitelyami (v poryadke obsuzhdeniya) // Naukovo-tekhnichniy zhurnal "Yeletroinform", "Problemi avtomatizovanogo yeletroprivoda. Teoriya i praktika". – L'viv: YEKOinform, 2009. – P. 448–451.

10. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379 p.

11. Chernykh I.V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. / I.V. Chernykh – M.: DMK Press, SPb.: Piter, 2008. – 288 p.

*Поступила (received) 01.08.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Хейдар Джафар Абуджох (Хейдар Джафар Абуджох, Heidar Jafar Abujoḥ)** – помічник менеджера, управління електроенергії та води Дубая, відділ обслуговування зв'язку. Дубай, Об'єднані Арабські Емірати; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9860-8927>; e-mail: [haidarjokh2004@yahoo.com](mailto:haidarjokh2004@yahoo.com)

**Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерий Григорьевич, Yagup Valery Grigorievich)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>; e-mail: [yagup.valery@gmail.com](mailto:yagup.valery@gmail.com)

**Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Ekaterina Valerievna)** – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: [kata3140@gmail.com](mailto:kata3140@gmail.com)

УДК 621.314

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, А. Д. МАШИН, М. С. СТЕПАНЧУК***РЕЖИМ ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В статье рассматривается проблема исследования режимов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения, питаемой от синхронного генератора с заданными параметрами. При этом осуществляется анализ системы, в которой реактивная составляющая сопротивления генератора задана необоснованно большим значением, значительно превышающим те величины, которые используются на практике, а расчеты такой системы электроснабжения осуществляются без системного анализа. Показано, что такой подход к рассматриваемой проблеме приводит к некорректным результатам по оценке, как исходного режима, так и режима компенсации реактивной мощности. В результате проведения расчета режима компенсации методом поисковой оптимизации выявляется, что реактивная мощность при некорректно заданном комплексном сопротивлении генератора оказывается не полностью скомпенсированной и коэффициент мощности оказывается меньшим, чем задекларированный в рассматриваемом примере коэффициент, равный единице. Продemonстрирована возможность применения метода поисковой оптимизации для поиска уточненных параметров системы электроснабжения, которые обеспечивают заданные уровни потребления активной мощности нагрузкой и отдачи заданного уровня активной мощности синхронным генератором. В основу таких расчетов положено уравнение равновесия и два ограничения, задающие уровни активных мощностей, отдаваемой генератором и потребляемой нагрузкой, решение которого выполнено в программе MathCAD с помощью парой операторов given-find, реализующими поисковую оптимизацию. В программе MATLAB с использованием поисковой оптимизации, применяемой к визуальной модели, рассчитана величина емкости косинусного конденсатора, при которой достигается полная компенсация реактивной мощности в системе. Рассчитанные таким методом параметры системы электроснабжения обеспечивают снижение активных потерь в линии электропередачи на 20%, чем при режиме частичной компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, линия электропередачи, активная мощность, поисковая оптимизация, режим полной компенсации реактивной мощности

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, О. Д. МАШИН, М. С. СТЕПАНЧУК***РЕЖИМ ПОВНОГО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

