

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**

№ 14 (1339) 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No.14 (1339) 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. — № 14 (1339) 2019. — 83 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., аспірант, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

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

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

Томашевський Р. С., д.т.н., директор ННІ ЕЕЕ, Україна

Гриб О. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сендерович 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

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., postgraduate student, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

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

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

Tomashevskii R. S., D.Sc., director SEI EEE, Ukraine

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

Semerovich G. A., Professor, NTUU "KPI", Ukraine

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 05 липня 2019 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019

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

КОНТЕКСТНИЙ ПІДХІД ДО ЄДИНОГО ЦИФРОВОГО СЕРЕДОВИЩА ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті розглядається питання розвитку енергетики України у напрямку ускладнення єдиної мережі за рахунок збільшення кількості джерел, що підключені до мережі, збільшення відбувається за рахунок джерел які можна віднести до малої генерації, кількість одиниць малої генерації різко зросла останнім часом завдяки розвитку систем альтернативної енергетики до яких відносяться сонячні станції, вітрові станції і станції на біопаливі. Не зважаючи на технологічні складності альтернативних джерел електрики, міжнародні фінансові організації фінансують розвиток ринку таких джерел. Здебільшого це системи фотоелектричного перетворення або сонячні станції, для яких в Україні є законодавчі рішення по використанню таких джерел приватними особами, що і призводить до їхнього значного кількісного зростання. Відповідно до законодавства такі малі генеруючі джерела можуть бути підключені до мережі у варіантах що дозволяє продаж надлишків виробленої електрики і в режимах компенсації споживання без продажу надлишків в мережу. В обидвох варіантах таке підключення призводить до впливу на характеристики мережі. За таких умов необхідно прийняти заходів щодо компенсації впливу на характеристики мережі. Додатково розглядається і зміна характеру споживачів електроенергії. Електричні прилади мають більшу потужність і менший час використання, що відповідає вимогам малі споживача по зменшенню часу очікування. Такі прилади збільшують пікове навантаження на мережу, що також призводить до впливу на характеристики мережі в цілому. Зазначається, що управління мережами за умови дроблення генерації з одного боку і зміни характеристик споживачів з іншого боку може привести до складнощів управління мережею і підтримкою її характеристик. Автори звертають увагу на перспективність електроенергетичних технологій що включають цифрові рішення і можливість більш глибокого застосування цифрових технологій, які можуть привести до якісних змін енергетики в цілому.

Ключові слова: альтернативні джерела, генерація малої потужності, система цифрових підстанцій, цифрові технології

О. Г. ГРИБ, И. Т. КАРПАЛЮК, С. В. ШВЕЦ, Н. В. РУДЕВИЧ

КОНТЕКСТНИЙ ПОДХОД К ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассматривается вопрос развития энергетики Украины в направлении усложнения единой сети за счет увеличения количества источников, подключенных к сети, увеличение происходит за счет источников, которые можно отнести к малой генерации, количество единиц малой генерации резко возросло в последнее время благодаря развитию систем альтернативной энергетики к которым относятся солнечные станции, ветровые станции и станции на биотопливе. Несмотря на технологические сложности альтернативных источников электроэнергии, международные финансовые организации финансируют развитие рынка таких источников. В основном это системы фотоэлектрического преобразования или солнечные станции, для которых в Украине есть законодательные решения по использованию таких источников частными лицами, что и приводит к их значительному росту. В соответствии с законодательством такие малые генерирующие источники могут быть подключены к сети двумя вариантами: - разрешающий продажу излишков произведенной электроэнергии и в режиме компенсации потребления без продажи излишков в сеть. В обоих вариантах такое подключение приводит к влиянию на характеристики сети. При таких условиях необходимо принять меры по компенсации такого влияния. Дополнительно рассматривается и изменение характера потребителей электроэнергии. Электрические приборы имеют большую мощность и меньшее время использования, что соответствует требованиям потребителя по уменьшению времени ожидания. Такие приборы увеличивают пиковую нагрузку на сеть, что также приводит к воздействию на характеристики сети в целом. Отмечается, что управление сетями при дроблении генерации с одной стороны и изменения характеристик потребителей с другой стороны может привести к сложностям управления сетью и поддержании ее характеристик. Авторы обращают внимание на перспективность электроэнергетических технологий, включающих цифровые решения и возможность более глубокого применения цифровых технологий, которые могут привести к качественным изменениям энергетики в целом.

Ключевые слова: альтернативные источники, маломощная генерация, цифровая подстанция, цифровые технологии

О. G. GRYB, I. T. KARPALIUK, S. V. SHVETS, N. V. RUDEVICH

CONTEXT APPROACH TO THE UNIFORM DIGITAL ENVIRONMENT OF ENERGY SYSTEMS

he article deals with the development of Ukraine's energy sector in the direction of complication of a single network by increasing the number of sources connected to the network. The increase is due to sources that can be attributed to low generation. Under these conditions, it is necessary to take measures to compensate for the impact on the characteristics of the network. In addition, changes in the nature of electricity consumers are also considered. Electric appliances have more power and less time to use. Such devices increase the peak load on the network, which also affects the characteristics of the network. It is noted that the management of networks, provided that the generation of splits on the one hand and changes in the characteristics of consumers on the other hand, can lead to complexity of network management and maintenance of its characteristics. The authors draw attention to the promise of electric energy technologies that include digital solutions and the possibility of deeper application of digital technologies, which can lead to qualitative changes in the energy sector as a whole.

Key words: alternative sources, low generation, digital substation system, digital technologies

Сучасні тенденції розвитку енергетики визначені низкою напрямків, один з яких потреба в доступі до електроенергії в місцях з видаленням від електричних мереж, що визначило зростання ринку малої генерації, левову частку якої займають поршневі двигуни внутрішнього згорання. Інший напрямок визначено сильним впливом міжнародних інститутів, які

наприклад, задають тон в області зниження викидів CO₂, що створило умови для розвитку ринку зеленої енергетики – ця енергетика побудована на поновлюваних джерелах (сонячна, вітрова, біогаз та ін.) [1]. Ну і третій напрямок який має значний вплив на розвиток енергетики – це безумовно розвиток сучасних технологій що дозволив отримати джерела –

© О. Г. Грив, І. Т. Карпалюк, С. В. Швець, Н. В. Рудевич, 2019

генерація яких може знизити ціну виробленої електричної енергії і досягти кращих показників по вартості кіловат години.

Об'єднує всі ці напрямки одне – для можливості продажу електричної енергії необхідно використовувати існуючі електричні мережі, тобто наявний розвинений енергетичний ринок. За останні роки цей ринок посилюється технічно: топологія мереж продовжує розвиватися, з'явилися більш жорсткі

стандарты на якість електричної енергії, з'явилася і значно більша кількість учасників цього ринку. Слід зазначити, що тепер бажають підключитися в єдину мережу і значна кількість малих генеруючих компаній або приватних осіб, що мають генерацію і які бажають продати надлишок електричної енергії в мережу. Ринок вироблення електричної енергії має стійку тенденцію до зростання.

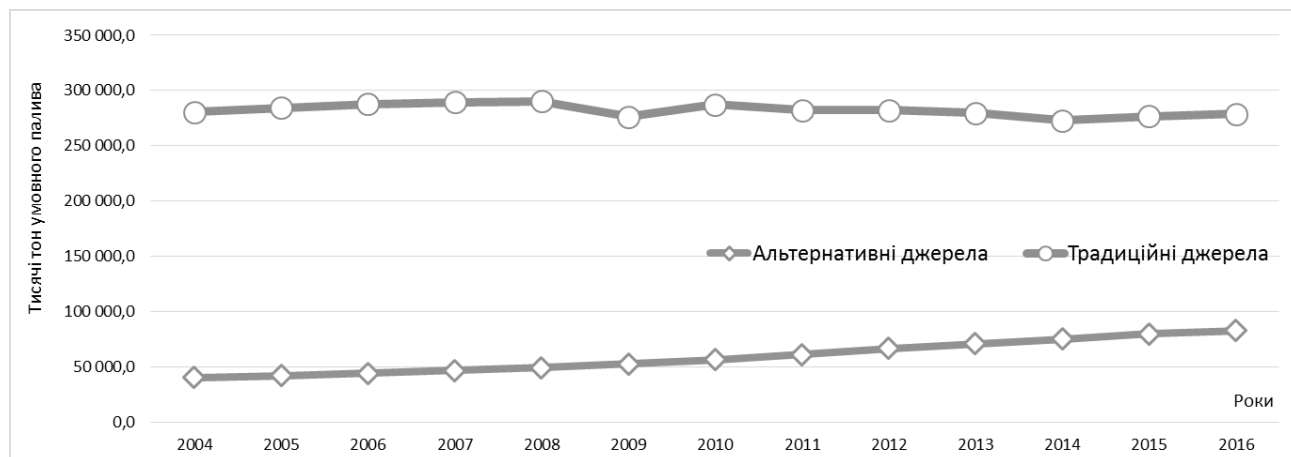


Рисунок 1 – Динаміка зростання обсягів генерації електричної енергії від традиційних і альтернативних джерел в Європі [2]

За умови значної значного зростання кількості учасників єдиної мережі, а більшість з таких учасників то є джерела малої генерації, якими керувати дуже проблематично в наслідок їх різних технічних характеристик і різного розташування [3]. Тому тепер при підключенні до єдиної електричної мережі можуть виникати питання узгодження, тобто технічні питання можливості забезпечення працездатності мережі на належному за якісними показниками рівні. У міру збільшення кількості одиниць малих генеруючих потужностей і їх частки в загальному виробленні такий негативний вплив буде зростати і буде відповідно зростати і складність управління єдиною мережею. Ймовірно, можливе виникнення такої критичної кількості малих генераційних потужностей, тобто їх

частка генерації від загально мережевої потужності може досягти значень, при яких традиційні системи підтримки параметрів мережі можуть вже не впоратися з ситуацією. Якщо врахувати, що значний відсоток малої генерації – це так звана зелена енергетика, а саме фотоелектричні перетворювачі і вітроенергетика. Які мають низькі коефіцієнти використання встановленої потужності (КВВП) [3], так для сонячних станцій (пряме фотоелектричне перетворення) КВВП = 14 %, для вітрогенераторів КВВП = 30 %. І це все при залежності від погоди, передбачити поведінку якої досить важко. Якщо порівнювати показники з традиційними джерелами то вийде наступне (див. рисунок 2).

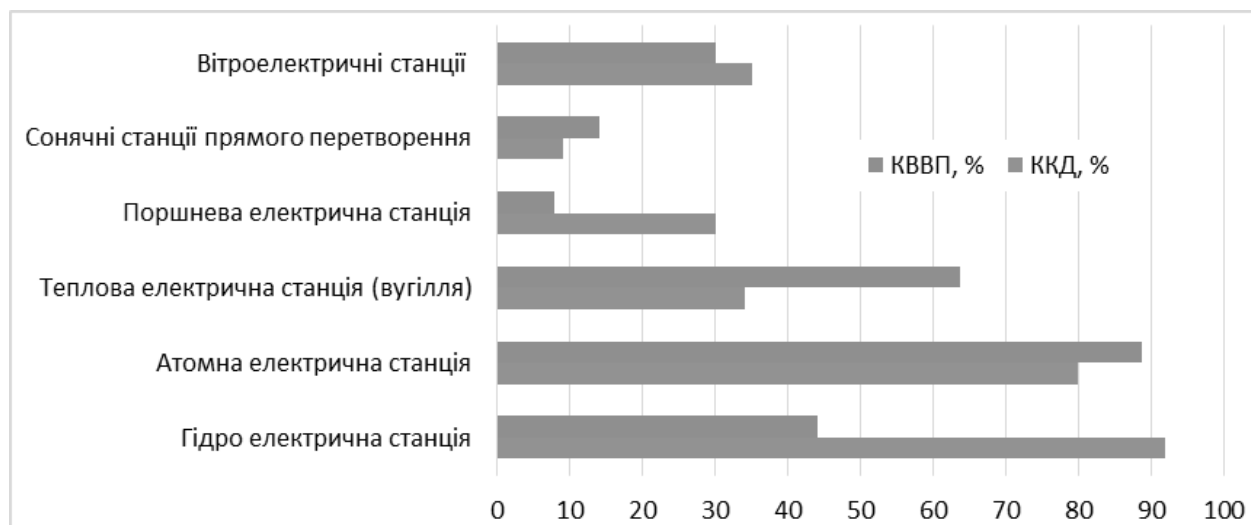


Рисунок 2 – Порівняння коефіцієнта корисної дії і коефіцієнта використання встановленої потужності для різних видів джерел

Очевидно, що узгодження джерел, що мають настільки різні технічні параметри не просте завдання. Проблема полягає ще і в складності сполучення різних за віком систем, що характерно для парку обладнання енергетичних компаній України.

Якщо врахувати, що особливість будь якої електроенергетичної системи полягає в тому, що виробництво електроенергії, її розподіл і перетворення в інші види енергії здійснюються практично в один і той же момент часу. А саме споживач і задає обсяги і графіки вироблення. В реаліях України сучасний споживач це в більшості населення, яке використовує

електроприлади потужністю часом більшою ніж визначена потужність по проекту підключення самого споживача. Наприклад, сучасна праска має потужність близько 2 кВт, що перевищує потужність по проекту для квартир в п'ятиповерхових будинках. Такий електричний прилад нагрівається досить швидко. Але ж цю потужність за короткий час він вибрав з електричної мережі. І таких приладів зараз досить багато. Тому і графік споживання рясніє піковими сплесками. Що призводить до зниження якості електричної енергії [4].

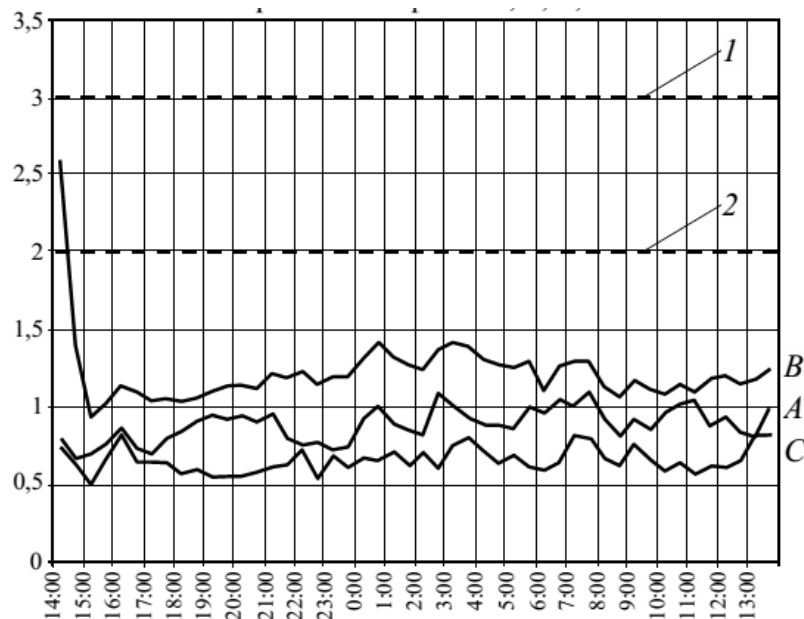


Рисунок 3 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги по фазах А, В, С, %. 1 – гранично допустима межа, 2 – нормально допустима межа.

Відповідно до вимог по споживанню має змінитися і виробництво електрики, і для розосередженої кількості малих джерел генерації із різними навантажувальними характеристиками досягти вирівнювання показників всієї мережі існуючими засобами управління мережею дуже важко.

Поставлена проблема збільшення різномірних систем генерації з одного боку і зміни характеру споживання з іншого за умови використання єдиної мережі повинна мати рішення. Треба звернути увагу на таку обставину, що зменшення кількості учасників загальної електричної мережі вже не буде відбуватися, бо міжнародні фінансові організації докладають зусиль по розвитку джерел електрики зі зменшеними показниками викидів CO₂, а це для України тільки заміна традиційних систем генерації на новітні і більш дорогі і такий процес буде відбуватися поступово із загальним збільшенням потужності альтернативних джерел.

Перше очевидне рішення полягає у використанні сучасних автоматизованих систем управління (АСУ). До завдань таких систем входить збір первинної інформації за всіма параметрами технологічного процесу енергетичної системи. Також до завдань АСУ необхідно включити завдання вимірювання, тобто

метрологічне забезпечення, і завдання управління обладнанням. Дані, які зібрані системою автоматизованого управління є важливою статистичною інформацією для верхньої ланки управлінських структур енергомереж. Тобто такі системи вже існують. Але при використанні більш сучасних систем збір інформації виконується на більш глибокому рівні, обсяги зібраної інформації зростатимуть і такі обсяги інформації мають бути структуровані певним чином. І вже в структурованому вигляді їх можна обробляти, передавати підключати до інших подібних сховищ. Обробка крупних масивів даних тепер виділена в окремий вид операцій обробки даних. Бо обсяги технологічних даних не просто значні за кількістю а дуже великі. І обробку таких значних даних має проводити спеціальне програмне забезпечення. Критерії обробки масивів даних технологічного обладнання це мінімальний час обробки, відповідна адекватність, виявлення похибки (випадковості), створення прогнозних рішень (передбачення аварійних і критичних ситуацій). Без цього етапу не можливо використання сучасних енергетичних систем.

В цілому АСУ ТП підстанції інтегрує в собі підсистему релейно захисної автоматики (РЗА),

протидії аварійної автоматики (ПА), автоматизовану інформаційно-вимірювальну систему комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), реєстратори аварійних подій (РАС), систему моніторингу та діагностики силового обладнання, систему визначення місця пошкодження (ЗМУ) кабелю, системи збору і передачі оперативної і неоперативної технологічної інформації, системи контролю якості електроенергії, інженерних і допоміжних систем. Дані за цими підрозділами мають бути зібрані в режимі реального часу. І відповідно оброблені із урахуванням взаємного впливу показників.

Очевидно, що така система на виконанні покладених на неї завдань зараз, на обладнанні що вже використовується на підстанціях, але при зростанні обсягів даних в наслідок збільшення учасників мережі застаріле обладнання очевидно не впровадиться.

Вихід із складної ситуації це використання нових технологій в електроенергетиці пов'язаних перш за все з використанням цифрових систем [5, 6]. Впровадження цифрових підстанцій дозволяє отримати цілий ряд переваг в порівнянні з традиційними підстанціями. Для виконання різних функцій на цифровій підстанції використовуються одні й ті ж джерела інформації, що призводить до зменшення загальної кількості обладнання на ній. Доступ до всієї інформації на цифровій підстанції здійснюється за допомогою уніфікованих типів даних і методів доступу, зведених у єдиний комунікаційний стандарт. Підсистеми захисту, вимірювання, управління, моніторингу стану обладнання, обліку та контролю якості електроенергії – всі вони при виконанні своїх функцій використовують одну і ту ж комунікаційну мережу, за якою отримують дані про значення струмів, напруг, положення комутаційних апаратів, приймають або передають керуючі команди. Немає необхідності в наявності індивідуальних пристроїв вимірювання, комунікації та обробки інформації для кожної з перерахованих підсистем [7].

Виходить, що пристрої автоматизації перетворюються просто в комп'ютери зі спеціалізованим ПО, а система захисту і управління цифровою підстанцією стає набором логічних програмних модулів з різним функціоналом і захищеності. В результаті віртуалізації підстанція може фізично знаходитися в одному місці, а її система управління буде розміщуватися на сервері і буде складатися з програмних модулів, які будуть відповідати за релейний захист, ПА, РАС, АСКОЕ та ін [7, 8].

При використанні такої віртуальної станції в одиночному варіанті отримання переваг не так помітні, як використання декількох таких станцій об'єднаних єдиною мережею. Ось в разі значної розвиненості такої мережі обов'язково виникне синергетичний ефект. Аналогічно як порівняння використання серії генеруючих станцій, не об'єднаних в єдину мережу і така ж група станцій, об'єднана єдиною мережею. Дві такі структури будуть мати різні якісні та економічні характеристики.

Висновок: Бурхливе зростання технологій малої генерації, (а це і альтернативна енергетика і міні і мікро енергетика на традиційних джерелах, які в силу різних причин стали широко поширені), що матимуть підключення до єдиної мережі призведуть до відчутного впливу на показники системи в цілому внаслідок чого виникнуть проблеми керованості єдиної енергетичної мережі і підтримки в цій мережі відповідних параметрів. Ймовірний вихід з розглянутої ситуації розвитку електричних мереж у напрямку збільшення кількості генеруючих джерел (за рахунок малої генерації, розташованої в різних місцях) і зміни характеристики споживачів до більш жорстких графіків споживання це використання цифрових систем збору даних і управління енергетичною системою. Такий перехід виконано на сучасних західних енергетичних мережах – використання цифрових технологій. Поки вони проявляються в технології цифрової підстанції але автори вважають, що об'єднання кількох таких підстанцій в єдину цифрову структуру призведе до якісних змін що зумовить підґрунтя до глибшого цифрового перетворення енергетики.

Список літератури

1. The Kyoto Protocol - Status of Ratification режим доступу <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/status-of-ratification>
2. Energy from renewable sources режим доступу <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
3. BP Statistical Review of World Energy 2017. – London: British Petroleum, 2018
4. International Energy Outlook 2018. Energy Information Administration. Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy. Washington, DC, 2018
5. Renewables Global Status Report 2018. RNE21, 2018
6. The Modern Grid Initiative: Modern Grid v2.0 Powering Our 21st-Century Economy. - United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2007
7. Vision and Strategy for European Electricity Networks of the future. - European Commission, 2006
8. World Energy Outlook 2018. – Paris: International Energy Agency, 2018
9. Сучасні та альтернативні енергетичні установки Навчальний посібник. О. Г. Гриб, В. А. Маляренко, В. П. Морозов, О. Д. Супрун, А. В. Хитров. - Харків: ХНАМГ, 2008
10. Зеркалов Д.В. Енергозбереження в Україні [Електронний ресурс]: У п'яти книгах. Книга друга: Організація використання енергоресурсів. Довідник/ Д. В. Зеркалов. – Електрон. дані. – К.: Основа, 2009.
11. Качество электрической энергии. Том2. «Контроль качества электрической энергии» Под ред. Гриба О. Г. – Харьков: Монография ПП«Граф-Ікс», 2014. – 244 с.
12. VASILCHENKO, V. I. et al. ЦИФРОВА ПІДСТАНЦІЯ СКЛАДОВА СИСТЕМИ "SMART GRID". Електротехніка і Електромеханіка, [S.l.], n. 6, p. 72-76, dec. 2014. ISSN 2309-3404. Доступно за адресою: <<http://eie.khpi.edu.ua/article/view/2074-272X.2014.6.13>>. Дата доступу: 27 Nov. 2018 doi:<http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2014.6.13>.
13. Гриб О. Г., Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркін А. Ф., Новський В. О., Калінчик В. П., Красінський О. Л., Довгалюк О. М., Светелік О. Д. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії/ під ред. Гриба О. Г. – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.
14. 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

15. Bykova O., Ablyazov P. Where the power industry moves? Avialable at: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671> (Accessed 24 November 2015). (Rus)

References (transliterated)

1. The Kyoto Protocol - Status of Ratification режим доступу <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/status-of-ratification>
2. Energy from renewable sources rezhyum dostupu <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
3. BP Statistical Review of World Energy 2019. – London: British Petroleum, 2018
4. International Energy Outlook 2018. Energy Information Administration. Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy. Washington, DC, 2018
5. Renewables Global Status Report 2018. RNE21, 2018
6. The Modern Grid Initiative: Modern Grid v2.0 Powering Our 21st-Century Economy. - United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2007
7. Vision and Strategy for European Electricity Networks of the future. - European Commission, 2006
8. World Energy Outlook 2018. – Paris: International Energy Agency, 2018
9. Suchasni ta alternatyvni enerhetychni ustanovky Navchalnyi posibnyk. O. H. Hryb, V. A. Maliarenko, V. P. Morozov, O. D. Suprun, A. V. Khytrov.- Kharkiv: KhNAMH, 2008

10. Zerkalov D.V. Energozberezhennia v Ukraïni [Elektronii` resurs]: U p'iati knigakh. Kniga druga: Organizatsiia vikoristannia energoresursiv. Dovidnik/ D. V. Zerkalov. – Elektron. dani. – K. : Osnova, 2009.