У статті розглядається проблема дослідження режимів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, що живиться від синхронного генератора з заданими параметрами. При цьому, здійснюється аналіз системи, в якій реактивна складова опору генератора задана необґрунтовано великим значенням, що значно перевищує ті величини, які використовуються на практиці, а розрахунки такої системи електропостачання здійснюються без системного аналізу. Показано, що такий підхід до даної проблеми призводить до некоректних результатів за оцінкою, як вихідного режиму, так і режиму компенсації реактивної потужності. В результаті проведення розрахунку режиму компенсації методом пошукової оптимізації виявляється, що реактивна потужність при некоректно заданому комплексному опорі генератора виявляється не повністю скомпенсувати і коефіцієнт потужності виявляється меншим, ніж задекларований в розглянутому прикладі коефіцієнт, що дорівнює одиниці. Продemonстровано можливість застосування методу пошукової оптимізації для пошуку уточнених параметрів системи електропостачання, які забезпечують задані рівні споживання активної потужності навантаженням і віддачі заданого рівня активної потужності синхронним генератором. В основу таких розрахунків покладено рівняння рівноваги і два обмеження, які визначають рівні активних потужностей, що віддається генератором і споживаної навантаженням, рішення якого виконано в програмі MathCAD за допомогою парою операторів given-find, що реалізують пошукову оптимізацію. У програмі MATLAB з використанням пошукової оптимізації, яка застосовується до візуальної моделі, розрахована величина ємності косинусного конденсатора, при якій досягається повна компенсація реактивної потужності в системі. Розраховані таким методом параметри системи електропостачання забезпечують зниження активних втрат в лінії електропередачі на 20%, ніж при режимі часткової компенсації реактивної потужності.

**Ключові слова:** синхронний генератор, лінія електропередачі, активна потужність, пошукова оптимізація, режим повної компенсації реактивної потужності

*V. G. YAGUP, E. V. YAGUP, O. D. MASHIN, M.S. STEPANCHUK***MODE OF COMPLETE COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN ELECTRICAL SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF THE ELECTRIC TRANSFER LINE**

The article discusses the problem of studying the modes of reactive power compensation in the power supply system, powered by a synchronous generator with specified parameters. At the same time, the system is analyzed in which the reactive component of the generator resistance is set to an unreasonably large value, significantly exceeding those used in practice, and the calculations of such a power supply system are carried out without system analysis. It is shown that this approach to the problem under consideration leads to incorrect results in evaluating both the initial mode and the reactive power compensation mode. As a result of the calculation of the compensation mode by search optimization, it is revealed that the reactive power with an incorrectly set complex resistance of the generator is not fully compensated and the power factor is lower than the coefficient declared in the considered example, equal to unity. The possibility of applying the search optimization method to search for refined parameters of the power supply system that provide specified levels of active power consumption by the load and return of a given level of active power by a synchronous generator is demonstrated. The basis of such calculations is the equilibrium equation and two constraints that specify the levels of active power given by the generator and the consumed load, the solution of which is performed in the MathCAD program using a pair of given-find operators that implement search optimization. Using the search optimization applied to the visual model, the MATLAB program calculates the value of the capacitance of the cosine capacitor at which full compensation of the reactive power in the system is achieved. The parameters of the power supply system calculated by this method provide a 20% reduction in active losses in the power line than in the case of partial reactive power compensation.

© В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп, А. Д. Машин, М. С. Степанчук, 2019

**Keywords:** synchronous generator, power line, active power, search optimization, mode of full reactive power compensation

**Введение.** Одним из ключевых показателей качества электрической энергии в промышленных и коммунальных электрических системах является величина реактивной мощности [1]. Ее компенсация традиционно осуществляется включением косинусных конденсаторов, что способствует достижению повышения коэффициента мощности и симметрированию питающих токов [2, 3, 4].

**Целью статьи** является сравнительный анализ режимов компенсации реактивной мощности в обобщенной однофазной системе электроснабжения при соизмеримых комплексных сопротивлениях нагрузки и линии электроснабжения с последующим уточнением параметров системы для достижения режима полной компенсации реактивной мощности.

**Постановка задачи.**

В обобщенном случае для расчета реактивной мощности в системах электроснабжения используется выражение

$$Q_k = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \tag{1}$$

где  $Q_k$  – реактивная мощность, которую необходимо скомпенсировать для увеличения коэффициента мощности от значения  $cos\varphi_1$  до значения  $cos\varphi_2$ ;

$P$  – активная мощность, потребляемая в системе электроснабжения.

По значению  $Q_k$  далее вычисляются необходимые емкости косинусных конденсаторов. При использовании формулы (1) режим в системе считается симметричным. Поэтому такой расчет не позволяет определить емкости конденсаторов, обеспечивающих симметрирование режима в системе.

Точно определить параметры симметрирующего устройства (СКУ) позволяет метод поисковой оптимизации с использованием визуальных SimPowerSystems-моделей [4]. Режим полной компенсации является оптимальным в отличие от режима частичной компенсации и соответствует системному подходу, который учитывает свойства всей системы электроснабжения в целом.

**Основная часть исследования.**

Рассматриваемая в [5] система электроснабжения питается от синхронного генератора (рис. 1).

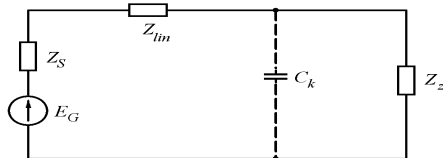


Рисунок 1 – Эквивалентная схема системы электроснабжения

Параметры рассматриваемой схемы в [5] представлены следующими комплексными величинами: эквивалентное сопротивление  $Z_z=(2,015+j1,511)$  Ом, комплексное сопротивление асинхронного генератора  $Z_s=(0,066+j3,2)$  Ом,

комплексное сопротивление линии электропередачи  $Z_{lin}=(0,11+j0,063)$  Ом.

Рассматриваемая эквивалентная схема отображает однофазный вариант для одной фазы системы электроснабжения и предполагает, что трехфазная система абсолютно симметрична.  $E_G$  при этом должно представлять фазное напряжение синхронного генератора с действующим значением:  $E_G=6,3/\sqrt{3}$ .

При этих условиях определена емкость компенсирующего конденсатора,  $C_{CC}=758$  мкФ. Согласно [5] таким образом обеспечивается единичный коэффициент мощности.

Для анализа представленного варианта при системном подходе осуществляется контрольный расчет режима компенсации с применением метода поисковой оптимизации к визуальной модели (рис. 2), составленной в системе SimPowerSystems (SPS).

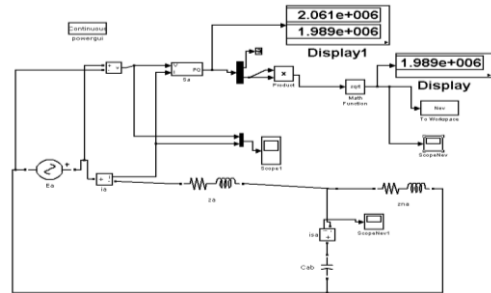


Рисунок 2 – Визуальная модель электро-энергетической системы

В представленной модели комплексные сопротивления генератора  $z_s$  и линии электропередачи  $z_{lin}$  объединены в один элемент с комплексным сопротивлением  $z=z_s+z_{lin}=(0,176+j3,263)$  Ом.

Емкость  $C_k$  конденсатора, компенсирующего реактивную мощность, принята в качестве переменной оптимизации. Для источника электроэнергии задается требуемое амплитудное значение напряжения:

$$E_{Gm}=E_G \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5143,9 \text{ В.}$$

Реактивная мощность источника электроэнергии принята в качестве целевой функции оптимизации. Модель работает во временном интервале, соответствующем единому периоду питающего напряжения с шагом интегрирования  $\Delta t=10^{-4}$  с по методу Розенброка. Полученное значение целевой функции передается с помощью элемента To Workspace в рабочее пространство, а затем обрабатывается встроенной функцией оптимизации fminsearch(). В результате найдено значение емкости конденсатора  $C_k=776,174$  мкФ. Однако, значение целевой функции при этом не свелось к нулевому значению. Из рис. 2 видно, что полная мощность, потребляемая от источника, составляет величину  $S_S=(2,061+j1,989)$  мВА. По окончании процесса оптимизации значение целевой функции устойчиво достигает минимального значения  $1,989 \cdot 10^6$ , т. е.

происходит лишь частичная компенсация реактивной мощности.