11. Kachestvo elektricheskoy energii. Tom2. «Kontrol kachestva elektricheskoy energii» Pod red. Griba O. G. – Harkov: Monografiya PP«Graf-Iks», 2014. – 244 s.

12. VASILCHENKO, V. I. et al. TsYFROVA PIDSTANTsIIa SKLADOVA SYSTEMY "SMART GRID". Elektrotehnika i Elektromekhanika, [S.I.], n. 6, p. 72-76, dec. 2014. ISSN 2309-3404. Dostupno za adresoiu: <<http://eie.khpi.edu.ua/article/view/2074-272X.2014.6.13>>. Data dostupu: 27 Nov. 2018 doi:<http://dx.doi.org/10.20998/2074-272X.2014.6.13>.

13. Hryb O. H., Prakhovnyk A. V., Tesyk Yu. F., Zharkin A. F., Novskiy V. O., Kalintsyk V. P., Krasinskyi O. L., Dovhaliuk O. M., Svetelik O. D. Avtomatyzovani systemy obliku ta yakosti elektrychnoi enerhii/ pid red. Hryba O. H. – Kharkiv: PP «Ranok-NT», 2012. – 516 s.

14. 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

15. Bykova O., Ablyazov P. Where the power industry moves? Avialable at: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671> (Accessed 24 November 2015). (Rus)

Надійшла (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Gryb Oleg Gerasimovich) - доктор технічних наук, професор Національний технічний університету "Харківський політехнічний інститут", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Karpaliuk Ihor Timofeevich) - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університету "Харківський політехнічний інститут", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Швец Сергій Вікторович (Швец Сергей Викторович, Shvets Sergiy Viktorovich) - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університету "Харківський політехнічний інститут", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Рудевич Наталія Валентинівна (Рудевич Наталья Валентиновна, Rudevich Natalia Valentinovna) - доктор педагогічних наук, доцент Національний технічний університету "Харківський політехнічний інститут", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Ю.Л. САЄНКО, А.В. МОЛЧАН

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ПОТОКУ НА НЕСИНУСОЇДНІСТЬ НАПРУГИ В МЕРЕЖАХ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

У статті розглянуті основні причини спотворення синусоїдності кривої напруги в мережах з вітровими установками. Обґрунтовано необхідність визначення впливу турбулентного вітрового потоку на спотворення синусоїдності кривої напруги мережі. Розроблено імітаційну модель вітрової електростанції в пакеті Simulink, як джерела несинусоїдності і коливань напруги. Детально описано структуру моделі і методи моделювання: модель розподільної мережі, моделі механічного та електричного перетворення, збурюючий вплив. Представлені результати моделювання турбулентного вітрового потоку при зміні коефіцієнта загасання кореляційної функції і середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку. Представлені результати дослідження коефіцієнта нелінійних спотворень напруги для різних значень параметрів турбулентного вітрового потоку. Отримано залежності математичного очікування і середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень від коефіцієнта загасання кореляційної функції турбулентного вітрового потоку і від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку.

Ключові слова: турбулентний вітровий потік, вітроенергетична установка, імітаційне моделювання, якість електроенергії, несинусоїдність напруги, коефіцієнт нелінійних спотворень.

Ю.Л. САЄНКО, А.В. МОЛЧАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В статье рассмотрены основные причины искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с ветровыми установками. Обоснована необходимость определения влияния турбулентного ветрового потока на искажение синусоидальной кривой напряжения сети. Разработана имитационная модель ветровой электростанции в пакете Simulink, как источника несинусоидальности и колебаний напряжений. Детально описана структура модели и методы моделирования: модель распределительной сети, модели механического и электрического преобразования, возмущающее воздействие. Представлены результаты моделирования турбулентного ветрового потока при изменении коэффициента затухания корреляционной функции и среднеквадратичного отклонения турбулентного ветрового потока. Представлены результаты исследования коэффициента нелинейных искажений напряжения для разных значений параметров турбулентного ветрового потока. Получены зависимости математического ожидания и среднеквадратического отклонения коэффициента нелинейных искажений от коэффициента затухания корреляционной функции турбулентного ветрового потока и от среднеквадратического отклонения ветрового потока.

Ключевые слова: турбулентный ветровой поток, ветроэнергетическая установка, имитационное моделирование, качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, коэффициент нелинейных искажений.

Y.L. SAYENKO, A.V. MOLCHAN

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF WIND FLOW PARAMETERS ON NONSINUSOIDAL VOLTAGE IN A NETWORK WITH DISTRIBUTED GENERATION

The article describes the main causes of the sinusoidal voltage curve distortion in networks with wind turbine. The necessity of determining the influence of the turbulent wind flow on the sinusoidal voltage curve distortion is substantiated. A simulation model of the wind power station in Simulink, as a nonsinusoidality and voltage fluctuations source has been developed. The model structure and modeling methods are described in detail: the distribution network model, mechanical and electrical conversion models, disturbing effects. The turbulent wind flow modeling results are presented when changing the damping coefficient of the correlation function and the standard deviation of a turbulent wind flow. The results of the total harmonic distortion research for different values of the turbulent wind flow parameters are presented. The dependences of the total harmonic distortion mean value and standard deviation on the damping coefficient of the correlation function and the standard deviation of a turbulent wind flow are obtained.

Keywords: turbulent wind flow, wind turbine, simulation modeling, power quality, voltage nonsinusoidality, total harmonic distortion.

Вступ. Зростання встановленої потужності джерел електроенергії з розподіленою генерацією, крім позитивного ефекту, пов'язаного зі зниженням шкідливих викидів в атмосферу, зниженням втрат електроенергії за рахунок максимальної наближеності таких джерел безпосередньо до споживачів, підвищенням ступеня резервування електропостачання і т.п., призводить і до ряду проблем, викликаних погіршенням якості електроенергії в розподільній мережі.

Наприклад, широке використання сучасних перетворювачів частоти в вітроустановках з асинхронними генераторами подвійного живлення

призводить до збільшення вмісту в кривій напруги мережі вищих гармонік, субгармонік, інтергармонік і високочастотних складових напруги з частотою в декілька кГц. Так в [1] наведені результати порівняльного моделювання основних типів вітроустановок, згідно яких джерелами спотворень гармонічного спектру напруги розподільчої мережі у вітроустановках є перетворювачі частоти.

Також, значний вплив на несинусоїдність напруги мережі в точці загального підключення вітроустановки має турбулентний вітровий потік, як збурюючий вплив для вітроустановки, тобто будь-які коливання вітру будуть відобразитися в посиленій формі на механічній

© Ю. Л. Саєнко, А. В. Молчан, 2019

потужності, переданій на вал турбіни, і звідти на вихід генератора, що призведе до коливань активної і реактивної потужності вітроустановки [2].

Високий рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі робить негативний вплив на ізоляцію електрообладнання, збільшує ризик виникнення резонансних явищ, що призводять до виходу з ладу електрообладнання (перш за все, конденсаторів, використовуваних для компенсації реактивної потужності), погіршує роботу систем зв'язку, вимірального обладнання, електронних лічильників, модулів мікропроцесорного захисту з програмованими логічними контролерами та ін. [3].

Беручи до уваги вищесказане, необхідно визначити який безпосередній вплив в спотворення синусоїдної кривої напруги мережі має турбулентний вітровий потік і яка залежність зміни коефіцієнта нелінійних спотворень кривої напруги мережі від параметрів турбулентного вітрового потоку.

Метою роботи є дослідження впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги в мережах з вітроустановками та виявлення залежності між змінами параметрів вітрового потоку і коефіцієнта нелінійних спотворень.

Імітаційне моделювання вітрової електростанції. Для детального дослідження режимів роботи вітроустановки і проблеми якості електроенергії в мережах з вітровими електростанціями в графічному середовищі Simulink була розроблена імітаційна модель вітрової електростанції, як джерела несинусоїдності і коливань напруги.

Імітаційна модель вітрової електростанції складається з моделі розподільної мережі 110/35 кВ, 35/0.69 кВ, моделі вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти, і блока, який задає збурюючий вплив для системи, тобто задає характеристики вітрового потоку.

Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink наведена на рис. 1 і представляє собою джерело змінної напруги 110 кВ, знижувальну підстанцію 110/35 кВ, підстанцію 35/0,4 кВ до якої підключене навантаження 2 МВА і підстанцію 35/0.69 кВ до якої підключена вітрова електростанція.

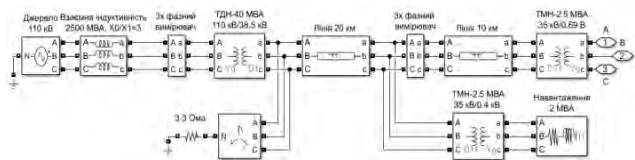


Рисунок 1 – Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink

Модель вітроустановки в графічному середовищі Simulink представлена у вигляді двох систем перетворення:

1. Механічне перетворення – перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічний обертальний момент на валу ротора генератора;

2. Електричне перетворення – перетворення обертального моменту на валу ротора генератора в електричну енергію, що віддається в мережу.

Сучасні системи механічного перетворення для всіх типів вітроустановок є практично однаковими і включають в себе: турбіну, трансмісію і систему керування. Відмінність може полягати у відсутності трансмісії. На рис. 2 наведена модель механічної системи перетворення в графічному середовищі Simulink [4].

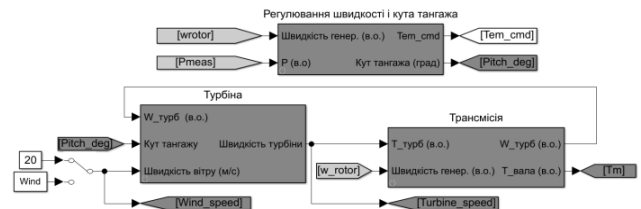


Рис. 2 – Модель системи механічного перетворення в графічному середовищі Simulink

Для моделювання роботи турбіни використовується рівняння (1), яке описує процес отримання енергії повітряного потоку [5]

$$P_M = \frac{\rho}{2} A_R V_w^3 c_p(\lambda, \beta), \quad (1)$$

- де P_M – механічна потужність турбіни (Вт);
- ρ – щільність повітря (кг/м^3);
- V_w – швидкість вітру (м/с);
- A_R – ометаєма площа несучого гвинта (м^2);
- c_p – коефіцієнт продуктивності турбіни;
- λ, β – швидкохідність турбіни і кут нахилу лопаті (град).

Залежність $c_p(\lambda, \beta)$ відображає енергетичну характеристику продуктивності турбіни. Для моделювання дану характеристику можна апроксимувати аналітичної функцією (2) [6].

$$c_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \beta - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda_1}}, \quad (2)$$

- де $c_1 = 0.5, c_2 = 116, c_3 = 0.4, c_4 = 0, c_5 = 5, c_6 = 21$

На рис. 3 наведені характеристики $c_p - \lambda$ для різних значень кута тангажу β .

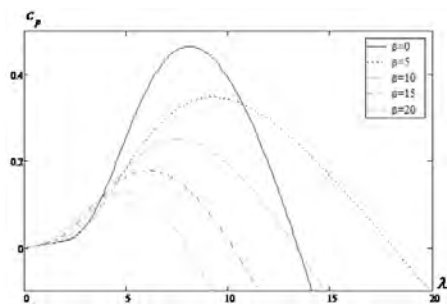


Рис. 3 – Апроксимація характеристик $c_p - \lambda$

При аналізі роботи трансмісії, згідно [7], для моделювання взаємозв'язку між високою і низькою швидкістю вала досить використовувати механічну двомасову модель. Дана модель (рис. 4) являє собою два диски, з'єднані пружиною з певною жорсткістю K_s і демпфером з коефіцієнтом демпфірування D_m . Ротор турбіни і генератор представлені коефіцієнтами інерції H_t і H_g (4-7).

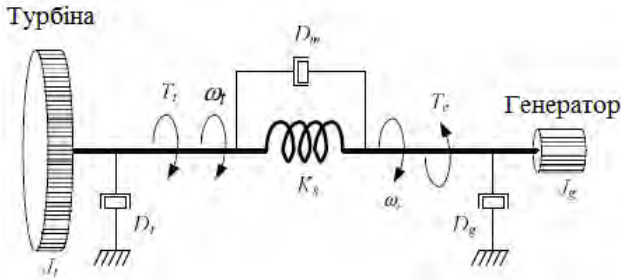


Рис. 4 – Двомасова структурна модель трансмісії

$$2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - K_s(\theta_r - \theta_t) - D_m(\omega_r - \omega_t); \quad (4)$$

$$2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = -T_e + K_s(\theta_r - \theta_t) + D_m(\omega_r - \omega_t); \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \omega_t; \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r; \quad (6)$$

де ω_t , ω_r – швидкість обертання ротора турбіни і ротора генератора;

T_t , T_g – крутний момент ротора турбіни і ротора генератора;

θ_t , θ_g – кут ротора турбіни і генератора відповідно.

Система керування турбіною визначає і регулює швидкість генератора близько значення номінальної швидкості, згладжуючи коливання електричної потужності, викликані коливаннями потужності вала турбіни. Значення номінальної швидкості зазвичай становить 1.2 в.о, проте дана величина знижується при значеннях потужності нижче 75%. Для реалізації в моделі даної поведінки системи використовується рівняння

$$\omega_{ном} = -0.67P_M^2 + 1.42P_M + 0.51, \quad (8)$$

Регулювання швидкості турбіни відбувається за рахунок зміни кута нахилу лопатей турбіни і дає можливість:

оптимізувати потужність турбіни за рахунок вилучення максимальної потужності для конкретної сили вітру (використовується при $V_{wind} < V_{ном}$);

обмежити механічну потужність турбіни, тобто зупинити роботу вітроустановки при значеннях потужності, що перевищують номінальне значення.

Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти представлена на рис. 5 і включає в себе: генератор, перетворювач частоти і систему керування перетворювачем.

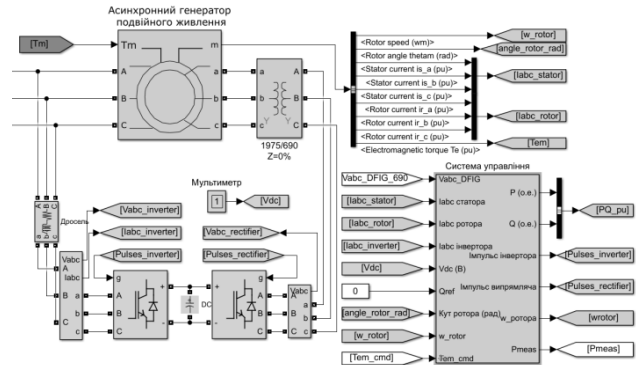


Рис. 5 – Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти

Особливістю даної концепції є застосування асинхронного генератора подвійного живлення (DFIG), що має роздільне живлення обмоток статора і ротора. Статор підключається безпосередньо в мережу, а ротор – через перетворювач частоти, що дає можливість керувати частотою обертання ротора. Даний принцип дозволяє регулювати швидкість вітроустановки в діапазоні $\pm 30\%$ від синхронної швидкості генератора, відповідно потужність перетворювача значно менше, ніж в інших типах вітроустановки, і становить (25-30)% від потужності генератора, що робить цю концепцію привабливою з економічної точки зору [8].

Перетворювач подає напругу на затискачі ротора, забезпечуючи роботу зі змінною швидкістю і незалежне керування активною і реактивною потужністю генератора.

Залежно від амплітуди і фази напруги ротора генератор може працювати в субсинхронному або понадсинхронному режимі. У субсинхронному режимі роботи перетворювач подає живлення на ротор, а при понадсинхронному потужність ротора подається через перетворювач назад в мережу. Таким чином, потік потужності в перетворювачі двонаправлений, отже перетворювач повинен складатися з самокомутованих напівпровідників, що дозволяють протікати потоку потужності в обох напрямках.

Модель генератора подвійного живлення аналогічна стандартній моделі асинхронного генератора з фазним ротором.

У вітроустановках з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти зазвичай використовують дворівневий перетворювач з ланкою постійного струму, що є комбінацією випрямляча з проміжною ланкою постійного струму і автономного інвертора [9, 10]. Даний перетворювач здатний генерувати потужність як в суб-, так і в понадсинхронному режимі, що дозволяє цій системі відслідковувати оптимальну швидкість у більшому

діапазоні швидкостей, ніж інші типи перетворювачів [11].

Залежно від поставлених завдань в дослідженні впливу вітроустановки на енергосистему застосовується дві моделі перетворювача частоти (рис. 6): точна і наближена, основна відмінність яких в представленому діапазоні частот.

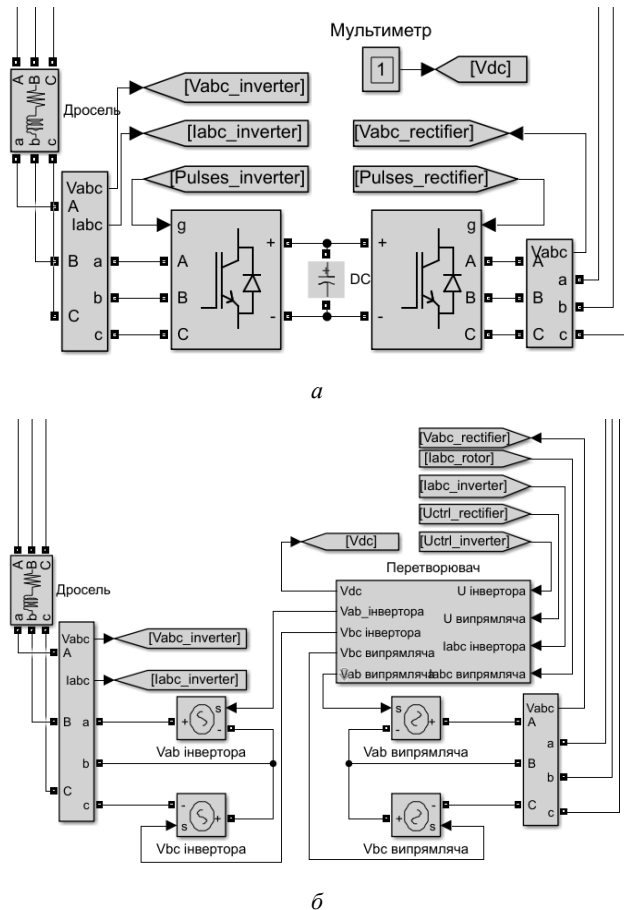


Рис. 6 – Моделі дворівневого перетворювача частоти з ланкою постійного струму: а – точна модель, б – наближена модель

Точна модель детально описує роботу перетворювача частоти на IGBT транзисторах, що дозволяє спостерігати динаміку роботи системи керування і досліджувати несинусоїдність напруги. Для досягнення прийнятної точності моделювання необхідно здійснювати з відносно малим кроком дискретизації $\Delta t = 5 \mu\text{с}$.

У наближеній моделі детальне уявлення перетворювача частоти на IGBT транзисторах замінюється на еквівалентні джерела напруги, що генерують усереднене значення змінної напруги за один цикл перемикання. Точності даної моделі досить для дослідження динаміки роботи системи керування і дослідження несиметрії струмів і напруг, проте вона не відображає гармонійні коливання. Крок дискретизації для цієї моделі може бути збільшений до мілісекунд, що дозволить провести моделювання для більшого проміжку часу.

Система керування перетворювачем реалізована за допомогою методу векторного керування в системі

координат d-q окремо для системи керування випрямляча (СКВ) і системи керування інвертора (СКІ). СКІ регулює напругу ланки постійного струму і оптимізує потоки реактивної потужності між СКВ і СКІ в сталому режимі і при збоях в мережі. СКВ контролює активну і реактивну потужність вітроустановки, і відстежує швидкість генератора для оптимальної генерації енергії в залежності від швидкості вітру.

Збурюючий вплив в моделі вітрової електростанції задається за допомогою блока зчитування даних з робочого простору середовища програмування MATLAB «From workspace». В якості збурюючого впливу вітроустановки використовуються результати моделювання турбулентного вітрового потоку, яке було виконано в середовищі програмування MATLAB.

В якості основної характеристики при моделюванні турбулентного вітрового потоку використовується кореляційна функція, отримана шляхом апроксимації спектральної щільності моделі Каймала, яка має достатню точність, відповідає вимогам і рекомендована міжнародним стандартом [2,5]. Кореляційна функція моделі Каймала має вигляд

$$K_1(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}, \quad (9)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення кореляційної функції,

α – коефіцієнт загасання кореляційної функції.

Запропонований алгоритм моделювання турбулентного вітрового потоку заснований на моделюванні за допомогою рекурентних різницьових рівнянь, який придатний для моделювання випадкових процесів з раціональним спектром. В основі даного алгоритму лежить лінійне перетворення дискретного білого шуму $x(i)$ з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією в послідовність, корельовану за нормальним законом розподілу [2, 12]. Для реалізації даного алгоритму використовується рівняння

$$v(i) = a_0 x(i) + a_1 x(i-1) - b_1 v(i-1) - b_2 v(i-2) \quad (10)$$

де a_0, a_1, b_1, b_2 – параметри алгоритму

Вихідними даними для моделювання є: середня швидкість вітру в регіоні V_{cp} ; середньоквадратичне відхилення σ , залежне від категорії турбулентності; коефіцієнт загасання кореляційною функцією α , кроку дискретизації Δt [2].

Результати моделювання. Моделювання турбулентного вітрового потоку проводилось для різних значень коефіцієнта загасання кореляційної функції та середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку на інтервалі часу $t=40$ с з кроком дискретизації $\Delta t=0,1$ с. При оцінці результатів моделювання були виключені початкові 10 секунд через протікання перехідного процесу.

Нижче наведено приклади моделювання турбулентного вітрового потоку для коефіцієнта

загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$ (рис.7) і для середньоквадратичного відхилення кореляційної функції $\sigma_V = 3.5$ м/с (рис.8).

Для досягнення прийнятної точності результатів моделювання при дослідженні несинусоїдності напруги, моделювання роботи вітроустановки в графічному середовищі Simulink здійснювалось з відносно малим кроком дискретизації $\Delta t = 5$ мкс. Приклад вимірних 3-хфазних струмів та напруг мережі на стороні 35 кВ в точці загального підключення для коефіцієнта загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$ наведено на рис. 9 у в.о.. Результати моделювання зберігаються у вигляді масиву даних в робочому просторі середовища програмування MATLAB для подальшої обробки.