Соответствующий коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{2,061}{\sqrt{2,061^2 + 1,989^2}} = 0,72 < 1.$$

Угол отставания тока  $\varphi = 43,982^\circ$ . Ток от источника в линии электропередачи  $\dot{I}_a = 1113,82e^{j(-43,98^\circ)}$ . Напряжение на нагрузке и компенсирующем конденсаторе  $\dot{V}_{cc} = 3505,83e^{j(-45^\circ)}$ .

Ток через нагрузку  $\dot{I}_z = 1391,97e^{j(-81,87^\circ)}$  Мощность, потребляемая нагрузкой:

$$S_z = 0,5\dot{V}_{cc} \cdot \dot{I}_z^* = (1,952 + j1,464) \text{ мВА.}$$

В [5] при рассмотрении параметров нагрузки приводятся следующие данные: ток через нагрузку (действующее значение)  $I_z = 1375$  А; активная мощность  $P_z = 11,43$  мВА; фазное напряжение на нагрузке (действующее значение)  $U_z = 3464$  В.

Активная мощность нагрузки 1,952 мВт по результатам моделирования системы меньше задекларированной в [5] и составляющей в пересчете на одну фазу  $11,43/3 = 3,81$  мВт. Отношение этих мощностей составляет величину  $3,81/1,952 = 1,952$ .

Напряжение на нагрузке составляет действующее значение величиной  $V_{cc} = 3505,83/\sqrt{2} = 2479$  В.

Также меньше задекларированного в [5] действующего значения  $U_z = 3464$  В. Отношение напряжений составляет величину  $3464/2479 = 1,397$ . Квадрат этой величины как раз составляет отношение мощностей.

Таким образом, уменьшение мощности нагрузки объясняется уменьшением напряжения на нагрузке на 40% по сравнению с расчетным в [5] в режиме компенсации реактивной мощности. При отсутствии же компенсирующего конденсатора положение еще более усугубляется: ток через линию электропередачи и нагрузку  $\dot{I}_a = \dot{I}_z = 979,28e^{-j65,35^\circ}$  напряжение на нагрузке  $\dot{U}_z = 2466,41e^{-j28,48^\circ}$ , мощность, потребляемая нагрузкой,  $S_z = (0,9662 + j0,7245)$  мВА, мощность, отдаваемая источником  $S_G = (1,051 + j2,289)$  мВА.

Причинами выявленных противоречий является то, что анализ режимов в цепи нагрузки и цепи генератора в [5] проведен раздельно без системного подхода и выбор излишне большого сопротивления генератора в [5]. Особенно велика реактивная составляющая сопротивления генератора  $x_s = 3,2$  Ом. Действительно, базовое сопротивление синхронного генератора  $z_b = U_G^2/S_G = 6,3^2/15 = 2,646$  Ом.

Относительное значение реактивного сопротивления составляет величину  $3,2/2,646 \cdot 100\% = 121\%$ ,

в то время, как на практике эта величина обычно составляет  $8 \div 25\%$  для турбогенераторов [6].

При отсутствии системного подхода задача выбора компенсирующего конденсатора из условия компенсации лишь реактивной составляющей проводимости нагрузки в действительности решается буквально в одну строку:  $\omega C_{cc} + I_m(1/Z_z) = 0$

Поскольку при  $Z_z = 2,015 + j1,511$  проводимость нагрузки  $Y_z = 1/(2,015 + j1,511) = 0,31766 - j0,23820$ .

Отсюда  $C_{cc} = 0,2382/\omega = 758,22$  мкФ.

Такое решение совершенно не требует использования остальных исходных данных для параметров, приведенных в [5].

Метод поисковой оптимизации [6] позволяет решить обратную задачу – определить суммарное комплексное сопротивление генератора и линии электропередачи, при которых обеспечивается требуемый режим питания нагрузки по напряжению и потребляемой мощности. Это решение в системе MathCAD представлено на рис. 3.