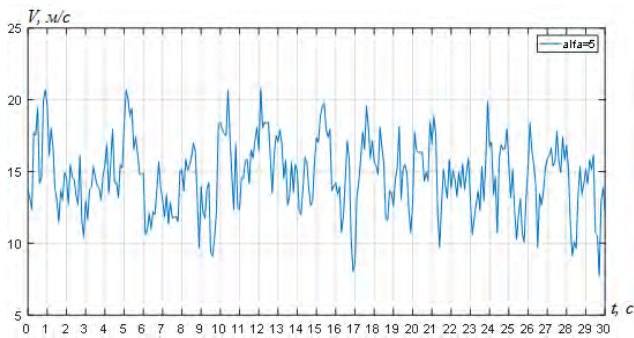


Рис. 7 – Змодельований турбулентний вітровий потік при коефіцієнті загасання кореляційної функції $\alpha_V = 5$;

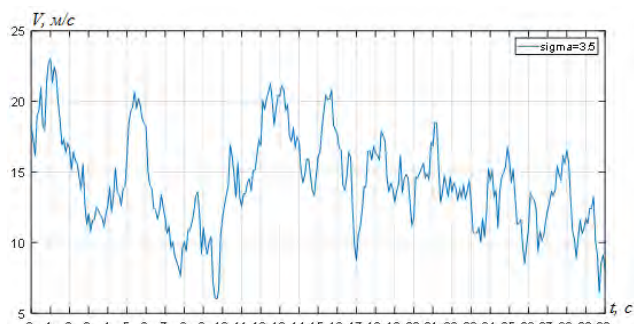
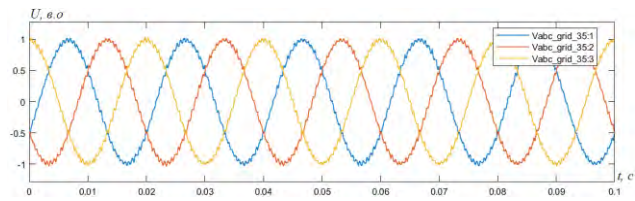


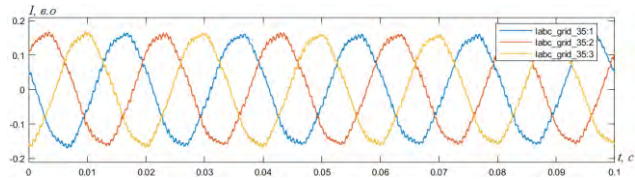
Рис. 8 – Змодельований турбулентний вітровий потік при середньоквадратичному відхиленні $\sigma_V = 3.5$ м/с.

Дослідження несинусоїдності напруги мережі на стороні 35 кВ при зміні коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V та середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку σ_V проводились в робочому просторі середовища програмування MATLAB за допомогою вбудованого алгоритму швидкого перетворення Фур'є. Алгоритм виконувався на інтервалі часу $t = 30$ с для кожних десяти періодів послідовно і визначав коефіцієнт нелінійних спотворень, згідно [13], до 40 гармоніки.

Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V наведені на рис. 10.



а



б

Рис. 9 – Параметри мережі 35 кВ в точці загального підключення:

а – 3-х фазні напруги; б – 3-х фазні струми.

Для оцінки впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги мережі на стороні 35 кВ були отримані залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку α_V (рис. 11, 12).

Як видно з рис. 11 та 12, при збільшенні значення коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V значення математичного очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги має незначні зміни, проте значення середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги істотно змінюється, тобто при збільшенні швидкості коливань турбулентності вітрового потоку збільшується рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі.

Проаналізуємо, також, вплив середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V на коефіцієнт нелінійних спотворень напруги.

Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V наведені на рис. 13.

Для оцінки впливу турбулентного вітрового потоку на несинусоїдність напруги мережі на стороні 35 кВ були отримані залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V (рис. 14, 15).

Як видно з рис. 14 та 15, зміни значення математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги при збільшенні значення середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V мають той же характер, як і при збільшенні значення коефіцієнта загасання збільшенні значення коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V : значення математичного очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги має незначні зміни, проте значення середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень

напруги істотно змінюється. Тобто, при збільшенні розмаху коливань турбулентності вітрового потоку

збільшується рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі.

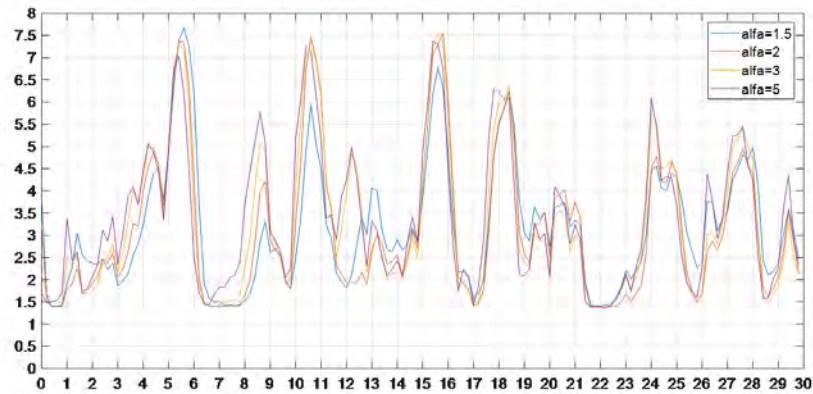


Рис. 10 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень коефіцієнта загасання кореляційної функції

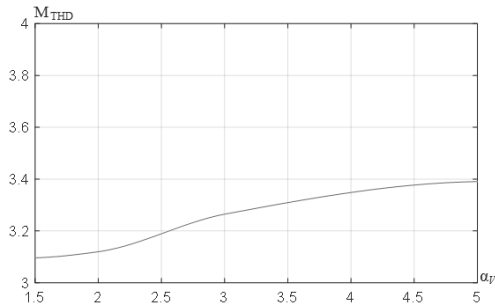


Рис. 11 – Зміни математичного очікування коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку

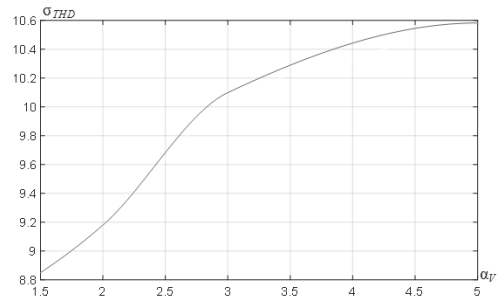


Рис. 12 – Зміни середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку

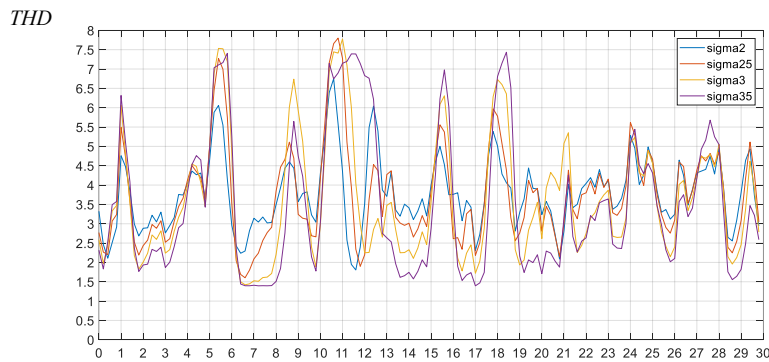


Рис. 13 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

t, c

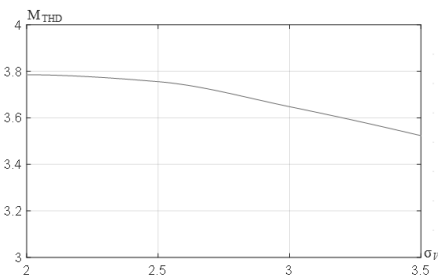


Рис. 14 – Зміни математичного очікування коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

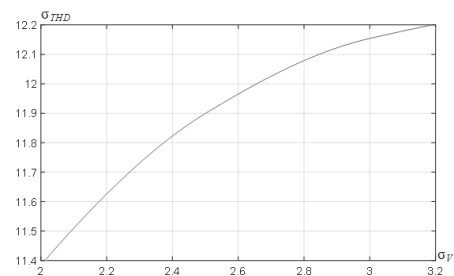


Рис. 15 – Зміни середньоквадратичного відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку

Висновки. 1. Розроблена імітаційна модель вітрової електростанції в пакеті Simulink, яка дозволяє проводити дослідження несинусоїдності і коливань напруги мережі в точці загального підключення.

2. Отримано залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від коефіцієнта загасання кореляційної функції вітрового потоку α_V виходячи з яких збільшення швидкості коливань турбулентності вітрового потоку призводить до збільшення спотворень синусоїдності кривої напруги мережі.

3. Залежності математичного очікування M_{THD} та середньоквадратичного відхилення σ_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги від середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V свідчать про незначний вплив коливань швидкості вітрового потоку на математичне очікування M_{THD} коефіцієнта нелінійних спотворень напруги. В той же час збільшення розмаху коливань турбулентності вітрового суттєво впливає на відхилення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги відносно його математичного очікування M_{THD} .

Список літератури

1. Duong, M. Q., Le K. H., Grimaccia, F., Leva S., Mussetta M., Zich R. Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbine. IEEE 16th international conference on harmonics and quality of power, 2014, pp. 669-673.
2. Саенко Ю. Л., Молчан А. В. Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов при моделировании работы ветрогенераторов. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2017. Вип. 4/2017 (40). С. 61–67.
3. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л., Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. Москва: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
4. Erich Hau. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition. Heidelberg; Springer-Verlag Berlin, 2006. 783 p.
5. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
6. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
7. IEC 61400-27-1:2015 Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines
8. Ackermann T. Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 2012. 691 p.
9. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.. Power electronics converters for wind turbine systems. IEEE transactions on industry applications, 2012. pp. 708-719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2181290>
10. Blaabjerg F., Iov F., Chen Z., Ma K.. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. 2010 IEEE International Energy

Conference . 2010.

11. Rocabert, J., Luna A., Blaabjerg F., Rodriguez P.. Control of power converters in ac microgrids. IEEE transactions power Electronics. 2012. p. 4734-4749

12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. СПб.:БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

13. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності / Нац. стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

References (transliterated)

1. Duong, M. Q., Le K. H., Grimaccia, F., Leva S., Mussetta M., Zich R. Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbine. IEEE 16th international conference on harmonics and quality of power, 2014, pp. 669-673.
2. Sayenko Y. L., Molchan A. V. Primenenie spektralno-korrelyacionnoy teorii sluchaynih processov pri modelirovanii raboti vetrogeneratora [Application of the spectral-correlation theory of random processes in modeling the operation of wind generators]. *Elektromehanični i energozberigayuchi sistemy*. 2017, vol. 4/2017 (40), pp. 61–67.
3. Zhezhelienko I. V., Sayenko Y. L., Kachestvo elektroenergii na promishlennykh predpriyatiyah [Power quality in industrial enterprise]. Moscow: Energoatomizdat Publ, 2005. 261 p.
4. Erich Hau. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition. Heidelberg; Springer-Verlag Berlin, 2006. 783 p.
5. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
6. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
7. IEC 61400-27-1:2015 Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines
8. Ackermann T. Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 2012. 691 p.
9. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.. Power electronics converters for wind turbine systems. IEEE transactions on industry applications, 2012. pp. 708-719. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2181290>
10. Blaabjerg F., Iov F., Chen Z., Ma K.. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. 2010 IEEE International Energy Conference . 2010.
11. Rocabert, J., Luna A., Blaabjerg F., Rodriguez P.. Control of power converters in ac microgrids. IEEE transactions power Electronics. 2012. p. 4734-4749
12. Sergienko A.B. Tsifrova obrabotka signalov; uchebnoe posobie [Digital signal processing; study guide]. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p.
13. DSTU: EN 50160-2014 *Harakteristika naprugi elektropostachannya v elektrichnih merezhah zagalnogo priznachennya* [State Standard EN 50160-2014. Characteristics of power supply voltage in electric networks of general purpose] / Kyiv: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2014. 27 p.

Надійшла (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саенко Юрій Леонідович (Саенко Юрий Леонидович, Sayenko Yuriy) – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», декан енергетичного факультету; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>; e-mail: yls62@i.ua

Молчан Андрій Валерійович (Молчан Андрей Валериевич, Molchan Andrii) – аспірант, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», асистент кафедри електроенергетичних комплексів та систем; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7399-2694>; e-mail: andre.molchan@gmail.com

Ю. Л. САЄНКО, Т. К. БАРАНЕНКО

ВИБІР ВИДУ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ЗМІНИ СТРУМУ РІЗКОЗМІННОГО НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Досліджено вплив на електромагнітні показники електричної мережі виду кореляційної функції, використовуваної для моделювання випадкового процесу зміни струму різкозмінного нелінійного навантаження у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази на прикладі дугової сталеплавильної печі. Зроблено висновки про можливість використання будь-якого з трьох розглянутих видів кореляційних функцій (експоненційної, експоненційно-косинусної або експоненційно-косинусно-синусної) в разі моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження при дослідженні питань, пов'язаних з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин електроустановки при протіканні несинусоїдного струму і оцінкою параметрів електромагнітної сумісності. Показано, що при дослідженні процесів, пов'язаних з нагріванням провідників і струмоведучих частин електроустановки в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, можлива заміна одного виду кореляційної функції модульованого випадкового процесу іншим за умови рівності площ під кривими взаємозамінних кореляційних функцій; при розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності, для моделювання випадкового процесу повинна використовуватися тільки експоненційно-косинусно-синусна кореляційна функція, що забезпечує умову диференційовності модульованого випадкового процесу. Всі висновки, отримані на прикладі моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження при роботі дугової сталеплавильної печі, поширюються на моделювання випадкових процесів при роботі будь-яких інших видів різкозмінних нелінійних навантажень.

Ключові слова: моделювання, випадковий процес, кореляційна функція, несинусоїдність, нагрів, електромагнітна сумісність, компенсація реактивної потужності.

Ю. Л. САЄНКО, Т. К. БАРАНЕНКО

ВЫБОР ВИДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Исследовано влияние на электромагнитные показатели электрической сети вида корреляционной функции, используемой для моделирования случайного процесса изменения тока резкопеременной нелинейной нагрузки в виде амплитудно-модулированного колебания со случайным законом изменения амплитуды и начальной фазы на примере дуговой сталеплавильной печи. Сделаны выводы о возможности использования любого из трех рассмотренных видов корреляционных функций (экспоненциальной, экспоненциально-косинусной или экспоненциально-косинусно-синусной) в случае моделирования случайного процесса изменения тока нагрузки при исследовании вопросов, связанных с явлением нагрева проводников и токоведущих частей электрооборудования при протекании несинусоидального тока и оценкой параметров электромагнитной совместимости. Показано, что при исследовании процессов, связанных с нагревом проводников и токоведущих частей электрооборудования в электрических сетях с резкопеременными нелинейными нагрузками, возможна замена одного вида корреляционной функции модулирующего случайного процесса другим при условии равенства площадей под кривыми взаимозаменяемых корреляционных функций; при решении задач, связанных с компенсацией реактивной мощности для моделирования случайного процесса должна использоваться только экспоненциально-косинусно-синусная корреляционная функция, обеспечивающая условие дифференцируемости модулирующего случайного процесса. Все выводы, полученные на примере моделирования случайного процесса изменения тока нагрузки при работе дуговой сталеплавильной печи, распространяются на моделирование случайных процессов при работе любых других видов резкопеременных нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: моделирование, случайный процесс, корреляционная функция, несинусоидальность, нагрев, электромагнитная совместимость, компенсация реактивной мощности.

Y. L. SAYENKO, T. K. BARANENKO

CHOICE OF THE CORRELATION FUNCTIONS FOR RANDOM PROCESS SIMULATION OF RAPID-CHANGING NONLINEAR LOAD CURRENT

The influence of the type of correlation function used for a random process simulation of a non-linear load current as the amplitude-modulated oscillation with a random law of variation of the amplitude and initial phase on the electromagnetic indices of the electrical network was studied using the example of an electric steel-melting furnace. Conclusions about possibility of using any of the three considered types of correlation functions (exponential, exponential-cosine or exponential-cosine-sine) in the case of simulating a random process of rapid-changing load current when studying issues related to the phenomenon of heating of conductors by non-sinusoidal currents and evaluation of electromagnetic compatibility parameters. It is shown that in the study of processes associated with heating of conductors and current-carrying parts of electrical equipment in electric networks with rapid-changing non-linear loads, it is possible to replace one type of correlation function of a modulating random process with another, provided that the areas under the interchangeable correlation functions are equal; when solving problems related to reactive power compensation, only an exponential-cosine-sine correlation function should be used to simulate a random process, providing the condition of differentiability of the modulating random process. All conclusions obtained on the example of the random process simulation of the rapid-changing load current during the operation of an electric steel arc furnace are applied to the simulation of random processes during the operation of any other types of rapid-changing non-linear loads.

Keywords: simulation, random process, correlation function, non-sinusoidality, heating, electromagnetic compatibility, reactive power compensation.

Постановка проблеми. При роботі різкозмінних нелінійних навантажень, таких як дугові сталеплавильні печі, зварювальні установки, приводи прокатних станів і т. п. відбувається спотворення кривої споживаного струму, амплітудний спектр якого містить як вищі гармонійні складові, так і

© Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, 2019

інтергармоніки. У зв'язку з тим, що на сучасних промислових підприємствах спостерігається тенденція до зростання подібних навантажень, актуальним завданням є розробка універсального підходу до моделювання випадкового процесу зміни споживаного струму різкозмінними нелінійними навантаженнями. Змодельований випадковий процес повинен забезпечити можливість здійснювати на його основі інженерні дослідження в області широкого кола завдань, що пред'являють різні вимоги до імовірнісних характеристик випадкового процесу зміни струму навантаження.

Аналіз публікацій. Завданням моделювання випадкового процесу зміни струму є відображення реальних електромагнітних процесів, що протікають в електричній мережі при роботі різкозмінного нелінійного навантаження. Так дугова сталеплавильна піч є джерелом спотворення синусоїдності кривої струму і напруги, джерелом несиметрії та коливань напруги, потужним споживачем реактивної потужності, що в цілому знижує енергоефективність і надійність системи електропостачання і вимагає впровадження відповідних заходів. Розроблено цілу низку математичних моделей дугової сталеплавильної печі і її параметрів, призначених для дослідження окремих видів електромагнітних завод [1–3]. Для комплексного дослідження впливу дугової сталеплавильної печі на систему електропостачання необхідна універсальна математична модель, що дозволяє проводити як аналітичні дослідження, так і дослідження шляхом імітаційного моделювання [4–6]. Доцільно використовувати в якості такої універсальної математичної моделі уявлення кривої струму у вигляді амплітудно-модульованого коливання [5, 7]. Амплітудно-модульоване коливання являє собою випадковий процес, для моделювання якого необхідний вибір відповідної кореляційної функції.

Мета роботи. Метою цієї роботи є розробка рекомендацій щодо вибору виду кореляційної функції при моделюванні випадкового процесу зміни струму, споживаного різкозмінним нелінійним навантаженням, з урахуванням електромагнітних процесів, що протікають в системі електропостачання.

Виклад основного матеріалу. Представимо несинусоїдну криву струму, що містить як вищі гармонійні складові, так і інтергармоніки, у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази [8]

$$i(t) = (\xi(t) + 1) \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin(v\omega_0 t + \varphi_v) = (\xi(t) + 1) i^*(t), \quad (1)$$

де $\xi(t)$ – центрований стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним очікуванням і заданою кореляційною функцією;

I_{mv} – постійні амплітуди;

ω_0 – кутова частота;

φ_v – взаємно незалежні випадкові початкові фази, рівномірно розподілені на інтервалі $(-\pi, \pi)$;

$i^*(t)$ – струм навантаження, що містить основну та вищі гармоніки;

v – номер вищої гармоніки.

$$i^*(t) = \sum_{v=1}^{\infty} I_{mv} \sin(v\omega_0 t + \varphi_v) \quad (2)$$

Кореляційна функція випадкового процесу струму нелінійного навантаження $i(t)$ має вигляд

$$K_i(\tau) = [K_{\xi}(\tau) + 1] \sum_{v=1}^{\infty} D_v \cos v\omega_0 \tau \quad (3)$$

де $K_{\xi}(\tau)$ – задана кореляційна функція модульовального випадкового процесу $\xi(t)$;

D_v – дисперсія v -ої гармоніки, $D_v = I_{mv}^2 / 2$.

Модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ в більшості випадків може характеризуватися однією з трьох видів кореляційних функцій:

- експоненційною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|}; \quad (4)$$

- експоненційно-косинусною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau; \quad (5)$$

- експоненційно-косинусно-синусною

$$K_{\xi}(\tau) = D_{\xi} e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right), \quad (6)$$

де D_{ξ} – дисперсія коливань струму;

α – коефіцієнт загасання кореляційної функції.

Вибір конкретного виду кореляційної функції $K_{\xi}(\tau)$ буде залежати від розв'язуваної задачі. Так при розв'язанні кола завдань, пов'язаних з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин електроустаткування при протіканні несинусоїдного струму, кореляційна функція $K_{\xi}(\tau)$ в більшості випадків може бути представлена будь-яким з трьох видів (4) – (6). При цьому імовірнісна оцінка процесів нагріву струмоведучих частин може бути виконана по спектральній щільності струму, пов'язаної з кореляційною функцією перетворенням Фур'є. При моделюванні випадкових процесів для дослідження явищ нагріву можлива заміна одного виду кореляційної функції іншим, так як визначальним фактором в даному випадку є енергія випадкового процесу, яка пов'язана з площею під кривою кореляційної функції. Наприклад, при заміні експоненційно-косинусної

кореляційної функції виду (5) на експоненційну виду (4) її еквівалентний коефіцієнт загасання $\alpha_{ек}$ буде визначатися виразом, знайденим виходячи з рівності площ під кривими кореляційних функцій виду (4) і (5), [9]

$$\alpha_{ек} = \alpha + \frac{\omega_0^2}{\alpha}, \quad (7)$$

де α і ω_0 – параметри вихідної експоненційно-косинусної кореляційної функції.

При розв'язанні низки задач, пов'язаних безпосередньо з оцінкою параметрів електромагнітної сумісності при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, для моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження також можливе застосування будь-якої з трьох кореляційних функцій (4) – (6). Як приклад на рис. 1, а наведено одну з реалізацій кривої мережного струму фази А дугової сталеплавильної печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання відповідно до виразу (1). Модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ заданий експоненційною кореляційною функцією виду (4), де дисперсія коливань струму $D_\xi = 9330 \text{ A}^2$, а коефіцієнт загасання $\alpha = 1,47 \text{ c}^{-1}$. На рис. 1, б наведено відповідний амплітудний спектр кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є безпосередньо по змодельованому графіку струму.

На рис. 2, а наведено одну з реалізацій кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання, де модульовальний випадковий процес $\xi(t)$ заданий експоненційно-косинусною кореляційною функцією виду (5) з параметрами: $D_\xi = 9330 \text{ A}^2$, $\alpha = 1,47 \text{ c}^{-1}$, $\omega_0 = 2,69 \text{ c}^{-1}$. На рис. 2, б наведено відповідний амплітудний спектр.

На рис. 3, а наведено реалізацію кривої мережного струму фази А печі ДСП-100, що представляє собою амплітудно-модульоване коливання, де модульовальний випадковий процес заданий експоненційно-косинусно-синусною кореляційною функцією виду (6) з такими ж параметрами, як і в випадку з експоненційно-косинусною кореляційною функцією. На рис. 3, б наведено відповідний амплітудний спектр.

В результаті численних досліджень було отримано, що при заданих параметрах випадкового процесу математичне очікування коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму $M[K_I]$ склало:

- при використанні експоненційної кореляційної функції $M[K_I] = 15,7 \%$;
- при використанні експоненційно-косинусної кореляційної функції $M[K_I] = 17,3 \%$;
- при використанні експоненційно-косинусно-синусної кореляційної функції $M[K_I] = 15,6 \%$.

Необхідно зазначити, що кореляційні функції кривих струмів, споживаних дуговими сталеплавильними печами, найкраще апроксимуються експоненційно-косинусними кореляційними функціями. Таким чином, похибка оцінки коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму при

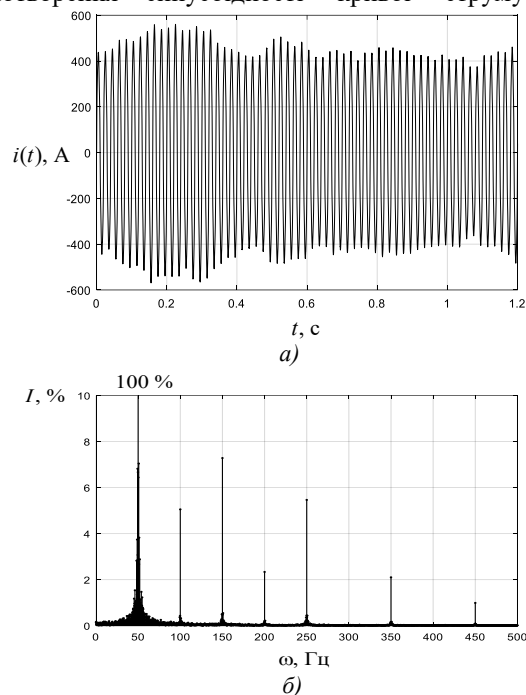


Рис. 1. Змодельована крива мережного струму фази А печі ДСП-100 а і відповідний амплітудний спектр (б) у випадку з експоненційною кореляційною функцією

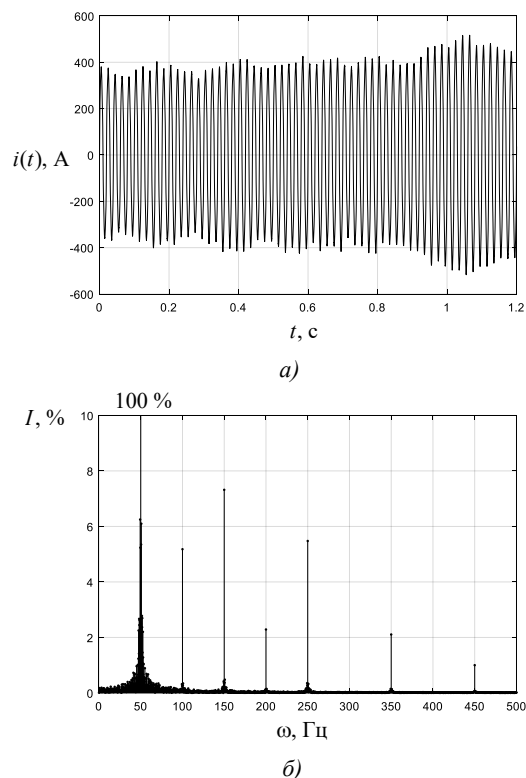


Рис. 2. Змодельована крива мережного струму фази А печі ДСП-100 а і відповідний амплітудний спектр (б) у випадку з експоненційно-косинусною кореляційною функцією

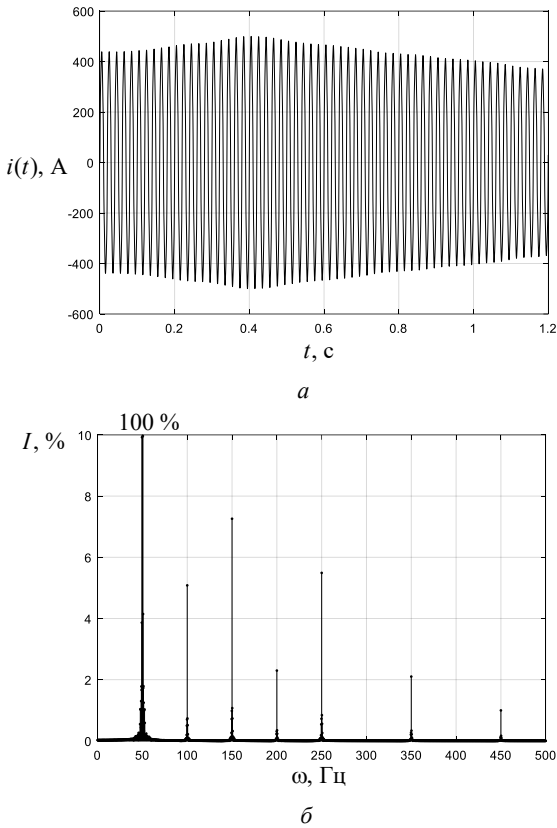


Рис. 3. Змодельована крива мережного струму фази А печі ДСП-100 а) і відповідний амплітудний спектр б) у випадку з експоненційно-косинусно-синусною кореляційною функцією

використанні різних видів кореляційних функцій для моделювання одного і того ж випадкового процесу зміни струму навантаження ДСП не перевищила 10 %. Такий результат дозволяє зробити висновок, що при проведенні різних досліджень шляхом моделювання випадкового процесу зміни струму навантаження ДСП, можливе застосування будь-якого з видів кореляційних функцій (4) – (6) в залежності від розв'язуваного кола завдань.

Однак при дослідженні проблеми електромагнітної сумісності при роботі дугових сталеплавильних печей шляхом моделювання випадкових процесів змін струмів навантажень такий підхід, як заміна одного виду кореляційної функції іншим, заснована на рівності площ під кривими кореляційних функцій, як правило, є неприйнятним. Це пов'язано з тим, що визначальним фактором, який впливає на величину коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму, є не енергія випадкового процесу зміни струму навантаження, а швидкість його зміни, яка характеризується параметрами кореляційної функції. Результати досліджень показали, що зі збільшенням коефіцієнта загасання α і кутової частоти кореляційної функції ω_0 зростає і коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму. Тоді при заміні експоненційно-косинусної кореляційної функції виду (5) на експоненційну виду (4) і визначенні еквівалентного коефіцієнта загасання $\alpha_{ек}$ за виразом

(7), може бути отримана завищена оцінка коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму.

При розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, необхідно виконання умови диференційовності випадкового процесу $\xi(t)$. Математичне сподівання потужності батареї конденсаторів $M[Q_{БК}]$ може бути знайдено, застосовуючи метод лінеаризації випадкових процесів, за виразом [10]

$$M[Q_{БК}] = \frac{(1 - aD_{\xi'})U_{ном}^2 \sum_{v=1}^{\infty} vU_v I_v \sin \varphi_v}{(1 + a^2 D_{\xi'}) \sum_{v=1}^{\infty} v^2 U_v^2 + a^2 D_{\xi'} \sum_{v=1}^{\infty} v^2 U_v^2}, \quad (8)$$

де a – коефіцієнт, який визначається відношенням потужності навантаження S_H до потужності короткого замикання $S_{кз}$, $a = S_H / S_{кз}$;

U_v, I_v – діючі значення v -их гармонійних складових напруги і струму відповідно;

φ_v – кут зсуву фаз v -их гармонік напруги і струму;

$D_{\xi'}$ – дисперсія похідної центрованого стаціонарного випадкового процесу $\xi(t)$.

Умовою диференційовності випадкового процесу $\xi(t)$ є безперервність похідної його кореляційної функції в околі точки $\tau = 0$. Цій вимозі задовольняє експоненційно-косинусно-синусна кореляційна функція виду (6). Тоді дисперсія похідної процесу $\xi(t)$

$$\begin{aligned} D_{\xi'} &= - \left. \frac{d^2 K_{\xi}(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} = \\ &= D_{\xi} \left(\alpha^2 + \omega_0^2 \right) e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right) \Bigg|_{\tau=0} = \\ &= D_{\xi} \left(\alpha^2 + \omega_0^2 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Необхідно відзначити, що всі висновки, зроблені на підставі аналізу кривих струмів при роботі дугових сталеплавильних печей, поширюються на аналіз параметрів режимів при роботі будь-яких видів різкозмінних нелінійних навантажень.

Висновки. 1. При дослідженні несинусоїдних режимів, що виникають в електричних мережах при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, несинусоїдна крива струму може бути представлена у вигляді амплітудно-модульованого коливання з випадковим законом зміни амплітуди і початкової фази, де модуляція здійснюється за допомогою центрованого стаціонарного випадкового процесу із заданою кореляційною функцією.

2. При розв'язанні завдань, пов'язаних як з явищем нагріву провідників і струмоведучих частин

електроустаткування при протіканні несинусоїдного струму, так і з оцінкою параметрів електромагнітної сумісності при роботі різкозмінних нелінійних навантажень, кореляційна функція модульовального випадкового процесу може бути представлена будь-яким з трьох видів відповідно до виразів (4) – (6). Однак при дослідженні процесів, пов'язаних з нагріванням провідників і струмоведучих частин електроустаткування, можлива заміна одного виду кореляційної функції модульовального випадкового процесу іншим; при дослідженні ж проблеми електромагнітної сумісності така заміна виявляється неприйнятною.

3. При розв'язанні завдань, пов'язаних з компенсацією реактивної потужності в електричних мережах з різкозмінними нелінійними навантаженнями, кореляційна функція модульовального випадкового процесу повинна мати безперервну похідну в околиці точки $\tau = 0$ для забезпечення умови диференційовності випадкового процесу. Цій вимозі відповідає кореляційна функція виду (6).

Список літератури

1. Mokhtari H. A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB / H. Mokhtari, M. Hejri // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – 2002. – no. 3. – P. 2078–2083.
2. Kang J. Analysis on AC electric Arc Furnace Flicker and Its Influencing Factors / J. Kang, Z. G. Shao et al. // Journal of Electric Power Science and Technology. – 2010. – no. 25. – P. 66–71.
3. Залужный М. Ю. Моделирование потерь в электротехнологическом комплексе при совместной работе дуговых сталеплавильных печей / М. Ю. Залужный // Донецьк: Наукові праці ДонНТУ серія: “Електротехніка і енергетика”. – 2013. – №1(14). – С.100–103.
4. Kang J. Research on Sampling Frequency of Flicker Measurement / W. Kang, X. W. Yan et al. // Electrical Measurement & Instrumentation. – 2009. – no. 46. P. 1–5.
5. Zhang Lixia. A Practical Electric Arc Furnace Model for Computer Simulation / Lixia Zhang, Wei Kang, Xiaoping Zhang // Energy and Power Engineering. – 2017. – no. 9. – P. 445–451.
6. Гончарук В. В. Імітаційне моделювання процесів в системах електропостачання та його застосування для дослідження розподілу випадкових величин / В. В. Гончарук // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2013. – № 3. – С. 82–86.
7. Tomasovic Teklic Ana. Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network / Ana Tomasovic Teklic, Bozidar Filipovic-Grcic, Ivica Pavic // Electric Power Systems Research. – 2017. – no. 146. – 218–227.
8. Saenko Yu. L. Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов для оценки потерь при наличии высших

гармоник и интергармоник / Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, И. Ю. Саенко // Электрификация транспорта. – 2017. – № 13. – С. 129–133.

9. Жежеленко И. В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, В. П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 126 с.

10. Sayenko Yuri. Kompensacja mocy biejzej w sieciach elektrycznych ze zrodzami interharmonicznymi / Yuri Sayenko, Tetiana Baranenko, Ryszard Pawelek // Kompatybilnosc Electromagnetyczna w Elektrotechnice i Elektronice EMC'2018: X Krajowe Sympozjum. – Lodz, 2018. – S. 41–47.

References (transliterated)

1. Mokhtari H., Hejri M. A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. 2002, no. 3, pp. 2078–2083.
2. Kang J., Shao Z. G. et al. Analysis on AC electric Arc Furnace Flicker and Its Influencing Factors. *Journal of Electric Power Science and Technology*. 2010, no. 25, pp. 66–71.
3. Zaluzhnyj M. Ju. Modelirovanie poter' v jelectrotehnologicheskome komplekse pri sovmestnoj rabote dugovyh staleplavil'nyh pechej [Simulation of losses in the electrotechnological complex during the joint operation of arc steel-smelting furnaces] *Donec'k: Naukovi praci DonNTU serija: Elektrotehnika i energetyka*. 2013, № 1(14), pp. 100–103.
4. Kang W., Yan X. W. et al. Research on Sampling Frequency of Flicker Measurement. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2009, no. 46, pp. 1–5.
5. Lixia Zhang, Wei Kang, Xiaoping Zhang. A Practical Electric Arc Furnace Model for Computer Simulation. *Energy and Power Engineering*. 2017, no. 9, pp. 445–451.
6. Goncharuk V. V. Imitacijne modeljuvannja procesiv v systemah elektropostachannja ta jogo zastosuvannja dlja doslidzhennja rozpodilu vypadkovykh velychyn [Simulation of processes in power supply systems and their application for studying the distribution of random variables] *Visnyk Derzhavnogo universytetu informacijno-komunikacijnyh tehnologij*. 2013, № 3, pp. 82–86.
7. Ana Tomasovic Teklic, Bozidar Filipovic-Grcic, Ivica Pavic. Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network. *Electric Power Systems Research*. 2017, no. 146, pp. 218–227.
8. Saenko Ju. L., Baranenko T. K., Saenko I. Ju., Primenenie spektral'no-korreljacionnoj teorii sluchajnyh processov dlja ocenki poter' pri nalichii vysshih garmonik i intergarmonik [The spectral correlation theory application of random processes for estimation of power losses involving higher harmonic and intergarmonic] *Elektryfikacija transportu*. 2017, № 13, pp. 129–133.
9. Zhezhelenko I. V. Metody verojatnostnogo modelirovanija v raschetah harakteristik jelectricheskikh nagruzok potrebitelej [Methods of probabilistic modeling in calculating the characteristics of consumers' electrical loads]. *Moscow, Jenergoatomizdat*, 1990, 126 p.
10. Sayenko Yuri, Baranenko Tetiana, Pawelek Ryszard. Kompensacja mocy biejzej w sieciach elektrycznych ze zrodzami interharmonicznymi. *Kompatybilnosc Electromagnetyczna w Elektrotechnice i Elektronice EMC'2018: X Krajowe Sympozjum*. Lodz, 2018, P. 41–47.

Надійшла (received) 15.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саенко Юрій Леонідович (Saenko Yuriy Leonidovich, Sayenko Yuriy Leonidovich) – доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», декан енергетичного факультету; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9729-4700>; e-mail: ysayenko@gmail.com

Бараненко Тетяна Костянтинівна (Baranenko Tatjana Konstantinovna, Baranenko Tetiana Kostjantynivna) – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри електроенергетичних комплексів та систем; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9436-8484>; e-mail: tbaranenko@gmail.com

Щ.В. АРГУН, А.В. ГНАТОВ, О.А. ДЗЮБЕНКО, С.В. ПОНІКАРОВСЬКА

ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА ПЛИТКА З ЕЛЕКТРОМАШИНИМ ВУЗЛОМ НА БАЗІ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ

Розробка альтернативних малопотужних поновлюваних джерел електроенергії, які не впливають на навколишнє середовище (зелені джерела енергії) є актуальним науково-технічним завданням. Для його вирішення розглядаються і застосовуються цілі комплекси заходів. При цьому використовуються різноманітні методи і способи перетворення різних видів енергії в електричну. Актуальними є ті системи і пристрої, які можуть легко бути змонтовані і встановлені в будь-якому місці. Такі поновлювані джерела енергії повинні частково або повністю покрити потреби в електроенергії певного об'єкту. Метою роботи є дослідження процесу генерації електроенергії енергогенеруючою плиткою – альтернативним, поновлюваним джерелом електроенергії – в залежності від кількості крокових двигунів та схеми їх підключення в електромашинному вузлу. Використовувались методи проведення та обробки експериментальних досліджень, методи теорії електроприводу та методи розрахунку електричних кіл. Розроблено дослідний зразок енергогенеруючої плитки з електромашинним вузлом, який може працювати з одним або двома кроковими двигунами для генерації електроенергії. Представлено результати експериментальних досліджень у вигляді осцилограм залежності напруги від часу. За отриманими експериментальними даними проведено їх обробку та аналітичні обчислення, результати яких представлені у вигляді графіків залежності потужності від часу. Визначено, що підключення двох крокових двигунів до електромашинного вузла енергогенеруючої плитки дозволяє підвищити значення згенерованої електроенергії приблизно в 3,9 рази. Один крок на енергогенеруючу плитку генерує в середньому 1,16 Вт електроенергії. Визначено, що кількість згенерованої енергії в більшій мірі залежить не від ваги людини, а від того, як швидко (різко) виконується крок. Чим швидше темп ходьби і більш різко виконуються кроки, тим більше енергії генерується. З огляду на дані експериментальних досліджень енергогенеруючої плитки і знаючи щільність людського потоку, можна, оцінити її потенціал. Тобто, яку кількість електроенергії вона може згенерувати за певний час своєї роботи. Це допоможе визначити потрібну кількість плиток для забезпечення потреб в електричній енергії конкретного об'єкта

Ключові слова: альтернативне джерело енергії, енергозбереження, кроковий двигун, генерація електроенергії, енергогенеруюча плитка, електромашинний вузол, електроенергія, електрична потужність, зелена енергія.

Щ.В. АРГУН, А.В. ГНАТОВ, А.А. ДЗЮБЕНКО, С.В. ПОНІКАРОВСКАЯ

ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩАЯ ПЛИТКА С ЭЛЕКТРОМАШИНЫМ УЗЛОМ НА БАЗЕ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Разработка альтернативных маломощных возобновляемых источников электроэнергии, которые не влияют на окружающую среду (зеленые источники энергии) является актуальным научно-техническим заданием. Для его решения рассматриваются и применяются целые комплексы мероприятий. При этом используются различные методы и способы преобразования различных видов энергии в электрическую. Актуальными являются те системы и устройства, которые могут легко быть смонтированы и установлены в любом месте. Такие возобновляемые источники энергии должны частично или полностью покрывать потребности в электроэнергии определенного объекта. Целью работы является исследование процесса генерации электроэнергии энергогенерирующей плиткой – альтернативным, возобновляемым источником электроэнергии – в зависимости от количества шаговых двигателей и схемы их подключения в электромашинном узле. Использовались методы проведения и обработки экспериментальных исследований, методы теории электропривода и методы расчета электрических цепей. Разработан опытный образец энергогенерирующей плитки с электромашинным узлом, который может работать с одним или двумя двигателями для генерации электроэнергии. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде осциллограмм зависимости напряжения от времени. По полученным экспериментальным данным проведено их обработку и аналитические вычисления, результаты которых представлены в виде графиков зависимости мощности от времени. Определено, что подключение двух шаговых двигателей к электромашинному узлу энергогенерирующей плитки позволяет повысить значение сгенерированной электроэнергии примерно в 3,9 раза. Один шаг на энергогенерирующую плитку генерирует в среднем 1,16 Вт электроэнергии. Определено, что количество сгенерированной энергии в большей степени зависит не от веса человека, а от того, как быстро (резко) выполняется шаг. Чем быстрее темп ходьбы и резче выполняются шаги, тем больше энергии генерируется. Учитывая данные экспериментальных исследований энергогенерирующей плитки и зная плотность людского потока, можно, оценить ее потенциал. То есть, какое количество электроэнергии она может сгенерировать за определенное время работы. Это поможет определить нужное количество плиток для обеспечения потребностей в электрической энергии конкретного объекта.

Ключевые слова: альтернативный источник энергии, энергосбережение, шаговый двигатель, генерация электроэнергии, энергогенерирующая плитка, электромашинный узел, электроэнергия, электрическая мощность, зеленая энергия.

SHCH. V. ARHUN, A.V. HNATOV, O.A. DZYUBENKO, S.V. PONIKAROVSKA

ENERGY-GENERATING PLATE WITH ELECTRIC MACHINE UNIT ON THE BASIS OF STEP ENGINES

The development of alternative low-power renewable sources of energy that do not affect the environment (green energy sources) is a topical scientific and technical task. In order to solve it, the whole complex of measures are considered and applied. Various ways and methods for converting various types of energy into electricity are used. The systems and devices that can easily be assembled and installed anywhere are considered to be the most relevant. Such renewable sources of energy must partially or fully cover the electricity needs of a particular facility. The aim of the work is to study the process of generating electricity by power generating plates - an alternative, renewable source of electricity - depending on the number of stepper motors and the scheme of their connection in the electric machine unit. The methods for conducting and processing experimental research, methods of electric drive theory and methods for calculating electrical circuits were used. A prototype of an energy generating plate with an electric machine unit that can work with one or two engines to generate electricity has been developed. The results of experimental studies are presented in the form of oscillograms of the dependence of voltage on time. According to the obtained experimental data, their processing and analytical calculations were carried out, the

© Щ. В. Аргун, А. В. Гнатов, О. А. Дзюбенко, С. В. Понікарівська, 2018

results of which are presented in the form of graphs of power versus time. It was determined that the connection of two stepper motors to the electric machine unit of the power generating plate allows increasing the value of the generated electricity by about 3.9 times. One step on the power generating plate generates an average of 1.16 watts of electricity. It has been determined that the amount of generated energy to a greater extent depends not on the weight of the person, but on how quickly (abruptly) the step is performed. The faster the pace of walking and the sharper the steps, the more energy is generated. Considering the data of experimental studies of the power generating plate and knowing the density of the human flow, it is possible to evaluate its potential, i.e. the amount of electricity that it can generate for a certain time. This will help determine the right amount of plates to meet the electrical energy needs of a particular object.

Keywords: alternative source of energy, energy saving, stepper motor, electric energy generating, energy-generating plates, electric machine unit, electric energy, electric power, green energy.

Вступ. У зв'язку з постійним розвитком технологій та нової техніки, яка є споживачем електрики, питання генерації електроенергії набуває все більшої актуальності. Особливо нагальне це питання для великих міст та мегаполісів, де велике скупчення людей вимагає нових технологій, сервісів та пристроїв для їх обслуговування. Поряд з цим, питання екологічної безпеки та чистоти в таких містах набуває особливого значення, де вже неприпустимі компроміси. Тому з кожним роком спостерігається встановлення все жорсткіших екологічних норм як в окремих містах, так і країнах в цілому [1, 2].

На цей час велика кількість розвинених країн виявляють наміри щодо переходу на поновлювальні джерела електроенергії. Наприклад, Шотландія має намір з 2020 р. повністю перейти на поновлювальні джерела електроенергії [2].