РАСЧЕТ СУММАРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СГ И ЛЭП:

$$\begin{aligned} e_z &= \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637,307 \\ z_n &= 2.015 + j \cdot 1.511 = 2.015 + 1.511i \\ z &= .1 + j = 0.1 + i \quad i := 0 \\ \text{Given} \\ i &= \frac{e}{z + z_n} \\ \text{Re}(e \cdot i) &= 4000000 \\ \text{Re}(z_n \cdot i) &= 3810000 \\ \left( \begin{matrix} i \\ z \end{matrix} \right) &= \text{Find}(i, z) = \left( \begin{matrix} 1099.714798 - 825.497559i \\ 0.100486 + 0.076983i \end{matrix} \right) \\ |i| &= 1375.070 \\ u_n &= z_n \cdot i = 3.463 \times 10^3 - 1.709i \quad |u_n| = 3463.253 \\ u_n \cdot i &= 3.81000 \times 10^6 + 2.85703i \times 10^6 \\ \frac{6000}{\sqrt{3}} &= 3464.102 \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Расчет суммарного сопротивления синхронного генератора и линии электропередачи

Решение уравнения равновесия и двух ограничений, задающих уровни потребляемых и отдаваемых активных мощностей, осуществляется оптимизационным методом с помощью пары операторов given-find. Решение проведено относительно тока  $i$  в линии электропередачи и суммарного комплексного сопротивления  $Z$  оператора и линии электропередачи. В результате решения уравнения требуемое комплексное сопротивление генератора и линии электропередачи составляет величину  $z = (0,1 + j0,077)$  Ом, что по реактивной составляющей гораздо меньше в сравнении с  $(0,176 + j3,263)$  Ом, принятым в [5].

В результате выполнения оптимизации на визуальной модели (рис. 2) найдена емкость компенсирующего конденсатора, которая составляет величину  $C = 782,97$  мкФ. При этом мощность,

отдаваемая источником  $S_e=4,076$  мВт, мощность, потребляемая нагрузкой  $S_z=(3,95 + j2,962)$  мВА. Действующее значение тока в линии электропередачи  $I = 1120,49$  А.

Поскольку мощность потерь в линии электропередачи пропорциональна квадрату действующего значения тока, то коэффициент снижения потерь может быть вычислен как отношение квадрата действующего значения тока в линии электропередачи  $I_{lin}$  при отсутствии компенсации к квадрату тока  $I_{lincomp}$  при введении компенсации:

$$K_{LR} = I_{lin}^2 / I_{lincomp}^2$$

Для случая частичной компенсации параметров, принятых в [5],  $I_{lin} = 787,59$  А и  $I_{lincomp} = 692,46$  А, следовательно  $K_{LR} = 787,59^2 / 692,46^2 = 1,294$ .

При найденных параметрах системы, удовлетворяющим условиям потребления заданного уровня мощности, получаем  $I_{lin} = 1375,27$  А,  $I_{lincomp} = 1120,49$  А, следовательно

$$K_{LR} = 1375,27^2 / 1120,49^2 = 1,506$$

Таким образом, полная компенсация реактивной мощности по сравнению с частичной компенсацией оказывается на 20% более эффективной.

**Выводы.** Расчет компенсирующего устройства и режима компенсации реактивной мощности при отсутствии системного подхода приводит к ошибочным результатам. Необоснованный выбор параметров синхронного генератора, приводит к невозможности осуществления режима полной компенсации реактивной мощности в системе. Метод поисковой оптимизации, реализованный в системе MathCAD, позволил точно определить параметры системы электроснабжения, обеспечивающие условия потребления заданных уровней активной мощности в нагрузке и отдаваемой синхронным генератором активной мощности. При уточненных параметрах системы электроснабжения обеспечивается как

исходный режим системы электроснабжения, так и режим полной компенсации реактивной мощности. Потери активной мощности в линии электропередачи при полной компенсации реактивной мощности на 20% ниже, чем в режиме частичной компенсации, что доказывает эффективность режима полной компенсации реактивной мощности.

#### Список литературы

1. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. // Б. И. Кудрин – М.: Интернет Люксиниринг, 2006. – 672 с.
2. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии. // А. А. Герасименко, В. Т. Федин – Ростов на Дону: Феникс, 2006. – 720 с.
3. E. Acha. Power Electronic Control in Electrical Systems // E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. E. Miller. – Newnes. –2002. –443 p.
4. Ягуп В. Г. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем. // В. Г. Ягуп., Е. В. Ягуп. – Харьков: ХНУГХ имени А. Н. Бекетова. – 2017. – 170 с..
5. Міліх В. І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей//В. І. Міліх, Т. П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
6. Копылов И. П. Электрические машины. //И. П. Копылов – М.: Высшая школа, 2004. – 607 с.

#### References

1. Kudrin B. I. Elektrosnabzheniye promyshlennykh predpriyatiy. // B. I. Kudrin – M.: Interenet Lyuksiniring, 2006. – 672 s.
2. Gerasimenko A. A. Peredacha i raspredeleniye elek-tricheskoy energii. // A. A. Gerasimenko, V. T. Fedin – Rostov na Donu: Feniks, 2006. – 720 s.
3. E. Acha. Power Electronic Control in Electrical Systems // E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. E. Miller. – Newnes. –2002. –443 p.
4. Yagup V. G. Primeneniye optimizatsionnykh metodov dlya resheniya zadach uluchsheniya pokazateley elektricheskikh sistem. // V. G. Yagup., Ye. V. Yagup. – Khar'kov: KHNUGKH imeni A. N. Beketova. – 2017. – 170 s..
5. Milikh V. I. Yelektropostachannya promislovichk pidpriemstv: Pidruchnik dlya studentiv yelektromekhanichnikh spetsial'no-stey//V. I. Milikh, T. P. Pavlenko. – Kharkiv: FOP Panov A. M., 2016. – 272 s.
6. Kopylov I. P. Elektricheskkiye mashiny. //I. P. Kopylov – M.: Vysshaya shkola, 2004. – 607 s.

Надійшла (received) 30.10.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерий Григорьевич, Yagup Valery Grigorievich)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>; e-mail: [yagup.valery@gmail.com](mailto:yagup.valery@gmail.com)

**Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Ekaterina Valerievna)** – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: [kata3140@gmail.com](mailto:kata3140@gmail.com)

**Машин Олексій Дмитрович (Машин Алексей Дмитриевич, Mashin Alexei Dmitrovich)** – магістр, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, магістр кафедри електричного транспорту; e-mail: [mashin2004@gmail.com](mailto:mashin2004@gmail.com)

**Степанчук Максим Сергійович (Степанчук Максим Сергеевич, Stepanchuk Maxim Serhiyovych)** – магістр, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, магістр кафедри електричного транспорту; e-mail: [m.stepanchuk@bk.ru](mailto:m.stepanchuk@bk.ru)