Для активного впровадження поновлювальних джерел електроенергії розглядаються та застосовуються цілі комплекси наукових, науково-технічних, освітніх та інших заходів. Під це в багатьох країнах виділяється великі суми грантових коштів, а саме: Horizon 2020; Erasmus+; "Кліматичні інноваційні ваучери" – найбільша грантова програма для новаторів та розробників чистих технологій в Україні; Energy Globe Award 2019 for sustainability [4] тощо.

Неабияку роль тут відіграють міжнародні фінансові інститути (IFI) [5]. В Україні вони представлені в основному фінансовими інститутами групи Всесвітнього банку (IFC, ЄБРР, ЄІБ, Світовий банк) та американською корпорацією зарубіжних приватних інвестицій (ОПІС). Досить часто, додатково з кредитом, організації надають гранти для експертного супроводу проектів та їх оцінки.

Отже, альтернативні малопотужні джерела електроенергії набувають все більшої популярності і отримують все більше фінансування. Вони здатні не тільки розвантажити основні електричні системи, а й провести ефективне збалансування конкретної системи по навантаженню. Особливу увагою та попитом користуються малопотужні «зелені» джерела електроенергії. Тобто ті, що не шкодять навколишньому середовищу. Отже розвиток сонячної, вітрової та геотермальної енергетики набуває все більших розмахів [1]. Але далеко не завжди можна скористатися вище переліченими джерелами енергії. Наприклад, в приміщеннях або великих містах часто немає можливості встановити сонячні панелі чи вітрогенератори. Тому досить привабливими з економічної та екологічної точки зору є невеликі системи чи пристрої, що мають гарну мобільність та можуть бути легко встановлені у будь-якому місці для альтернативного та децентралізованого живлення. При

цьому, мається на увазі те, що дана система (пристрій) здатна частково або повністю забезпечити електроенергією споживачів [6, 7].

Тому розробка пристроїв перетворення та генерації електроенергії є актуальною задачею, розв'язання якої дозволить не тільки вирішати питання електроживлення а й сприятиме прискореному переходу на чисті та поновлювальні джерела електроенергії.

У даній роботі представлено експериментальні дослідження енергогенеруючої плитки з різною кількістю підключених крокових двигунів (КД) до електромашинного вузлу. КД тут виконує функції електрогенератора [8]. Досліджувана енергогенеруюча плитка має компактні габаритні розміри і призначений для встановлення в містах з великою (щільною) прохідністю людей (як в середині приміщення, так і зовні). При виконанні кроку на плитку йде процес генерації електроенергії. В роботі представлено опис експериментальних досліджень з визначенням кількості згенерованої електроенергії від одного кроку на енергогенеруючу плитку. Визначено доцільність використання декількох КД в якості генераторів електроенергії. Представлено аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та їх обробки.

Аналіз публікацій. Плитка Pavegen, розроблена англійським дослідником Лоуренсом Кемпбелл-Куком є аналогом запропонованої енергогенеруючої плитки, яка перетворює кінетичну енергію від кроків людей в електричну [7]. Аналогічна розробка також описана в патенті [9]. Винахід відноситься до пристроїв збору енергії на дорогах і автомагістралях з використанням п'єзоелектричних генераторів. Недоліком цієї розробки є те, що вона є стаціонарною і вимагає монтажу спеціального устаткування. В роботі [10] представляється механізм, який безпосередньо об'єднує два процеси в один. За задумом авторів механічна енергія перетворюється і одночасно зберігається, як хімічна енергія, не проходячи проміжну стадію першого перетворення в електрику. Але, на жаль, авторами не вказані експлуатаційні характеристики даної розробки. У статті [11] вчені наводять обґрунтування використання п'єзоелектричних перетворювачів на дорозі з асфальтовим покриттям з точки зору ефективності виробництва енергії. У роботі представлено перетворення кінетичної енергії від натискання в електричну, але не наведені конкретні технічні рішення для практичного використання цього процесу. В статті [12] досліджено генератор з прямим приводом на основі принципу нелінійної комутації і представлено аналіз ефективності системи управління при

виробленні електроенергії, але не наведено кількісні показники згенерованої енергії. Автори статті [13] досліджують пристрій перетворення кінетичної енергії від вібрацій в електричну. Досліджено прототип «Vibration Energy Harvester», де основним елементом перетворення енергії є п'єзоелектричний матеріал. В роботі [14] автори аналізують системи збору енергії на основі п'єзоелектричних елементів, вбудованих в структуру дорожніх покриттів. Загальними недоліками пристроїв і систем на основі п'єзоелементів є: малий ресурс їх роботи, невелика надійність і незначні енергетичні показники з точки зору згенерованої потужності. Вельми перспективним видається використання КД в малопотужних системах генерації електроенергії, аналогами яких є плитка або дорожнє покриття, що генерують електроенергію [8, 15]. У роботах [16, 17] представлені результати чисельного моделювання для КД, але не наведено енергетичні характеристики. У статті [18] запропоновано цікаве рішення для портативної техніки – ручний світлодіодний ліхтарик, що включає в себе редукторний КД і вбудовану електронну схему. Однак будь-яких конкретних чисельних значень згенерованої енергії не представлено. Також для даної конструкції не наведено схеми побудови редуктора і його параметри.

Проведений огляд публікацій за темою дослідження показує, що дана тематика є актуальною для широкого загалу.

Метою роботи є дослідження процесу генерування електроенергії енергогенеруючою плиткою, як альтернативного, поновлювального джерела електроенергії, в залежності від кількості та схеми підключення крокових двигунів до її електромашинного вузла.

Конструкція енергогенеруючої плитки

Енергогенеруюча плитка може включати декілька електромашинних вузлів, що генерують електроенергію, або декілька електродвигунів в одному електромашинному вузлі. Потрібно визначити ступінь впливу кількості електродвигунів в електромашинному вузлі енергогенеруючої плитки на значення згенерованої електроенергії.

Схема електрична-принципова енергогенеруючої плитки представлена на рис. 1. У відповідності до представленої схеми була розроблена конструкція енергогенеруючої плитки. Загальний вид електромашинного вузла розробленої конструкції енергогенеруючої плитки представлено на рис. 2.

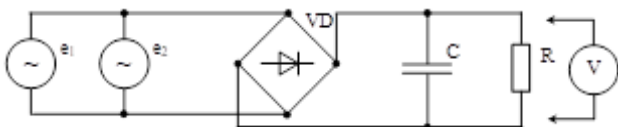


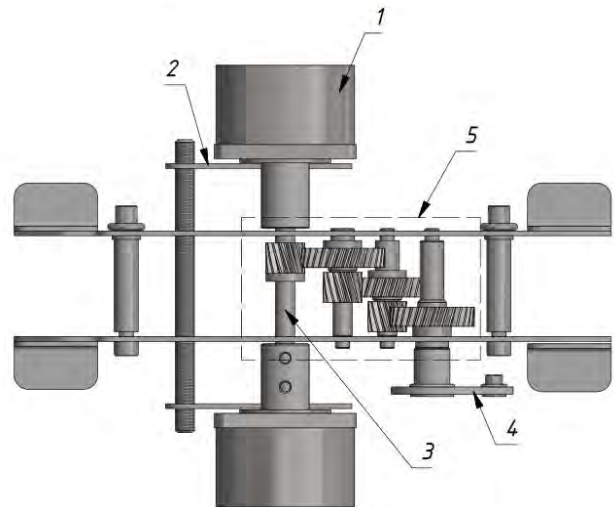
Рис. 1. Електрична схема енергогенеруючої плитки

У відповідності до рис. 1 та рис. 2, енергогенеруюча плитка має у складі електромашинного вузла два КД, які з'єднані паралельно у відношенні до електричного навантаження, тобто, працюють за паралельною

схемою на одне навантаження, якщо розглядати їх генераторний режим роботи. Зі статорної обмотки КД вимірюється сигнал напруги на активному опорі R . При відомому значенні опору навантаження та проводячи вимірювання залежність напруги від часу $u = f(t)$, можна розрахувати залежність згенерованої потужності від часу $p = f(t)$ у відповідності до закону Ома [19]:

$$u(t) = R \cdot i(t), \quad (1)$$

де $u(t)$ – змінна напруга, В;
 R – активний опір кола, Ом;
 $i(t)$ – змінний струм, А.



1 – Кроковий двигун типу ДШИ 200; 2 – реактивні тяги; 3 – вихідний вал редуктора; 4 – кривошип; 5 – редуктор

Рис. 2. Конструкція електромашинного вузла енергогенеруючої плитки

Миттєва потужність, що виділяється на опорі визначається:

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}, \quad (2)$$

де P – миттєва потужність, Вт;

$$u = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Відомо, що для резистора $\psi_u = \psi_i$, тоді для потужності p отримаємо:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u); \quad (3)$$

З рівняння (3) видно, що миттєва потужність завжди більше нуля і змінюється у часі. У таких випадках прийнято розглядати середню за період T потужність:

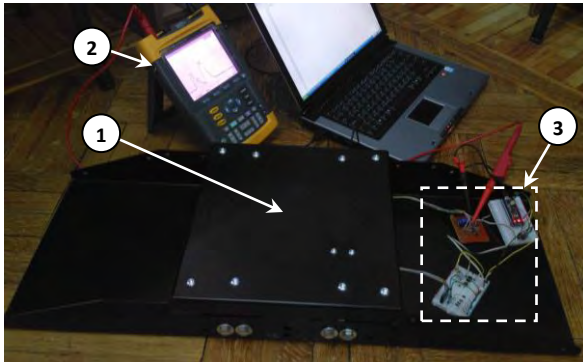
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u); \quad (4)$$

Виконавши інтегрування отриманих кривих $p = f(t)$ можна визначити значення згенерованої потужності енергогенеруючою плиткою.

Експериментальні дослідження. У відповідності до рис. 1 та рис. 2 було розроблено дослідний зразок енергогенеруючої плитки, зовнішній вигляд якої представлено на рис. 3.

Умови експерименту.

1. Дослідження роботи електромашинного вузлу енергогенеруючої плитки при підключенні одного КД.
2. Дослідження роботи електромашинного вузлу енергогенеруючої плитки при підключенні двох КД.



1 – натискна кришка енергогенеруючої плитки;
2 – осцилограф; 3 – система управління

Рис. 3. Дослідний зразок енергогенеруючої плитки

У відповідності до електричної схеми, рис.1, було вибрано опір навантаження $R = 18 \text{ Ом}$. Цифровим вольтметром V вимірюється сигнал напруги на опорі R та розраховується струм навантаження. Потім розраховується потужність, яка виділяється на даному опорі. Для зменшення похибки вимірювання досліди були поділені на 100 серій по 10 кроків на енергогенеруючу плитку. В експериментальних дослідженнях приймало участь 5 чоловік з вагою від 50 кг до 90 кг. Швидкість ходьби 5 км/год.

Типові осцилограми вимірних сигналів напруги $u = f(t)$ представлено на рис. 4. Кожен крок генерує два імпульси напруги.

Обробка експериментальних досліджень. Всі вимірювання проводились на активному опорі $R = 18 \text{ Ом}$. У відповідності до закону Ома (1) було визначено струм та потужність, що виділяється на даному опорі при натисканні на енергогенеруючу плитку.

Графік згенерованої потужності у відповідності до виразів (2) та (4), можна отримати виконавши інтегрування вимірних осцилограм (див. рис. 4). Інтегрування осцилограм проведено у відповідності до методу трапецій [20]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right), \quad (5)$$

де $[a; b]$ – відрізок (границі) інтегрування;

$$h = \frac{a-b}{n} \text{ – крок розбиття;}$$

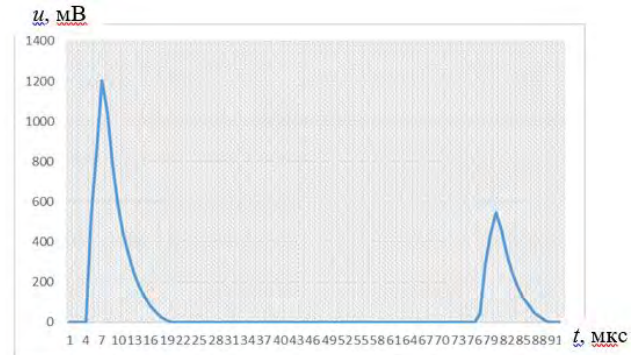
$$i = 0, 1, \dots, n;$$

$f(x)$ – значення підінтегральної функції.

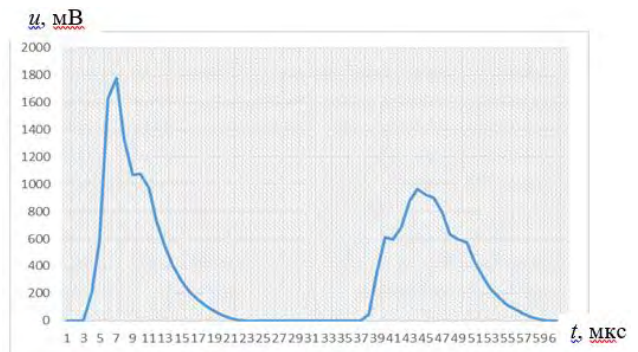
Вираз (5), може бути записаний у вигляді:

$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \cdot \left(p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (6)$$

У відповідності до виразу (6) проведемо інтегрування вимірних осцилограм $u = f(t)$, що представлені на рис. 4.



a



б

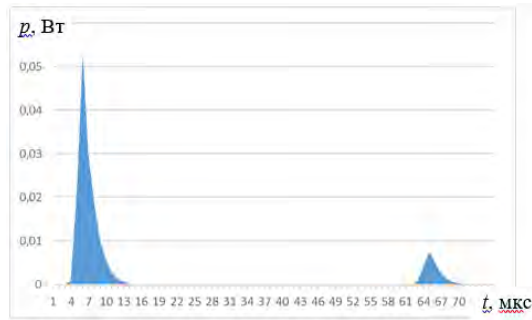
Рис. 4. Осцилограми залежності $u = f(t)$, що виміряні при виконанні одного кроку на енергогенеруючу плитку: а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

На рис. 5 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при одному кроці на енергогенеруючу плитку.

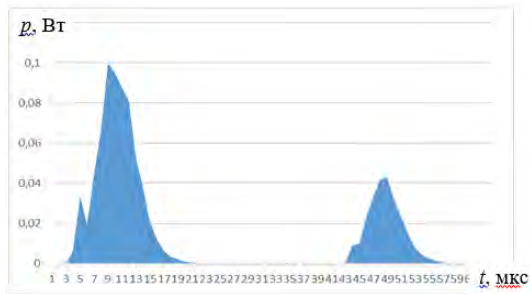
Значення згенерованої потужності, що розраховані при обробці експериментальних досліджень за виразом (6) для однієї серії з 10 кроків наведено у табл. 1, де k - коефіцієнт підсилення (показує ступінь збільшення значення генерації при підключенні двох КД).

Таблиця 1 – Значення згенерованої потужності

	Серії по 10 кроків									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 КД, Вт	2,87	1,66	3,64	3,12	2,11	3,54	4,21	2,88	3,56	3,22
2 КД, Вт	13,84	5,55	11,4	12,12	9,85	13,24	13,85	9,87	13,54	12,38
k	4,8	3,3	3,2	3,9	4,6	3,7	3,3	3,4	3,8	3,8



а



б

Рис. 5. Залежність генерованої потужності від часу: а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Висновки. Аналіз проведених експериментальних досліджень та їх обробка показують, що підключення двох КД до електромашинного вузлу енергогенеруючої плитки дає змогу підвищити значення згенерованої електроенергії приблизно в 3,9 рази. Отриманий результат цілком відповідає принципам протікання електромеханічних процесів, що описує теорія електроприводу та базові закони теоретичних основ електротехніки. Так, у відповідності до закону Ома (1), а також аналітичних виразів (2)–(4), потужність, що виділяється на активному опорі в електричному колі, являє собою квадратичну залежність від електричного струму, що протікає по даному опорі.

Один крок на енергогенеруючу плитку може в середньому згенерувати близько 1,16 Вт електроенергії.

Значення згенерованої енергії від одного кроку на енергогенеруючу плитку в більшій мірі залежить не від ваги людини, а від того, як швидко (різко) робиться крок. Чим швидше темп ходьби та більш різко виконуються кроки, тим більше енергії генерується.

Список літератури

1. Erik Ela, Congcong Wang, Sai Moorthy, Kenneth Ragsdale, Jon O'Sullivan, Mark Rothleder, Ben Hobbs. *Electricity Markets and Renewables: A Survey of Potential Design Changes and Their Consequences*. IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 15, Issue: 6, Nov.-Dec. 2017). 2017. С. 70–82. DOI: 10.1109/MPE.2017.2730827.
2. Гнатів А. В., Аргун Ш. В. Енергогенеруюча плитка, як альтернативне малопотужне джерело електричної енергії. *Автомобільний транспорт*. Харків: ХНАДУ. 2017. Вип. 40. С. 167–172.
3. *Scotland 'on target' for 100% renewable energy by 2020*. URL: [https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-](https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/scotland-on-target-for-100-renewable-energy-by-2020-1.3280498)

[news/scotland-on-target-for-100-renewable-energy-by-2020-1.3280498](https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/scotland-on-target-for-100-renewable-energy-by-2020-1.3280498) (дата звернення 01.10.2018).

4. *Energy Globe Award 2019 for sustainability*. URL: <https://www.science-community.org/ru/node/194139> (дата звернення 01.10.2018).

5. *7 источников финансирования зеленых проектов в Украине*. URL: <https://inventure.com.ua/analytics/formula/7-istochnikov-finansirovaniya-zelenyh-proektov-v-ukraine#>. 01.12.2017 (дата звернення 01.10.2018).

6. Гнатів А. В., Аргун Ш. В. Властивості та способи застосування п'єзоелектричних елементів, як генераторів електроенергії. *Автомобільний транспорт*. Харків: ХНАДУ. 2017. Вип. 41. С. 178–187.

7. Xiaofeng Li, Strezov V. *Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building*. Energy Conversion and Management. 2014. С. 435–442. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.096.

8. Пат. 121490 України, Н02К. *Електромеханічний пристрій перетворення кінетичної енергії в електричну з мультиплікатором* / Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Дзюбенко О. А.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун.-т., Гнатів А. В. – № у 2017 05464; заявл. 02.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №23.

9. Пат. 2 482 568 Росії, H01L 41/11. *Сбор энергии с дорог и взлетно-посадочных полос* / Абрамович Х., Хараши Е., и др. заявл. 20.03.2012; опубл. 20.05.2013.

10. Xinyu Xue, Sihong Wang. *Hybridizing Energy Conversion and Storage in a Mechanical-to-Electrochemical Process for Self-Charging Power Cell*. Nano Letters, 2012. DOI: 10.1021/nl302879t.

11. Cafiso Salvatore; Cuomo M. *Experimental Analysis for Piezoelectric Transducers Applications into Roads Pavements*. Advanced Materials Research. 2013. №. 684. pp. 253–257. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.684.253.

12. Pan J. F., Zou, Yu Cheung. *The direct-drive sensor less generation system for wave energy utilization*. *International journal of electrical power & energy systems*, 2014. №. 62. С. 29–37.

13. Ramli M., Hanif M., Yunus M., Hazwan M., Low Cheng. Yee *Scavenging energy from human activities using piezoelectric material* / 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence (SysInt) – Challenges for Product and Production Engineering / Univ Bremen, Bremen, Germany: Jul 02-04, 2014.

14. Papagiannakis A. T., Dessouky S. Montoya A. *Energy Harvesting from Roadways* / 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT) / 6th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT) / Madrid, SPAIN: May 23-26, 2016. №.83. С. 758-765.

15. Datta Rajesh Kumar, Rahman Sazid. *Power Generating Slabs: Lost energy conversion of human locomotive force into electrical energy* / International Conference on Electrical and Computer Engineering / Dhaka, Bangladesh: Dec 20-22, 2014. С. 718-721. DOI: 10.1109 / ICECE.2014.7026831.

16. Ionica Ioana, Modreanu Mircea, Morega Alexandru. *Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor*. 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania: MAR 23-25, 2017. С. 192-195.

17. Skofic Jan, Boltezar M. *Numerical modelling of the rotor movement in a permanent-magnet stepper motor*. Iet Electric Power Applications. 2014. № 8(4). С. 155-163.

18. *How to Build a Hand Crank Flashlight*. URL: <https://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/109647-how-to-build-a-magneto-crank-flashlight/> (дата звернення 01.10.2018).

19. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Москва: Высшая школа, 1978. 333 с.
20. Шипачев В. С. *Высшая математика*. Москва: Высшая школа, 1990. 479 с.

References (transliterated)

- Erik Ela, Congcong Wang, Sai Moorty, Kenneth Ragsdale, Jon O'Sullivan, Mark Rothleder, Ben Hobbs. *Electricity Markets and Renewables: A Survey of Potential Design Changes and Their Consequences*. IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 15, Issue: 6, Nov.-Dec. 2017). 2017. pp. 70–82. DOI: 10.1109/MPE.2017.2730827.
- Hnatov A. V., Arhun Shch. V. Energogeneruyucha ply'tka, yak al'ternatyvne malopotuzhne dzherelo elektrychnoyi energii. [Power generating tile, as an alternative low-power electric power source.] *Avtomobyl'nyj transport*. Xarkiv: XNADU. 2017. no. 40. pp. 167–172.
- Scotland 'on target' for 100% renewable energy by 2020. Available at: <https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/scotland-on-target-for-100-renewable-energy-by-2020-1.3280498> (accessed 01.10.2018).
- Energy Globe Award 2019 for sustainability. Available at: <https://www.sciencecommunity.org/ru/node/194139> (accessed 01.10.2018).
- 7 istochnikov finansirovaniya zelenyih proektov v Ukraine [7 sources of financing green projects in Ukraine]. Available at: <https://inventure.com.ua/analytics/formula/7-istochnikov-finansirovaniya-zelenyh-proektov-v-ukraine#>. 01.12.2017 ((accessed 01.10.2018).
- Hnatov A. V., Arhun Shch. V. Vlasy'vosti ta sposoby' zastosuvannya p'yezoelektrychny'x elementiv, yak generatoriv elektroenergiyi [Properties and methods of applying piezoelectric elements, as power generators]. *Avtomobyl'nyj transport* Xarkiv: XNADU. 2017. no. 41. pp. 178–187.
- Xiaofeng Li, Strezov V. *Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building*. Energy Conversion and Management. 2014. Pp. 435–442. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.096.
- Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Dzyubenko O. A. *Elektromexanichnyj pry'strij peretvorenniya kinetychnoyi energii v elektrychnu z mul'typlikatorom* [Electromechanical device for converting kinetic energy into electric with a multiplier]. Patent UA, no. u 2017 05464, 2017.
- Abramovich H., Harash E. *Sbor energii s dorog i vzletno-posadochnyih polos*. Patent RF no. 2482568, 2013.
- Xinyu Xue, Sihong Wang. Hybridizing Energy Conversion and Storage in a Mechanical-to-Electrochemical Process for Self-Charging Power Cell. *Nano Letters*, 2012. DOI: 10.1021/nl302879t.
- Cafiso Salvatore; Cuomo M. *Experimental Analysis for Piezoelectric Transducers Applications into Roads Pavements*. Advanced Materials Research. 2013. no. 684. pp. 253–257. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.684.253.
- Pan J. F., Zou, Yu Cheung. The direct-drive sensor less generation system for wave energy utilization. *International journal of electrical power & energy systems*, 2014. no. 62. pp. 29–37.
- Ramli M., Hanif M., Yunus M., Hazwan M., Low Cheng. Yee *Scavenging energy from human activities using piezoelectric material*. 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence (SysInt) – Challenges for Product and Production Engineering. Univ Bremen, Bremen, Germany: Jul 02-04, 2014.
- Papagiannakis A. T., Dessouky S. Montoya A. *Energy Harvesting from Roadways / 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT) / 6th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT) / Madrid, SPAIN: May 23-26, 2016*. no. 83. pp. 758–765.
- Datta Rajesh Kumar, Rahman Sazid. *Power Generating Slabs: Lost energy conversion of human locomotive force into electrical energy / International Conference on Electrical and Computer Engineering / Dhaka, Bangladesh: Dec 20–22, 2014*. pp. 718–721. DOI: 10.1109 / ICECE.2014.7026831.
- Ionica Ioana, Modreanu Mircea, Morega Alexandru. *Design and Modeling of a Hybrid Stepper Motor*. 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. Bucharest, Romania: MAR 23–25, 2017. pp. 192–195.
- Skofic Jan, Boltezar M. *Numerical modelling of the rotor movement in a permanent-magnet stepper motor*. *Iet Electric Power Applications*. 2014. no 8(4). pp. 155–163.
- How to Build a Hand Crank Flashlight*. Available at: <https://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/109647-how-to-build-a-magneto-crank-flashlight/> (accessed 01.10.2018).
- Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. Elektricheskie tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moskva: Vysshaya shkola, 1978. 333 p.
- Shipachev V. S. *Vysshaya matematika* [Higher mathematics]. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 479 p.