## ЗМІСТ

<b>Бандуров С. О., Ложкін Р. С., Шишкін Г. О.</b> Аналіз областей застосування середньо-енергетичних прискорювачів електронів.....	3
<b>Безпрозванних Г. В., Кессаєв О. Г., Гаврилюк І. Ю.</b> Стенд для дослідження електричних властивостей з візуалізацією процесу поляризації активних діелектриків .....	9
<b>Безручко В. М., Буйний Р. О., Ткач В. І.</b> Інноваційний підхід до визначення місць однофазних замикань на землю в мережах 6-35 кВ при реалізації концепції smart grid в Україні.....	15
<b>Борзенков І. І., Данильченко Д. О., Лебединський І. Л., Обухов В. Р., Собченко О. В., Шевченко С. Ю.</b> Огляд методів діагностики електричних характеристик ізоляційних конструкцій повітряних ліній електропередач .....	21
<b>Босий Д. О., Земський Д. Р., Хоменко В. Р.</b> Аналітичне порівняння показників якості електроенергії за двома стандартами у мережі нетягового споживача залізниці змінного струму .....	27
<b>Буссі Ен Мішел Кассаблі Салам, Ноздрачова К. Л., Сучков Г. М., Слободчук А. Ю.</b> Новий безконтактний метод виявлення дефектів металовиробів .....	34
<b>Ганус О. І., Старков К. О., Черкашина В. В.</b> Складові перенапруг на елементах схеми заміщення трансформатора напруги .....	41
<b>Гриб О. Г., Захаренко Н. С., Карпалюк І. Т., Рудевіч Н. В., Швець С. В.</b> Моніторинг показників якості акустичним методом.....	47
<b>Гундєртайло О. В., Данилова О. А., Лисенко Л. І.</b> Реконструкція підстанції «ювілейна» з метою підвищення надійності електропостачання споживачів лисичанського енерговузла.....	52
<b>Гурин А. Г., Москвітін Є. С.</b> Зміна показників паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів в умовах довготривалої експлуатації .....	56
<b>Гурин А. Г., Щєбенюк Л. А., Голик О. В., Ільченко О. В., Родяхіна Т. А.</b> Вплив поляризації ізоляції захищених проводів на електричне поле лінії електропередачі.....	60
<b>Данилова О. А., Золотарьов Д. О., Лисенко Л. І.</b> Аналіз доцільності впровадження технології «активний будинок» в кліматичних умовах північно-східної України .....	64
<b>Довгалиук О. М., Омеляненко Г. В., Піротті О. Є., Бондаренко Р. В., Сиром'ятнікова Т. В., Яковенко І. С.</b> Оцінка заходів щодо підвищення ефективності роботи міських розподільних електричних мереж в умовах енергоринку України .....	70
<b>Золотарьов В. М., Чулєєва О. В.</b> Вплив триоксиду сурми на поширення полум'я в пожежобезпечних полімерних композиціях .....	77
<b>Ким Е. Д., Таран В. Н., Залузняя Г. В.</b> Онлайн діагностика внутрешньої ізоляції лінійних полімерних ізоляторів .....	81
<b>Костюков И. А.</b> Особенности преобразования некоторых сигналов с использованием гс цепочек.....	87
<b>Кулапін О. В., Махотіло К. В.</b> Підходи до визначення та стан розвитку концепцій інтелектуальних енергосистем і віртуальних електростанцій .....	91
<b>Ломов С. Г.</b> Топология экранных токов в силовых 3-фазных кабельных линиях .....	97
<b>Мирошник А. А., Сивенко М. М.</b> Модернизация сетей электроснабжения при помощи технологии «smartgrid» .....	103
<b>Савченко Н. А., Шевченко С. Ю.</b> Аналіз ефективності застосування кінетичних накопичувачів енергії для регулювання графіка навантаження споживача.....	107
<b>Ягун В. Г., Ягун Е. В., Абуджох Х. Дж., Марко С., Сенько А.</b> Вычисление мощности в цепи с вентиляльным элементом при её моделировании .....	111
<b>Ягун В. Г., Ягун Е. В., Машиин А. Д., Степанчук М. С.</b> Режим полной компенсации реактивной мощности в электрической системе с учетом свойств линии электропередачи .....	116

## CONTENT

<b>Bandurov S., Lozhkin R., Shyshkin G.</b> Analysis of areas of application of medium-energy electron accelerators .....	3
<b>Bezprozvannykh G., Kiessaiev O., Havrylyuk I.</b> Peculiarities investigation of the using energy accumulation systems at the traders work on the energy market of Ukraine .....	9
<b>Bezruchko V., Buinyi R., Tkach V.</b> innovative approach to determining location of the single-phase-to-earth faults in 6-35kV power networks at the implementation of the smart grid concept in Ukraine.....	15
<b>Borzenkov I., Danylchenko D., Lebedinskiy I., Obukhov V., Sobchenko O., Shevchenko S.</b> Overview of diagnostic methods of electrical characteristics of insulation structures of electric transmission overhead power lines .....	21
<b>Bosyi D., Zemskyi D., Khomenko V.</b> Analytical comparison of electricity quality indicators in non-traction consumer power network with use requirements of two standards .....	27



<b>Bussi Ep Michelle Cassable Salam, Nozdrachova K., Suchkov G., Slobodchuk A.</b> New non-contact metal defect detection method .....	34
<b>Ganus A., Starkov K., Cherkashyna V.</b> Overvoltage components on voltage transformer displacement schemes element .....	41
<b>Gryb O., Zakharenko N., Karpaliuk I., Rudevich N., Shvets S.</b> Monitoring of quality indicators by acoustic method ...	47
<b>Hundertailo O., Danylova O., Lysenko L.</b> “Yuvileina” substation reconstruction aiming at power supply reliability increase for Lisichansk energy island consumers .....	52
<b>Gurin A., Moskvitin E.</b> Changes in paper-oil power transformers insulation in long-term exploitation .....	56
<b>Gurin A., Shchebeniuk L., Golik O., Ilchenko O., Rodjachina T.</b> Effect of polarization of insulation of protected wires on electric field of power transmission line .....	60
<b>Danilova O., Zolotarev D., Lysenko L.</b> Analysis of «active house» technology implementation expediency under climatologic conditions in northeastern Ukraine .....	64
<b>Dovgalyuk O., Omelianenko H., Pirotti A., Bondarenko R., Syromyatnikova T., Yakovenko I.</b> Measures evaluation to increase the work efficiency of city distribution electric networks in conditions the Ukraine energy market .....	70
<b>Zolotaryov V., Chulieieva O.</b> Influence of surma trioxide on fluid distribution in fire protective polymer compositions .....	77
<b>Kim E., Taran V., Zaluzna G.</b> Online diagnostics of internal insulation of linear composite insulators .....	81
<b>Kostiukov I.</b> Particular qualities of some signals conversions by means of applying rc circuits .....	87
<b>Kulapin O., Makhotilo K.</b> Approaches to the definition and development state of smart grid and virtual power plants concepts .....	91
<b>Lomov S.</b> Topology of shield currents in power 3-phase cable line .....	97
<b>Miroshnyk O., Syvenko M.</b> Modernization of electricity supply networks using «smartgrid» Technology .....	103
<b>Savchenko N. Shevchenko S.</b> Analysis of efficiency of application of kinetic energy storage to adjust the consumer load schedule .....	107
<b>Yagup V., Yagup E., Abujoh H., Marco S., Senko A.</b> Calculation of power in a chain with a fan element in its modeling .....	111
<b>Yagup V., Yagup E., Mashin O., Stepanchuk M.</b> Mode of complete compensation of reactive power in electrical system taking into account the properties of the electric transfer line .....	116

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».**  
**СЕРІЯ: ЕНЕРГЕТИКА: НАДІЙНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

**Збірник наукових праць**

**№ 29 (1354) 2019**

Відповідальний редактор: Гурин А. Г., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна  
Відповідальний секретар: Федорчук С. О., НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск Шайда В. П., канд. техн. наук

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».  
Кафедра електроізоляційної та кабельної техніки  
Тел.: (057) 707-66-63, (057) 707-65-44; e-mail: majonima@gmail.com

Обл.-вид. № 53–13.

Підп. до друку 27.12.2019 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.  
Тираж 100 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Виготовлювач: ФОП Панов А.М.  
Свідоцтво серії ДК № 4847 від 06.02.2015 р.  
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6,  
тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87  
copy@vlavke.com