Надійшло (received) 30.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аргун Щасяна Валіковна (Аргун Щасяна Валиковна, Arhun Shchasiana Valikovna) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6098-8661>; e-mail: shasyana@gmail.com

Гнатів Андрій Вікторович (Гнатів Андрей Викторович, Hnatov Andrii Viktorovich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри автомобільної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0932-8849>; e-mail: kalifus76@gmail.com

Дзюбенко Олександр Андрійович (Дзюбенко Александр Андреевич, Dzyubenko Oleksandr Andriyovych) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-4956>; e-mail: dzyubenko.alan@gmail.com

Понікарівська Світлана Володимирівна (Поникаровская Светлана Владимировна, Ponikarovska Svitlana Volodymyrivna) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, ст. викладач кафедри іноземних мов; м. Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9432-402X>; e-mail: ponikarovska@gmail.com

И. В. БАРБАШОВ, В. Р. ОБУХОВ, Д. С. РЫМОРЕВ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ И СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОСТЕЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Рассмотрена общая характеристика алгоритмов анализа режимов простых замкнутых электрических сетей. Дана характеристика алгоритму определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнительной мощности. Проанализированы особенности уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощностей по напряжению источников питания и потребителей. Изложен подход к определению приведенных нагрузок (мощностей) подстанций с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей. Рассмотрен алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнительной мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов).

Ключевые слова: простые замкнутые электрические сети, метод подбора с коррекцией по уравнительной мощности, приведенные нагрузки (мощности) подстанций с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами, алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ МЕРЕЖІ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТЕЙ СПОЖИВАЧІВ

Розглянуто загальну характеристику алгоритмів аналізу режимів простих замкнутих електричних мереж. Дана характеристика алгоритму визначення параметрів нормальних режимів простих замкнутих електричних мереж методом підбору з корекцією по зрівнювальній потужності. Проаналізовано особливості уточнених розрахунків простих замкнутих електричних мереж з урахуванням нелінійності характеристик елементів мережі і статичних характеристик потужності по напрузі джерел живлення і споживачів. Викладено підхід до визначення наведених навантажень (потужностей) підстанцій з дво-, триобмотковими трансформаторами та автотрансформаторами при уточнених розрахунках електричних мереж. Розглянуто алгоритм уточненого розрахунку простих замкнутих електричних мереж з урахуванням нелінійних характеристик елементів схем заміщення електричних мереж і статичних характеристик потужностей джерел живлення і споживачів по напрузі методом підбору з корекцією по зрівнювальній потужності (з урахуванням пристроїв РПН і ПБЗ трансформаторів).

Ключові слова: прості замкнені електричні мережі, метод підбору з корекцією по зрівнювальній потужності, наведені навантаження (потужності) підстанцій з дво-, триобмотковими трансформаторами і автотрансформаторами, алгоритм уточненого розрахунку простих замкнених електричних мереж з урахуванням нелінійних характеристик елементів схем заміщення електричних мереж і статичних характеристик потужностей джерел живлення і споживачів по напрузі.

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

THE CALCULATION OF THE ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEARITY CHARACTERISTICS OF NETWORK ELEMENTS AND THE STATIC CHARACTERISTICS OF CAPACITY CONSUMERS

The General characteristic of the algorithms for the analysis of simple closed electric networks modes is considered. The characteristic of the algorithm for determining the parameters of normal modes of simple closed electric networks by the method of choice with correction for power equalization were given. The features of the refined calculations of simple closed electric networks were analyzed taking into account the nonlinearity of the characteristics of network elements and static characteristics power by the voltage of the power sources and consumers. The approach to the definition of reduced loads (capacity) of substations with two-, three-winding transformers and autotransformers in the refined calculations of electrical networks. The algorithm improved calculation of a simple closed electrical networks with non-linear characteristics of elements of the equivalent circuits of electrical networks and static characteristics of the capacity of food sources and consumers for voltage selection method with correction for surge capacity (including tap changers and transformers WSP).

Key words: simple closed electrical network, the method of selection with correction for surge capacity, given the load (power) substations with two-, three-winding transformers and autotransformers, the algorithm improved calculation of a simple closed electrical networks with non-linear characteristics of elements of the equivalent circuits of electrical networks and static characteristics of the capacity of food sources and consumers for voltage.

Введение. Простыми замкнутыми электрическими сетями называются сети, в которых электроэнергия к узлам нагрузки подается не менее чем с двух сторон и которые содержат только один замкнутый контур.

К простым замкнутым электрическим сетям относятся кольцевые сети (рис. 1, а) и сети с двухсторонним питанием (рис. 1, б).

Отличительной особенностью кольцевых электрических сетей является наличие в сети одного источника питания (ИП) и, следовательно, одного значения напряжения $U_{ИП}$. Сети с двухсторонним

© И. В. Барбашов, В. Р. Обухов, Д. С. Рыморев, 2019

питанием имеют два ИП и, следовательно, два значения напряжения $U_{ИП1}$ и $U_{ИП2}$, которые, как правило, не равны ($U_{ИП1} \neq U_{ИП2}$).

Простые замкнутые электрические сети также могут иметь одинаковые либо различные номинальные напряжения участков.

1. Общая характеристика алгоритмов анализа режимов простых замкнутых электрических сетей

Традиционные алгоритмы анализа режимов простых замкнутых электрических сетей [1–5] основываются непосредственно на методах контурных токов и мощностей, а также их разновидности – методе расщепления сети. Для анализа режимов простых замкнутых электрических сетей широко используется принцип (метод) наложения.

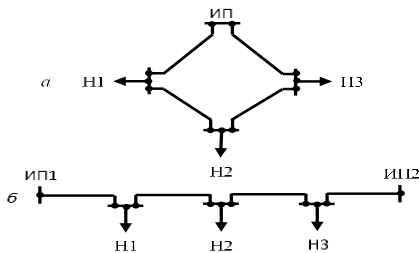


Рис. 1 – Схемы простых замкнутых электрических сетей

При расчете нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей возможны такие варианты организации вычислений:

- 1) рассматривать сеть как замкнутую и расчет выполнять на основе второго закона Кирхгофа (контурных уравнений);
- 2) вести расчет сети как разомкнутой, разрезая сеть по узлу с ИП; в этом случае результатом расчета должно быть такое потокораспределение в сети, при котором напряжения в начале и в конце равны по модулю и по фазе.

При первом варианте организации вычислений определение параметров нормальных режимов простой замкнутой электрической сети выполняется методом итераций в три этапа:

этап 1 – определение потоков мощности на участках электрической сети при заданных нагрузках и сопротивлениях (или длинах) участков (при допущении отсутствия потерь мощности на участках сети и равенстве номинальному напряжений в узлах). На этом этапе в случае электрических сетей с двухсторонним питанием дополнительно применяется принцип (метод) наложения;

этап 2 – определение потоков мощности с учетом ее потерь на участках электрической сети (при допущении равенства номинальному напряжений в узлах);

этап 3 – определение значений напряжения в узлах электрической сети (при заданных напряжениях ИП).

При втором варианте организации вычислений определение параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей осуществляется методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности.

2. Характеристика алгоритма определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности

Порядок расчета параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности подробно рассмотрен в [4–6].

Система обозначений при определении параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей показана на рис. 2.

Исходными данными при расчете параметров нормальных режимов сети с двухсторонним питанием являются расчетные нагрузки узлов $\underline{S}_1, \dots, \underline{S}_4$, длины участков сети L_{A-1}, \dots, L_{4-B} , сопротивления участков сети $\underline{Z}_{A-1}, \dots, \underline{Z}_{4-B}$, а также напряжения источников питания U_A и U_B .

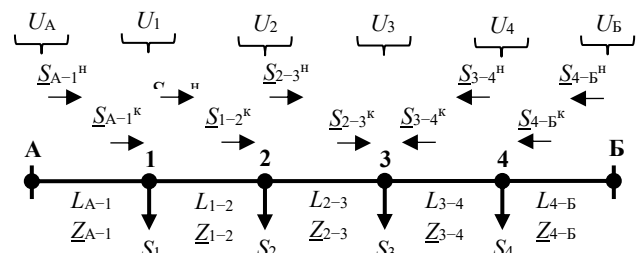


Рис. 2 – Система обозначений при определении параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей

Расчет простых замкнутых электрических сетей методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности включает ряд шагов расчета, в каждом из которых определяются мощности на участках электрической сети с учетом ее потерь, а также значения напряжений в узлах электрической сети.

Результаты первого шага расчета являются основой дальнейшего определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей.

Первый шаг расчета

Задано напряжение источника питания U_A .

В качестве исходного значения \underline{S}_{A-1}^H (при допущении однородности сети) может быть принято значение, рассчитанное по выражению

$$\underline{S}_{A-1} = [\underline{S}_1 (L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_2 (L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_3 (L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_4 L_{4-B}] / (L_{A-1} + L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}).$$

1) участок А–1:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A-1}^H &= \underline{S}_{A-1}; \\ \underline{S}_{A-1}^K &= \underline{S}_{A-1}^H - \Delta \underline{S}_{A-1}^H = \\ &= \underline{S}_{A-1}^H - \{[(\underline{S}_{A-1}^H)^2 + (\underline{S}_{A-1}^H)^2] / U_A^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_1 &= U_A - \Delta U_{A-1}^H = U_A - (P_{A-1}^H R_{A-1} + Q_{A-1}^H X_{A-1}) / U_A; \end{aligned}$$

2) участок 1–2:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{1-2}^H &= \underline{S}_{A-1}^K - \underline{S}_1; \\ \underline{S}_{1-2}^K &= \underline{S}_{1-2}^H - \Delta \underline{S}_{1-2}^H = \\ &= \underline{S}_{1-2}^H - \{[(\underline{S}_{1-2}^H)^2 + (\underline{S}_{1-2}^H)^2] / U_1^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_2 &= U_1 - \Delta U_{1-2}^H = U_1 - (P_{1-2}^H R_{12} + Q_{1-2}^H X_{1-2}) / U_1; \end{aligned}$$

3) участок 2–3:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{2-3^k} &= \underline{S}_2 - \underline{S}_{1-2^k}; \\ \underline{S}_{2-3^H} &= \underline{S}_{2-3^k} + \Delta \underline{S}_{2-3^k} = \\ &= \underline{S}_{2-3^k} + \{[(\underline{S}_{2-3^k})^2 + (\underline{S}_{2-3^k})^2] / U_2^2\} (R_{2-3} + jX_{2-3}); \\ U_3 &= U_2 + \Delta U_{2-3^k} = U_2 + (P_{2-3^k} R_{2-3} + Q_{2-3^k} X_{2-3}) / U_2; \end{aligned}$$

4) участок 3–4:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{3-4^k} &= \underline{S}_{2-3^H} + \underline{S}_3; \\ \underline{S}_{3-4^H} &= \underline{S}_{3-4^k} + \Delta \underline{S}_{3-4^k} = \\ &= \underline{S}_{3-4^k} + \{[(\underline{S}_{3-4^k})^2 + (\underline{S}_{3-4^k})^2] / U_3^2\} (R_{3-4} + jX_{3-4}); \\ U_4 &= U_3 + \Delta U_{3-4^k} = U_3 + (P_{3-4^k} R_{3-4} + Q_{3-4^k} X_{3-4}) / U_3; \end{aligned}$$

5) участок 4–Б:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{4-Б^k} &= \underline{S}_{3-4^H} + \underline{S}_4; \\ \underline{S}_{4-Б^H} &= \underline{S}_{4-Б^k} + \Delta \underline{S}_{4-Б^k} = \\ &= \underline{S}_{4-Б^k} + \{[(\underline{S}_{4-Б^k})^2 + (\underline{S}_{4-Б^k})^2] / U_4^2\} (R_{4-Б} + jX_{4-Б}); \\ U_Б &= U_4 + \Delta U_{4-Б^k} = U_4 + (P_{4-Б^k} R_{4-Б} + Q_{4-Б^k} X_{4-Б}) / U_4. \end{aligned}$$

Второй шаг расчета

Обычно рассчитанное напряжение $U_Б$ не равно заданному, что свидетельствует о несоответствии полученного расчетного режима действительному. Тогда определяется некоторая «коррекционная» мощность (которую в литературе принято называть «уравнительной», хотя такое название не полностью соответствует сути метода подбора с коррекцией по уравнительной мощности), протекание которой по сети приводит к сближению значений напряжений по концам замкнутой электрической сети с заданными.

В общем случае для изменения напряжения источника $U_Б$ до заданного значения $U_Б_{зад}$ по сети должна протекать мощность $\underline{S}_{кор} = [(U_Б - U_Б_{зад}) U_Б_{зад}] / \underline{Z}_{А-Б}$. Направление «коррекционной» мощности должно способствовать увеличению мощностей, протекающих по участкам сети, при необходимости снижения значения $U_Б$ и уменьшению мощностей, протекающих по участкам сети, при необходимости увеличения значения $U_Б$.

В случае протекания по сети «коррекционной» мощности, направленной от источника «Б» к источнику «А» результирующая мощность в начале участка А–1 будет равна

$$\underline{S}_{А-1^H} = \underline{S}_{А-1^H} - \underline{S}_{кор}.$$

Дальнейший расчет будет включать позиции, аналогичные первому шагу:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{А-1^k} &= \underline{S}_{А-1^H} - \Delta \underline{S}_{А-1^H} = \\ &= \underline{S}_{А-1^H} - \{[(\underline{S}_{А-1^H})^2 + (\underline{S}_{А-1^H})^2] / U_A^2\} (R_{А-1} + jX_{А-1}); \\ U_1 &= U_A - \Delta U_{А-1^H} = U_A - (P_{А-1^H} R_{А-1} + Q_{А-1^H} X_{А-1}) / U_A; \\ \underline{S}_{1-2^H} &= \underline{S}_{А-1^k} - \underline{S}_1; \\ \underline{S}_{1-2^k} &= \underline{S}_{1-2^H} - \Delta \underline{S}_{1-2^H} = \\ &= \underline{S}_{1-2^H} - \{[(\underline{S}_{1-2^H})^2 + (\underline{S}_{1-2^H})^2] / U_1^2\} (R_{1-2} + jX_{1-2}); \\ U_2 &= U_1 - \Delta U_{1-2^H} = U_1 - (P_{1-2^H} R_{1-2} + Q_{1-2^H} X_{1-2}) / U_1; \\ \underline{S}_{2-3^k} &= \underline{S}_2 - \underline{S}_{1-2^k}; \\ \underline{S}_{2-3^H} &= \underline{S}_{2-3^k} + \Delta \underline{S}_{2-3^k} = \\ &= \underline{S}_{2-3^k} + \{[(\underline{S}_{2-3^k})^2 + (\underline{S}_{2-3^k})^2] / U_2^2\} (R_{2-3} + jX_{2-3}); \\ U_3 &= U_2 + \Delta U_{2-3^k} = U_2 + (P_{2-3^k} R_{2-3} + Q_{2-3^k} X_{2-3}) / U_2; \\ \underline{S}_{3-4^k} &= \underline{S}_{2-3^H} + \underline{S}_3; \\ \underline{S}_{3-4^H} &= \underline{S}_{3-4^k} + \Delta \underline{S}_{3-4^k} = \\ &= \underline{S}_{3-4^k} + \{[(\underline{S}_{3-4^k})^2 + (\underline{S}_{3-4^k})^2] / U_3^2\} (R_{3-4} + jX_{3-4}); \\ U_4 &= U_3 + \Delta U_{3-4^k} = U_3 + (P_{3-4^k} R_{3-4} + Q_{3-4^k} X_{3-4}) / U_3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{4-Б^H} &= \underline{S}_{4-Б^k} + \Delta \underline{S}_{4-Б^k} = \\ &= \underline{S}_{4-Б^k} + \{[(\underline{S}_{4-Б^k})^2 + (\underline{S}_{4-Б^k})^2] / U_4^2\} (R_{4-Б} + jX_{4-Б}); \\ U_Б &= U_4 + \Delta U_{4-Б^k} = U_4 + (P_{4-Б^k} R_{4-Б} + Q_{4-Б^k} X_{4-Б}) / U_4. \end{aligned}$$

Если и в этом случае найденное напряжение $U_Б$ не равно заданному, расчеты повторяются пока не будет достигнута желаемая точность расчета.

3. Особенности уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощности по напряжению источников питания и потребителей

В общем случае уточненный расчет электрических сетей требует учета нелинейности характеристик элементов сети и статических характеристик мощности по напряжению источников питания и потребителей.

Нелинейные элементы электрических систем и сетей (статические характеристики источников питания, нагрузок потребителей, ветвей намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов, шунтирующих реакторов, поперечных элементов схем замещения линий) и их характеристики рассмотрены в [4, 5, 7].

Подробная характеристика методов определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей для различных случаев задания нагрузок узлов и характеристик участков замкнутых электрических сетей дана в [1–5]. Так для определения параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей использовались «классические» методы контурных уравнений, наложения, размыкания по точкам потокораздела и т. п. Так, потокораспределение в кольцевой электрической сети и сети с двухсторонним питанием находится при принятых допущениях об отсутствии потерь и равенстве напряжений во всех узлах. Это потокораспределение является приближенным; оно может рассматриваться лишь как первое приближение и должно быть уточнено. Кроме того, в случае сети с двухсторонним питанием полученное на начальном этапе потокораспределение уточняется наложением на потоки мощности, рассчитанные в кольцевой электрической сети (при $U_A = U_Б$), уравнительной мощности, направленной от источника питания с большим напряжением в сторону источника питания с меньшим напряжением. На втором этапе расчета простых замкнутых электрических сетей уточняются потоки на участках сети путем учета потерь мощности. При этом кольцевая сеть рассматривается как совокупность двух разомкнутых сетей, связанных в точке потокораздела. Третий завершающий этап расчета заключается в определении напряжений в нагрузочных точках сети. Исходными данными для него служат напряжения на шинах ИП (\underline{U}_A и $\underline{U}_Б$) и найденные на предыдущем этапе расчета уточненные значения мощности на участках сети. Анализ «классического» подхода к определению параметров нормальных режимов простых замкнутых электрических сетей позволяет признать, что *учет нелинейности характеристик элементов сети и*

статических характеристик мощностей по напряжению источников питания и потребителей при расчете простых замкнутых электрических сетей на основе контурных уравнений в три этапа практически не выполним.

Такой же вывод следует сделать относительно применения метода систематизированного подбора для расчета простых замкнутых электрических сетей. Согласно проведенному в подразделе 1.5 [6] анализу, этот метод громоздок и дает весьма приближенный результат.

Предпочтительным для расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей по напряжению источников питания и потребителей является использование метода подбора с коррекцией по уравнительной мощности.

4. Определение приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей

При анализе режимов электрических сетей энергосистем используется понятие *приведенная нагрузка* (мощность), которое вводится (в тех случаях, когда можно вводить упрощающие допущения) с целью упрощения расчетных схем сетей, их математических моделей и сокращения объемов расчетов.

Приведение нагрузки (мощности) заключается в том, что нагрузка, приложенная к шинам НН (СН) ПС, переносится на шины ВН ПС с учетом потерь мощности в сопротивлениях и проводимостях схемы замещения силовых трансформаторов. Приведенная нагрузка, представляющая собой алгебраическую сумму нагрузок, приложенных к шинам НН (СН) ПС, и потерь мощности в продольных сопротивлениях Z_T (Z_n , Z_c) и поперечных проводимостях Y_T силовых трансформаторов считается включенной на шинах ВН ПС, а сами трансформаторы исключаются из расчетной схемы.

Для узлов электрической сети с двухобмоточными трансформаторами (рис. 3) приведенная нагрузка определяется по выражению:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n + \Delta \underline{S}_T(Z) + \Delta \underline{S}_T(Y),$$

где \underline{S}_n – нагрузка на стороне низшего напряжения трансформаторов; $\Delta \underline{S}_T(Z)$ – потери мощности в продольных сопротивлениях схемы замещения трансформаторов; $\Delta \underline{S}_T(Y)$ – потери мощности в поперечных проводимостях схемы замещения трансформаторов.

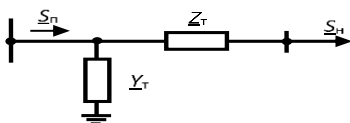


Рис. 3 – Схема замещения узла электрической сети с двухобмоточными трансформаторами

Для узлов электрической сети с трехобмоточными трансформаторами и

автотрансформаторами (рис. 4) приведенная нагрузка определяется по выражению:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n + \underline{S}_c + \Delta \underline{S}_n(Z) + \Delta \underline{S}_c(Z) + \Delta \underline{S}_b(Z) + \Delta \underline{S}_T(Y),$$

где \underline{S}_n и \underline{S}_c – нагрузки на стороне низшего и среднего напряжений трансформаторов; $\Delta \underline{S}_n(Z)$, $\Delta \underline{S}_c(Z)$, $\Delta \underline{S}_b(Z)$ – потери мощности в продольных сопротивлениях схемы замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов (обмотках низшего, среднего и высшего напряжения); $\Delta \underline{S}_T(Y)$ – потери мощности в поперечных проводимостях схемы замещения трансформаторов.

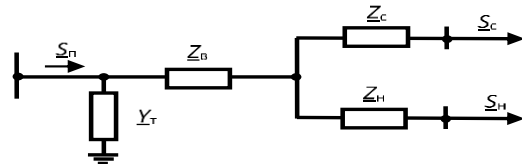


Рис. 4 – Схема замещения узла электрической сети с трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами

Определенную сложность при нахождении приведенных нагрузок узлов с двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами создает необходимость учета всего диапазона изменений коэффициентов трансформации трансформаторов, снабженных устройствами РПН (а также устройствами ПБВ в случае трехобмоточных трансформаторов).

Удовлетворительное решение поставленной задачи определения приведенных нагрузок узлов с учетом реальных нелинейных характеристик их элементов может быть предложено в виде следующей расчетной операции – *определения приведенных нагрузок узлов для условий всех рассматриваемых нормальных режимов с учетом требований встречного регулирования напряжений на вторичной стороне ПС и всего диапазона изменений коэффициентов трансформации трансформаторов, снабженных устройствами РПН (а также устройствами ПБВ в случае трехобмоточных трансформаторов).*

В разделе 4 «Приведенные и расчетные нагрузки узлов электрической сети» [8] рассмотрены примеры определения приведенных нагрузок узлов для условий всех рассматриваемых нормальных режимов с учетом требований встречного регулирования напряжений на низшей стороне ПС (а также стабилизации напряжений на средней стороне ПС) и всего диапазона изменений коэффициентов трансформации двух-, трехобмоточными трансформаторами и автотрансформаторами при уточненных расчетах электрических сетей, снабженных устройствами РПН и ПБВ.

В качестве примера рассмотрим *расчет приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двухобмоточными трансформаторами типа 2×ТДН–16000/110 и нагрузкой на стороне низшего напряжения $S_{ni} = 19$ МВА ($\underline{S}_{ni} = 17,67 + j6,9836$ МВА) с использованием следующих обозначений величин:*

1) согласно условиям встречного регулирования [1–3], желаемые напряжения на стороне низшего напряжения трансформаторов узлов электрической сети в режиме наибольшей нагрузки $U_{н.жел} = 1,05 U_{ном.н} = 1,05 \cdot 10 = 10,5$ кВ;

2) относительное значение желаемого напряжения на низшей стороне трансформаторов узла электрической сети в режиме наибольшей нагрузки $U_{н.жел}^* = U_{н.жел} / U_{ном.н} = 10,5 / 10 = 1,05$ отн. ед.;

3) коэффициенты трансформации трансформаторов, рассчитываемые по формуле $k_{тi} = (U_{н.в} + n_{от.в} \delta_v) / U_{н.н}$, где для трансформаторов 110 кВ с устройством РПН $n_{от.в} = \pm 9$ ответвлений и 0 вывод, $\delta_v \% = 1,78$ % от $U_{н.в}$, номинальные напряжения обмоток трансформаторов $U_{н.в} = 115$ кВ, $U_{н.н} = 11$ кВ;

4) действительные значения напряжения на низшей стороне трансформаторов, приведенные к высшей, рассчитываются по формуле $U_{н.в}^B = U_{н.ж} k_{тi}$ для желаемого напряжения на стороне низшего напряжения трансформаторов и соответствующих значений коэффициентов трансформации трансформаторов для всего интервала значений $n_{от.в}$;

5) фактические значения мощности нагрузки на низшей стороне трансформаторов узла электрической сети соответственно равны:

$$P_{нi}(U) = (a_p + \nu_p U_{н.ж}^* + c_p U_{н.ж}^{*2}) P_{нi};$$

$$Q_{нi}(U) = (a_Q + \nu_Q U_{н.ж}^* + c_Q U_{н.ж}^{*2}) Q_{нi};$$

где $a_p = 0,83$; $\nu_p = -0,3$; $c_p = 0,47$; $a_Q = 4,9$; $\nu_Q = -10,1$; $c_Q = 6,2$, тогда в режиме наибольшей нагрузки

$$P_{н}(U) = (0,83 - 0,3 \cdot 1,05 + 0,47 \cdot 1,05^2) P_{н}^{нб} = 1,0332 P_{н}^{нб};$$

$$Q_{н}(U) = (4,9 - 10,1 \cdot 1,05 + 6,2 \cdot 1,05^2) Q_{н}^{нб} = 1,1305 Q_{н}^{нб};$$

6) действительные значения напряжения на высшей стороне трансформаторов

$$U_{вi} = \sqrt{\{U_{нi}^B + (P_{нi} R_T + Q_{нi} X_T) / U_{нi}^B\}^2 + (P_{нi} X_T - Q_{нi} R_T) / U_{нi}^B\}^2};$$

7) значения потерь мощности в продольной ветви схемы замещения трансформаторов

$$\Delta S_{Ti} = (P_{нi}^2 + Q_{нi}^2) / (U_{нi}^B)^2 (R_T + jX_T);$$

8) значения мощности на высшей стороне трансформаторов с учетом потерь в продольной ветви схемы замещения трансформаторов

$$S_{вi}^1 = S_{нi} + \Delta S_{Ti};$$

9) значения потерь мощности в поперечной ветви схемы замещения трансформаторов

$$\Delta S_{Xi} = G_T U_{вi}^2 + jB_T U_{вi}^2;$$

10) значения мощности на высшей стороне трансформаторов (т. н. приведенная мощность)

$$S_{пi} = S_{вi} = S_{вi}^1 + \Delta S_{Xi}.$$

Рассчитанные значения напряжения $U_{вi}$ и мощности на высшей стороне $S_{пi}$ трансформаторов ТДН–16000/110 представлены в табл. 1.

5. Уточненный расчет простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов)

В подразделе 1.6 [6] подробно изложен алгоритм уточненного расчета простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивающей мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов). В [6] также рассмотрен пример такого расчета, выполняемый на ПК.

Рассмотрим основные положения указанного алгоритма и некоторые результаты расчета, дающие представление о сути предлагаемого метода уточненного расчета простой замкнутой электрической сети. Фрагмент схемы такой сети показан на рис. 5.

Таблица 1 – Расчет приведенных нагрузок (мощностей) ПС с двухобмоточными трансформаторами в режиме наибольшей нагрузки ($U_{н.жел} = 10,5$ кВ)

i	$U_{вi}$, кВ	$P_{вi}$, МВт	$Q_{вi}$, Мвар
+9	133,9137	18,389242	10,161621
+8	132,07863	18,391896	10,223901
+7	130,24808	18,394722	10,289427
+6	128,42232	18,39773	10,358405
+5	126,60162	18,400932	10,431058
+4	124,78629	18,40434	10,116794
+3	122,97666	18,407967	10,588378
+2	121,17309	18,411828	10,673592
+1	119,37597	18,415938	10,763581
0	117,58572	18,420314	10,858685
-1	115,80279	18,424976	10,959271
-2	114,02769	18,299683	10,583553
-3	112,26095	18,435239	11,178546
-4	110,50317	18,440887	11,298161
-5	108,75499	18,446914	11,425122
-6	107,01712	18,45335	11,560015
-7	105,29034	18,460229	11,703487
-8	103,57551	18,467585	11,856252
-9	101,87356	18,475459	12,019100

Примечание. В табл. 1 $n_{от.в}$ обозначено буквой i .

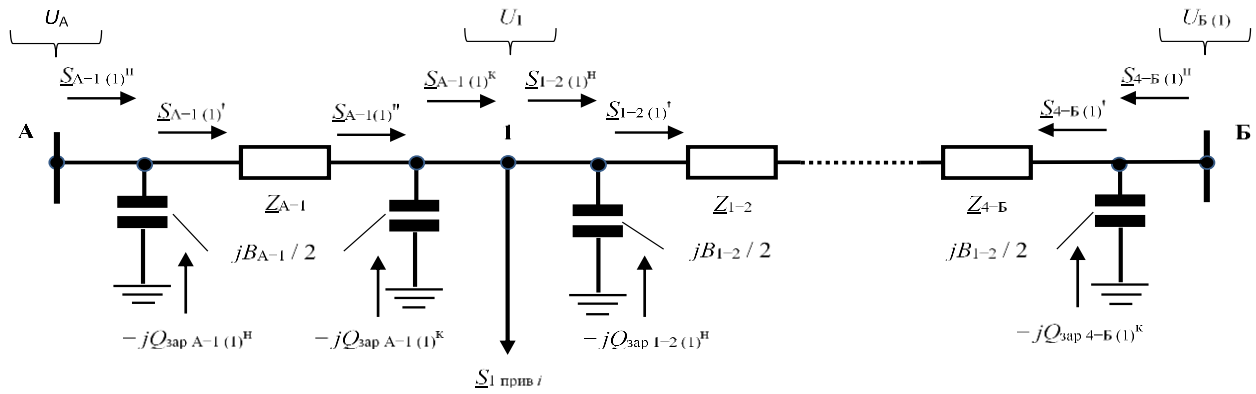


Рис. 5 – Фрагмент схемы простой замкнутой электрической сети

Первый шаг расчета:

1) мощность в начале головного участка сети А-1 (при допущении однородности сети) условно принимается равной мощности

$$\underline{S}_{A-1(1)}^H = [\underline{S}_{1 \text{ прив } i(0)} (L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_{2 \text{ прив } i(0)} (L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_{3 \text{ прив } i(0)} (L_{3-4} + L_{4-B}) + \underline{S}_{4 \text{ прив } i(0)} L_{4-B}] / (L_{A-1} + L_{1-2} + L_{2-3} + L_{3-4} + L_{4-B}),$$

где $\underline{S}_{1 \text{ прив } i(0)}, \dots, \underline{S}_{4 \text{ прив } i(0)}$ – приведенные нагрузки узлов для условий рассматриваемого установившегося режима и «нулевых» ответвлений устройств РПН и ПБВ трансформаторов;

Примечание. Мощность в начале головного участка сети А-1 (при неоднородности сети) условно можно определить по выражению $\underline{S}_{A-1(1)}^H = (\underline{S}_{1 \text{ прив } i(0)} + \underline{S}_{2 \text{ прив } i(0)} + \underline{S}_{3 \text{ прив } i(0)} + \underline{S}_{4 \text{ прив } i(0)}) / 2$;

2) при заданном напряжении ИП \underline{U}_A находятся:

- зарядная (емкостная) мощность трех фаз в начале участка сети А-1

$$-jQ_{зар A-1(1)}^H = -U_A^2 jB_{A-1} / 2;$$

- мощность в начале продольной части участка сети А-1

$$\underline{S}_{A-1(1)}' = \underline{S}_{A-1(1)}^H + jQ_{зар A-1(1)}^H;$$

- потеря мощности на участке А-1

$$\Delta \underline{S}_{A-1(1)}' = \{[(P_{A-1(1)}')^2 + (Q_{A-1(1)}')^2] / U_A^2\} (R_{A-1} + jX_{A-1});$$

где $\underline{S}_{1 \text{ прив } i}$ – приведенная к стороне ВН трансформаторов мощность узла 1; эта мощность принимается из зависимости $\underline{S}_{1 \text{ прив } i} = f(U_{1 \text{ в } i})$ при наибольшем совпадении (близости) напряжений $\underline{U}_{1(1)}$ и $\underline{U}_{1 \text{ в } i}$.

Далее процедура расчета повторяется так же, как и для участка А-1, находятся: – мощность в конце продольной части меньше, чем мощность в начале продольной части, на значение потерь мощности, т. е.

$$\underline{S}_{A-1(1)}'' = \underline{S}_{1-2(1)}' - \Delta \underline{S}_{A-1(1)}';$$

- напряжение в нагрузочном узле 1

$$\underline{U}_{1(1)} = \underline{U}_A - (P_{A-1(1)}' R_{A-1} + Q_{A-1(1)}' X_{A-1}) / U_A - j(P_{A-1(1)}' X_{A-1} - Q_{A-1(1)}' R_{A-1}) / U_A;$$

- зарядная (емкостная) мощность трех фаз в конце участка сети А-1

$$-jQ_{зар A-1(1)}^K = -U_{1(1)}^2 jB_{A-1} / 2;$$

- мощность в конце участка А-1

$$\underline{S}_{A-1(1)}^K = \underline{S}_{A-1(1)}'' + jQ_{зар A-1(1)}^K;$$

- по балансу мощностей в узле 1 рассчитывается мощность в начале участка 1-2

$$\underline{S}_{1-2(1)}^H = \underline{S}_{A-1(1)}^K - \underline{S}_{1 \text{ прив } i},$$

- зарядная (емкостная) мощность в начале участка сети 1-2;

- мощность в начале продольной части участка сети 1-2;

- потеря мощности на участке 1-2;

- мощность в конце продольной части участка 1-2;

- напряжение в нагрузочной точке 2;

- зарядная (емкостная) мощность в конце участка сети 1-2;

- мощность в конце участка 1-2;

- по балансу мощностей в узле 2

рассчитывается мощность в начале участка 2-3.

Такой расчет ведется вплоть до получения напряжения (первое приближение) $\underline{U}_{B(1)}$. Обычно это напряжение не равно заданному напряжению \underline{U}_B , что свидетельствует о несоответствии полученного расчетного режима действительному.

Второй шаг расчета

Для уточнения определяется «коррекционная» мощность, протекание по сети которой приведет к приближению напряжения \underline{U}_B к заданному значению $\underline{U}_{B \text{ зад}}$.

Значение «коррекционной» мощности вычисляется по выражению:

$$\underline{S}_{кор(2)} = [(U_{B(1)} - U_{B \text{ зад}}) U_{B \text{ зад}}] / \underline{Z}_{A-B}^*,$$

где \underline{Z}_{A-B}^* – сопряженный комплекс сопротивления; $\underline{Z}_{A-B}^* = (R_{A-B} - jX_{A-B})$.

Направление мощности $\underline{S}_{кор(2)}$ должно быть принято от исходной точки Б (при $U_{B(1)} > U_B$) либо к исходной точке Б (при $U_{B(1)} < U_B$).

Тогда при $U_{B(1)} > U_B$ на участке А-1 результирующая мощность будет равна

$$\underline{S}_{A-1(2)}^H = \underline{S}_{A-1(1)}^H + \underline{S}_{\text{кор}(2)}.$$

Дальнейший расчет проводится по соотношениям первого шага вплоть до нахождения величины $U_{B(2)}$.

Выводы. В результате находится новое, уточненное значение напряжения $\underline{U}_{B(2)}$. Если оно недостаточно точно соответствует заданному значению \underline{U}_B зад, определяется новое значение «коррекционной» мощности $\underline{S}_{\text{кор}(3)}$ и т. д., пока не будет достигнута желаемая точность расчета.

Такой алгоритм основан на повторении однотипных вычислений, легко реализуем на ПК и может быть использован для уточненных расчетов простых замкнутых электрических сетей с учетом нелинейных характеристик элементов схем замещения электрических сетей и статических характеристик мощностей источников питания и потребителей по напряжению методом подбора с коррекцией по уравнивательной мощности (с учетом устройств РПН и ПБВ трансформаторов).

Список литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
2. Электрические системы и сети / Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И., Перхач В.С.; под ред. Г.И. Денисенко. – Киев: Вища шк., 1986. – 584 с.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Барбашов И. В. Основы анализа установившихся режимов электрических систем и сетей: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Ю. Н. Веприк, В. В. Черкашина, О. В. Шутенко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – 184 с.
5. Барбашов И.В. Общая характеристика и основы анализа установившихся режимов современных электрических систем и сетей: текст лекций / И.В. Барбашов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 240 с.
6. Барбашов И. В. Расчет установившихся режимов замкнутых электрических сетей в примерах и задачах: учеб. пособ. / И. В. Барбашов, Г. В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 144 с.

7. Барбашов И.В. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Г.В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – 160 с.

8. Барбашов И.В. Расчет установившихся режимов разомкнутых электрических сетей в примерах и задачах: учеб. пособ. / И.В. Барбашов, Г.В. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – 164 с.

References (transliterated)

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A., etc. *Elektricheskiye sistemy. Elektricheskiye seti* [Electrical system. Electric networks]. Moscow, High school Publ, 1998. 511 p.
2. Buslova N. V., Vinoslavskiy V. N., Denisenko G. I., Perhach V. S. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Kyiv, High school Publ, 1986. 584 p.
3. Idelchik V. I. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1989. 592 p.
4. Barbashov I. V., Veprik Yu N., Cherkashina V. V., Shutenko O. V. *Osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh sistem i setey* [Bases of the analysis of the established modes of electric systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2010. 184 p.
5. Barbashov I. V. *Obshchaya kharakteristika i osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov sovremennykh elektricheskikh sistem i setey* [General characteristics and bases of the analysis of the established modes of modern electrical systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2013. 240 p.
6. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Raschet ustanovivshikhsya rezhimov zamknytykh elektricheskikh setey v primerakh i zadachakh* [Calculation of the established modes of electric networks closed in examples and tasks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2018. 144 p.
7. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Parametry i skhemy zameshcheniya elementov elektricheskikh sistem v primerakh i zadachakh* [Parameters and equivalent circuit elements of electrical systems in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2017. 160 p.
8. Barbashov I. V., Omel'yanenko G. V. *Raschet ustanovivshikhsya rezhimov razomknytykh elektricheskikh setey v primerakh i zadachakh* [Calculation of steady-state modes of open electrical networks in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2018. 164 p.

Поступила (received) 10.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбашов Ігор Володимирович (Барбашов Игорь Владимирович, Barbashov Igor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)1460438; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com

Обухов Валерій Романович (Обухов Валерий Романович, Obukhov Valeriy Romanovich) студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (095)1399595; e-mail: prosto.valeriy.o@gmail.com

Риморєв Дмитро Сергійович (Рыморев Дмитрий Сергеевич, Rymoriev Dmytro Serhiyovych) – студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)5225851; e-mail: Rydis@ukr.net

И. В. БАРБАШОВ, В. Р. ОБУХОВ, Д. С. РЫМОРЕВ

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКИХ НОМИНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрены схемы замещения и их параметры для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений. В линиях сверхвысоких напряжений (от 330 кВ и выше) анализ режимов работы основывается на представлении линии как цепи с распределенными параметрами. Параметры продольных и поперечных элементов П-образной симметричной схемы замещения линий электропередачи определялись с разной степенью точности в зависимости от требований к учету распределенности их параметров. Были рассмотрены основные соотношения, связывающие напряжения и токи по концам протяженной линии (уравнение длинной линии) с её параметрами и представление в расчетах линий сверхвысоких номинальных напряжений пассивными четырехполюсниками с комплексными постоянными. Основное внимание в работе было уделено более наглядному и удобному подходу к определению параметров П-образной схемы замещения линии через удельное сопротивление и проводимости, используя комплексные или действительные поправочные коэффициенты, учитывающие распределенность параметров по длине протяженной воздушной линии. Приведены результаты расчетов для линий 330 кВ при длинах до 500 км и 750 кВ при длинах до 1000 км. Расчеты выполнялись по специально разработанной компьютерной программе.

Ключевые слова: схемы замещения и их параметры воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений, волновой характер передачи электроэнергии, уравнение длинной линии, пассивные четырехполюсники с комплексными постоянными, комплексные и действительные поправочные коэффициенты к удельным сопротивлениям и проводимостям

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

СКЛАДАННЯ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПРОТЯЖНИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ НАДВИСОКИХ НОМІНАЛЬНИХ НАПРУГ

Розглянуті схеми заміщення і їх параметри для протяжних повітряних ліній надвисоких номінальних напруг. У лініях надвисоких напруг (від 330 кВ і вище) аналіз режимів роботи ґрунтується на виставі лінії як ланцюги з розподіленими параметрами. Параметри поздовжніх і поперечних елементів П-образної симетричної схеми заміщення ліній електропередачі визначалися з різним ступенем точності залежно від вимог до обліку розподіленості їх параметрів. Були розглянуті основні співвідношення, що зв'язують напруги й струми по кінцях протяжної лінії (рівняння довгої лінії) з її параметрами й вистава в розрахунках ліній надвисоких номінальних напруг пасивними чотириполюсниками з комплексними постійними. Основна увага в роботі було приділено більш наочному й зручному підходу до визначення параметрів П-образної схеми заміщення лінії через питомі опори й провідності, використовуючи комплексні або дійсні поправочні коефіцієнти, що враховують розподільність параметрів по довжині протяжної повітряної лінії. Наведені результати розрахунків для ліній 330 кВ при довжинах до 500 км і 750 кВ при довжинах до 1000 км. Розрахунки виконувалися по спеціально розробленій комп'ютерній програмі.

Ключові слова: схеми заміщення і їх параметри повітряних ліній надвисоких номінальних напруг, хвильовий характер передачі електроенергії, рівняння довгої лінії, пасивні чотириполюсники з комплексними постійними, комплексні й дійсні поправочні коефіцієнти до питомих опорів і провідностей

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

COMPOSITION OF SCHEME OF SUBSTITUTION AND DETERMINATION OF THEIR PARAMETERS FOR EXTENDED AIR LINES OF ULTRA-HIGH NOMINAL VOLTAGES

The scheme of substitution and their parameters were considered for extended ultra-high rated voltage air lines. In the lines of ultra-high voltages (from 330 kV and above), the analysis of operating modes is based on the representation of the line as a chain with distributed parameters. The parameters of the longitudinal and transverse elements of the U-shaped symmetric equivalent circuit of power transmission lines were determined with varying degrees of accuracy depending on the requirements for taking into account the distribution of their parameters. The main relations relating the voltages and currents at the ends of the extended line (the equation of the long line) with its parameters and representation in the calculations of the lines of ultrahigh nominal voltages by passive quadripoles with complex constants were considered. The focus of the work was paid to a more visual and convenient approach to determining the parameters of the U-shaped line replacement circuit through resistivity and conductivity, using complex or actual correction factors that take into account the distribution of parameters along the length of an extended air line. The calculation results for 330 kV lines with lengths up to 500 km and 750 kV with lengths up to 1000 km were given. The calculations were performed using a specially developed computer program.

Keywords: scheme of substitution and their parameters of ultra-high nominal voltage air lines, wave nature of power transmission, long line equation, passive quadripoles with complex constants, complex and real correction factors for specific resistances and conductivities

Введение. При анализе работы линий напряжением до 330 кВ включительно и длиной 200–300 км в большинстве случаев можно не учитывать волновой характер передачи электроэнергии. Как правило, режим работы таких линий рассчитывается на основе их схем замещения с сосредоточенными параметрами $R_{\pi} = r_0 l$, $X_{\pi} = x_0 l$, $G_{\pi} = g_0 l$ и $B_{\pi} = b_0 l$ (рис. 1).

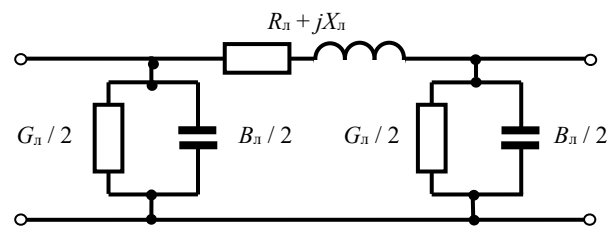


Рис. 1 П-образная схема замещения воздушных линий с сосредоточенными параметрами

© И. В. Барбашов, В. Р. Обухов, Д. С. Рыморев, 2019

В линиях сверхвысоких напряжений (от 330 кВ и выше) появляется необходимость в той или иной мере учитывать волновой характер передачи электроэнергии. Анализ режимов работы подобных линий основывается на представлении их как цепи с распределенными параметрами (рис. 2), где каждый малый элемент линии длиной dl обладает активным $r_0 dl$ и индуктивным $x_0 dl$ сопротивлениями, активной $g_0 dl$ и емкостной $b_0 dl$ проводимостями. При этом считается, что параметры линии ($r_0 dl$, $x_0 dl$, $g_0 dl$ и $b_0 dl$) равномерно распределены вдоль её длины. Такое представление о линии связано с некоторой идеализацией, поскольку ряд факторов, например наличие провеса проводов в пролете, изменяет равномерность распределения индуктивности и емкости проводов; также не постоянна интенсивность коронного разряда по длине провода.

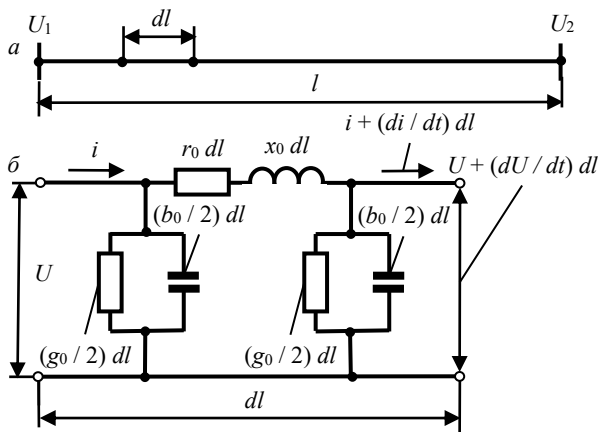


Рис. 2 Участок линии длиной dl с распределенными параметрами (а) и П-образная схема замещения элемента длины dl (б)

Анализ основных достижений и литературы.

Изданное под редакцией проф. Московского энергетического института В. А. Веникова учебное пособие [1] содержит подробное рассмотрение схем замещения электропередач переменного тока и, в частности, схем замещения, представляющих длинные линии.

Также под редакцией проф. В. А. Веникова были изданы учебные пособия «Расчеты и анализ режимов работы сетей» [2], содержащее пример определения параметров П-образной схемы замещения, константы четырехполюсника и коэффициенты уравнения длинной линии для электропередачи 500 кВ длиной 500 км, и «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях» [3], в котором приведено сопоставление параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи 500 кВ при вариации её длины от 250 до 1000 км при различных способах учета распределенности параметров и допущениях об отсутствии потерь на корону и представлении её как линии без потерь. А под редакцией проф. В. А. Строева было издано учебное пособие «Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях» [4], содержащее приближенное

определение параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи 500 кВ длиной от 250 до 1000 км, пренебрегая активной проводимостью и приближенно учитывая распределенность параметров по длине вещественными поправочными коэффициентами.

Постановка задачи. Современные линии сверхвысоких напряжений имеют диапазон номинальных напряжений от 330 до 1150 кВ, а их длины варьируются в пределах 250–1000 км и будут, бесспорно, в дальнейшем достигать больших значений. Поэтому рассмотрение схем замещения и их параметров для таких электропередач имеет важное практическое значение.

В изданном в 2017 г. учебном пособии «Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах» [5] линии 330 кВ рассматривались при длинах до 500 км, 500 кВ – до 750 км, 750 кВ – до 1000 км, 1150 кВ – до 1500 км.

Дальнейшие исследования, связанные с составлением схем замещения и определением их параметров для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений, должны включать рассмотрение схем замещения и их параметров для линий электропередачи протяженностью, соответствующей длине, близкой к полуволновой (примерно до 3000 км).

Основные подходы и соотношения, используемые при составлении схем замещения и определение их параметров для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений. Параметры продольных и поперечных элементов П-образной симметричной схемы замещения линий электропередачи могут быть определены с разной степенью точности в зависимости от требований к учету распределенности их параметров по длине [6].

Основные соотношения, связывающие напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 по концам протяженной линии (уравнение длинной линии) с её параметрами $\underline{Z}_{вол}$, γ_0 , l имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / \underline{Z}_{вол}) \operatorname{sh}(\gamma_0 l) + \underline{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l), \end{aligned}$$

где $\underline{Z}_{вол}$ – волновое сопротивление линии, Ом; $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ – коэффициент распространения волны на единицу длины, 1/км.

Волновое сопротивление $\underline{Z}_{вол}$ и коэффициент распространения волны γ_0 определяются через её удельные параметры по выражениям

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{вол} &= \sqrt{(z_0 / \gamma_0)} = \sqrt{[(r_0 + jx_0) / (g_0 + jb_0)]} = \underline{Z}_{вол} \angle \xi; \\ \gamma_0 &= \sqrt{(z_0 \gamma_0)} = \sqrt{[(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)]} = \gamma_0 \angle \zeta = \beta_0 + j\alpha_0, \end{aligned}$$

где β_0 – коэффициент затухания; α_0 – коэффициент изменения фазы.

В свою очередь, параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_л$ и $\underline{Y}_л$ могут быть получены как

$$\begin{aligned} \underline{Z}_л &= \underline{B} = \underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l), \\ \underline{Y}_л &= (\underline{A} - 1) / \underline{B} = [\operatorname{ch}(\gamma_0 l) - 1] / [\underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l)] = \end{aligned}$$

$$= (2 / Z_{\text{вол}}) \text{th} (\gamma_0 l / 2).$$

Линии сверхвысоких номинальных напряжений в расчетах могут представляться пассивными четырехполосниками с комплексными постоянными \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} . Эти постоянные определяются по параметрам линии \underline{Z}_l и \underline{Y}_l

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + (\underline{Z}_l \underline{Y}_l) / 2, \quad \underline{B} = \underline{Z}_l, \quad \underline{C} = \underline{Y}_l [1 + (\underline{Z}_l \underline{Y}_l) / 4]$$

либо по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии,

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch} (\gamma_0 l), \quad \underline{B} = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{sh} (\gamma_0 l), \quad \underline{C} = (1 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{sh} (\gamma_0 l).$$

На практике более наглядно и удобно определять параметры П-образной схемы замещения линии через удельное сопротивление \underline{z}_0 , проводимость \underline{y}_0 и поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , учитывающие распределенность параметров по длине, т. е. по формулам:

$$\underline{Z}_l = (\underline{z}_0 l) \underline{K}_Z, \quad \underline{Y}_l = (\underline{y}_0 l) \underline{K}_Y,$$

где $\underline{K}_Z = \text{sh} (\gamma_0 l) / (\gamma_0 l)$; $\underline{K}_Y = \text{th} (\gamma_0 l / 2) / (\gamma_0 l / 2)$.

Так как для определения \underline{K}_Z и \underline{K}_Y требуется вычисление гиперболических функций, в качестве первого приближения используют разложение правой части \underline{K}_Z и \underline{K}_Y в ряд и ограничиваются его первыми двумя членами.

$$\text{Тогда } \underline{K}_Z \approx \underline{K}_Z' = 1 + (\gamma_0 l)^2 / 6;$$

$$\underline{K}_Y \approx \underline{K}_Y' = 1 - (\gamma_0 l)^2 / 12.$$

Поскольку \underline{K}_Z и \underline{K}_Y – комплексные величины, более удобно использовать действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения, т. е. определение её параметров в виде

$$R_l = (r_0 l) k_R; \quad X_l = (x_0 l) k_X;$$

$$G_l = (g_0 l) k_G; \quad B_l = (b_0 l) k_B,$$

где $k_R = (1 - x_0 b_0 l^2 / 3) + [1 - (x_0 / r_0)^2] r_0 g_0 l^2 / 6$;
 $k_X = 1 - (x_0 b_0 l^2 / 6) [(1 - (r_0 / x_0)^2) + r_0 g_0 l^2 / 3]$;
 $k_G = (1 + x_0 b_0 l^2 / 6) + [(b_0 / g_0)^2 - 1] r_0 g_0 l^2 / 12$;
 $k_B = (1 + x_0 b_0 l^2 / 12) - [2 + g_0 x_0 / (b_0 r_0)] r_0 g_0 l^2 / 12$.

Анализ выражений для k_R , k_X и k_B показывает, что их значения в основном определяются первыми слагаемыми, которые не зависят от $G_l = g_0 l$.

$$\text{Тогда } k_R' = 1 - x_0 b_0 l^2 / 3;$$

$$k_X' = 1 - (x_0 b_0 l^2 / 6) [(1 - (r_0 / x_0)^2)];$$

$$k_B' = 1 + x_0 b_0 l^2 / 12.$$

Обычно эти выражения используются при определении R_l , X_l и B_l , когда при расчетах пренебрегают потерями активной мощности на корону, принимая $g_0 = 0$.

Примечание. В последнем случае в схеме замещения, строго говоря, должна присутствовать ветвь с эквивалентной активной проводимостью, отличной от нуля, обусловленная тем, что, несмотря на допущение об отсутствии потерь на корону, коэффициент \underline{K}_Y остается комплексной величиной, а следовательно, \underline{Y}_l будет содержать вещественную компоненту. Однако в силу её малости при $l \leq 1000$ км этой составляющей обычно пренебрегают, полагая $\underline{Y}_l = j b_0 l k_B'$.

При рассмотрении идеализированной линии (линии без потерь, в которой r_0 и g_0 равны нулю) её реактивные параметры определяются с помощью коэффициентов

$$k_X'' = 1 - x_0 b_0 l^2 / 6; \quad k_B'' = 1 + x_0 b_0 l^2 / 12.$$

Примечание. В статье рассматриваются воздушные линии напряжениями 330 и 750 кВ, соответствующими основной шкале номинальных напряжений, принятых на Украине.

Результаты составления схем замещения и определение их параметров для воздушной линии 330 кВ, выполненной проводами 2×АС–400/51, расположенными горизонтально ($D = 8,7$ м).

1. Удельное активное сопротивление воздушной линии $r_0 = 0,0741 / 2 = 0,03705$ Ом/км принимается по справочным данным приложения А [5].

2. Удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$x_0 = 0,144 \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) + 0,0157 / n_p,$$

где $D_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами линии; для заданного горизонтального расположения фаз $D_{\text{ср}} = 1,26 D = 1,26 \cdot 8,7 \approx 11$ м; $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр расщепленной фазы

$$d_{\text{эк}} = 2^{n_p} \sqrt{\{ [a_p / (2 \sin (\pi / n_p))]^{(n_p - 1)} (d / 2) n_p \}},$$

где n_p – число проводов в фазе; $n_p = 2$; a_p – среднее геометрическое расстояние между проводами в фазе; $a_p = 0,4$ м; d – диаметр провода; для провода АС–400/51 $d_{\text{пр}} = 27,5$ мм (приложение А [5]).

Тогда

$$d_{\text{эк}} = 2^{2} \sqrt{\{ [400 / (2 \sin (\pi / 2))] (27,5 / 2) 2 \}} = 148,32 \text{ мм};$$

$$x_0 = 0,144 \lg (2 \cdot 11000 / 148,32) + 0,0157 / 2 = 0,321 \text{ Ом/км}.$$

3. Удельная емкостная проводимость воздушной линии

$$b_0 = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) =$$

$$= 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 \cdot 11000 / 148,32) =$$

$$= 3,491 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

4. Удельная зарядная мощность, генерируемая воздушной линией,

$$q_0 = b_0 U^2 = b_0 (1,05 U_{\text{ном}})^2 = 3,491 \cdot 10^{-6} (1,05 \cdot 330)^2 = 0,419 \text{ Мвар/км}.$$

Примечание. Зарядная мощность q_0 подсчитывается для воздушной линии 330 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $1,05 U_{\text{ном}}$.

5. Удельные активные потери мощности (на корону) воздушной линии $\Delta P_{\text{кор } 0 \text{ нб}} = 2,6$ кВт/км и $\Delta P_{\text{кор } 0 \text{ нм}} = 1,8$ кВт/км принимаются по справочным данным приложения А [5].

$$\text{Тогда } \Delta P_{\text{кор } 0} \approx (2,6 + 1,8) / 2 = 2,2 \text{ кВт/км}.$$

6. Удельная активная проводимость воздушной линии

$$g_0 = \Delta P_{\text{кор } 0} / (1,05 U_{\text{ном}})^2 = 2,2 \cdot 10^{-3} / (1,05 \cdot 330)^2 =$$

$$= 0,018 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Примечание. Активная проводимость g_0 подсчитывается для воздушной линии 330 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $1,05 U_{\text{ном}}$.

7. Экономическая плотность тока для провода $2 \times \text{АС}-400/51$ принимается равной $j_{\text{эк}} = 1 \text{ А/мм}^2$.

Тогда экономическая мощность воздушной линии $S_{\text{эк}} = \sqrt{3} I_{\text{эк}} U_{\text{ном}} = \sqrt{3} (1 \cdot 2 \cdot 400) 330 \cdot 10^{-3} \approx 457 \text{ МВА}$.

8. Отношения удельного индуктивного и активного сопротивлений воздушной линии равно $x_0 / r_0 = 0,321 / 0,037 \approx 8,7$. Значения x_0 существенно превосходят значения r_0 , которые могут не учитываться в схемах замещения воздушных линий 330 кВ.

9. Отношение удельной зарядной и экономической мощностей воздушной линии равно $q_0 / S_{\text{эк}} = 0,419 / 457 = 0,0009$. Значение q_0 составляет примерно 0,09 % от $S_{\text{эк}}$. Для реальной воздушной линии 330 кВ при $l = 250 \text{ км}$ значение $Q_{\text{зар}}$ составляет примерно 23 % от $S_{\text{эк}}$, и зарядную мощность следует учитывать в схемах замещения воздушных линий 330 кВ.

10. Полное удельное сопротивление воздушной линии равно

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = (0,037 + j0,321) = 0,3231 \angle 83,425^\circ \text{ Ом/км.}$$

11. Полная удельная проводимость воздушной линии равна

$$\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = (0,018 + j3,491) 10^{-6} = 3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ \text{ См/км.}$$

12. Полные удельные поперечные мощности в схемах замещения воздушной линии равны

$$\underline{S}_{\text{поп}} = \Delta P_{\text{кор } 0} - jq_0 = (0,0022 - j0,419) \text{ МВА/км.}$$

13. Для воздушной линии 330 кВ длиной $l = 250 \text{ км}$ сосредоточенные параметры П-образной схемы замещения равны

$$\underline{Z}_{\text{л}} = R_{\text{л}} + jX_{\text{л}} = (r_0 + jx_0) l / n_{\text{л}} = (0,037 + j0,321) 250 / 1 = (9,25 + j80,25) = 80,781 \angle 83,425^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{Y}_{\text{л}} = G_{\text{л}} + jB_{\text{л}} = (g_0 + jb_0) l n_{\text{л}} = (0,018 + j3,491) 10^{-6} \cdot 250 \cdot 1 = (4,50 + j872,25) 10^{-6} = 872,75 \cdot 10^{-6} \angle 89,70^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{S}_{\text{поп}} = \Delta P_{\text{кор}} - jQ_{\text{зар}} = (\Delta P_{\text{кор } 0} - jq_0) l n_{\text{л}} = (0,0022 - j0,419) 250 \cdot 1 = (0,550 - j104,750) \text{ МВА.}$$

14. Волновые параметры (волновое сопротивление $\underline{Z}_{\text{вол}}$ и коэффициент распространения волны γ_0) для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ

$$\underline{Z}_{\text{вол}} = \sqrt{[(0,3231 \angle 83,425^\circ) / (3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ)]} = 304,234 \angle -3,140^\circ = (303,777 - j16,664) \text{ Ом;}$$

$$\gamma_0 = \sqrt{[(0,3231 \angle 83,425^\circ) (3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ)]} = 1,062 \cdot 10^{-3} \angle 86,564^\circ = (0,0636 + j1,0602) 10^{-3} \text{ 1/км.}$$

15. Основные соотношения, связывающие напряжения $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ и токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по концам протяженной линии (уравнение длинной линии),

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \text{ ch}(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh}(\gamma_0 l);$$

$$\underline{I}_1 = (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ sh}(\gamma_0 l) + \underline{I}_2 \text{ ch}(\gamma_0 l).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (0,9652 \angle 0,247^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (79,8423 \angle 83,506^\circ);$$

$$\underline{I}_1 = (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (0,8626 \cdot 10^{-3} \angle 89,785^\circ) + \underline{I}_2 (0,9652 \angle 0,247^\circ).$$

16. Постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии,

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch}(\gamma_0 l); \quad \underline{B} = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh}(\gamma_0 l); \quad \underline{C} = [\text{sh}(\gamma_0 l)] / \underline{Z}_{\text{вол}}.$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{A} = \underline{D} = 0,9652 \angle 0,247^\circ; \quad \underline{B} = 79,8423 \angle 83,506^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{C} = 0,8626 \cdot 10^{-3} \angle 89,785^\circ \text{ См.}$$

17. Параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_{\text{л}}$ и $\underline{Y}_{\text{л}}$ с учетом распределенности их параметров по длине линии

$$\underline{Z}_{\text{л}} = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh}(\gamma_0 l); \quad \underline{Y}_{\text{л}} = (2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ th}(\gamma_0 l / 2).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{Z}_{\text{л}} = 79,8423 \angle 83,506^\circ = (9,0304 + j79,3300) \text{ Ом;}$$

$$\underline{Y}_{\text{л}} = (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,664^\circ) = (5,1485 + j877,8729) 10^{-6} \text{ См.}$$

Примечание. Соотношения, связывающие напряжения $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ и токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по концам протяженной линии с учетом распределенности её параметров по длине, постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии, с учетом распределенности её параметров по длине, а также параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_{\text{л}}$ и $\underline{Y}_{\text{л}}$ с учетом распределенности её параметров по длине были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета.

20. Параметры П-образной схемы замещения линии через удельные сопротивление \underline{z}_0 и проводимость \underline{y}_0 и поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , учитывающие распределенность параметров по длине протяженной линии,

$$\underline{Z}_{\text{л}} = (\underline{z}_0 l) \underline{K}_Z; \quad \underline{Y}_{\text{л}} = (\underline{y}_0 l) \underline{K}_Y,$$

где $\underline{K}_Z = \text{sh}(\gamma_0 l) / (\gamma_0 l)$; $\underline{K}_Y = \text{th}(\gamma_0 l / 2) / (\gamma_0 l / 2)$.

В качестве первого приближения при определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y также рассчитывались значения $\underline{K}_Z \approx \underline{K}_Z' = 1 + (\gamma_0 l)^2 / 6$ и $\underline{K}_Y \approx \underline{K}_Y' = 1 - (\gamma_0 l)^2 / 12$.

Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250$ и 500 км были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета, и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для воздушной линии 330 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км	
	250	500
\underline{K}_Z	0,9884 \angle 0,0809°	0,9540 \angle 0,3283°
\underline{K}_Y	1,0059 \angle - 0,0406°	1,0240 \angle - 0,1665°
\underline{K}_Z'	0,9883 \angle 0,0815°	0,9534 \angle 0,3379°
\underline{K}_Y'	1,0058 \angle - 0,0400°	1,0233 \angle - 0,1574°

Определенные по выражениям пункта 20 расчета зависимости модулей (Z_l , Y_l) и аргументов (φ_Z , φ_Y) комплексов \underline{Z}_l и \underline{Y}_l для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при разных её длинах адекватно отображают её волновые свойства. Полученные зависимости Z_l , Y_l , φ_Z и φ_Y от длины линии могут служить эталоном для сопоставления с ними аналогичных зависимостей, полученных при разных допущениях.

Анализ данных табл. 1 показывает:

1) поправочные коэффициенты представляют собой практические действительные числа, которые тем ближе к единице, чем меньше длина линии. Для участков линий с длиной 250 и 500 км отличие модулей K_Z от 1 составляет 1,2 и 4,6 %, а модулей K_Y – 0,6 и 2,4 %. Отличием модулей K_Z и K_Y от 1 (1,2 и 0,6 % соответственно) при длине линии $l \leq 250$ км обычно пренебрегают;

2) погрешность в определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' по приближенным формулам, то есть отличие модулей K_Z' от K_Z и K_Y' от K_Y растет с увеличением длины и достигает при $l = 500$ км примерно 0,07 % для K_Z' и K_Y' . Это дает основание при длинах линии 330 кВ $l \leq 500$ км использовать вместо поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y более простые выражения для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' .

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250$ км через поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 79,8423 \angle 83,506^\circ = (9,0304 + j79,3300) \text{ Ом}; \\ \underline{Y}_l &= (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,664^\circ) = \\ &= (5,1485 + j877,8729) 10^{-6} \text{ См}, \end{aligned}$$

а через поправочные коэффициенты \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y'

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 79,8390 \angle 83,506^\circ = (9,0293 + j79,3268) \text{ Ом}; \\ \underline{Y}_l &= (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,665^\circ) = \\ &= (5,1397 + j877,8376) 10^{-6} \text{ См}. \end{aligned}$$

21. Действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при разных её длинах были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 данного расчета, и приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения поправочных коэффициентов k_R , k_X , k_G , k_B , а также k_R' , k_X' и k_B' или k_X'' и k_B'' для воздушной линии 330 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км	
	250	500
k_R	0,9761	0,9046
k_X	0,9885	0,9540
k_G	1,1421	1,5686
k_B	1,0058	1,0233
k_R'	0,9767	0,9066
k_X'	0,9885	0,9539
k_B'	1,0058	1,0233
k_X''	0,9883	0,9533
k_B''	1,0058	1,0233

Анализ данных табл. 2 показывает, что выводы о возможности отказа от учета распределенности параметров при $l \leq 250$ км, полученные выше при исследовании изменения \underline{K}_Z и \underline{K}_Y (\underline{K}_Z' и \underline{K}_Y') при вариации длины линии (см. табл. 1), аналогичны и при рассмотренном подходе, поскольку значения k_R , k_X , k_G и k_B при $l = 250$ км мало отличаются от единицы. Сопоставление точных и приближенных значений k_R' , k_X' и k_B' показывает, что допущение об отсутствии потерь на корону, то есть пренебрежение второй слагаемой в формулах расчета k_X и k_B практически не сказывается на значениях k_X' и k_B' ($k_X \approx k_X'$, $k_B \approx k_B'$), а отличие k_R' от k_R при $l = 250$ и 500 км не превосходит 0,06 и 0,24 % соответственно. Переход к рассмотрению идеализированной линии связан только с изменением поправочного коэффициента к индуктивному сопротивлению, при этом отличие k_X'' от k_X' при $l = 500$ км составляет приблизительно 0,06 %. Таким образом, при длинах линий $l \leq 500$ км в использовании более точных выражений для k_R , k_X , k_G и k_B нет практической необходимости и, в зависимости от принятых допущений, достаточно использовать для расчетов поправочных

коэффициентов выражения для k_R' , k_X' и k_B' или k_X'' и k_B'' .

Полученные в табл. 2 результаты позволяют представить полную и расчетную схемы замещения воздушной линии 330 кВ, показанные на рис. 3, а, б схемами, соответствующими случаям:

1) при допущении об отсутствии потерь активной мощности на корону ($G_{л} = 0$) (рис. 3, в), т. е.

$$\underline{Z}_{л} = R_{л} + jX_{л} = r_0 l k_R' + jx_0 l k_X';$$

$$Y_{л} = jB_{л} = jb_0 l k_B';$$

2) при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_{л} = 0; G_{л} = 0$) (рис. 3, з), т. е.

$$Z_{л} = jX_{л} = jx_0 l k_X''; Y_{л} = jB_{л} = jb_0 l k_B''.$$

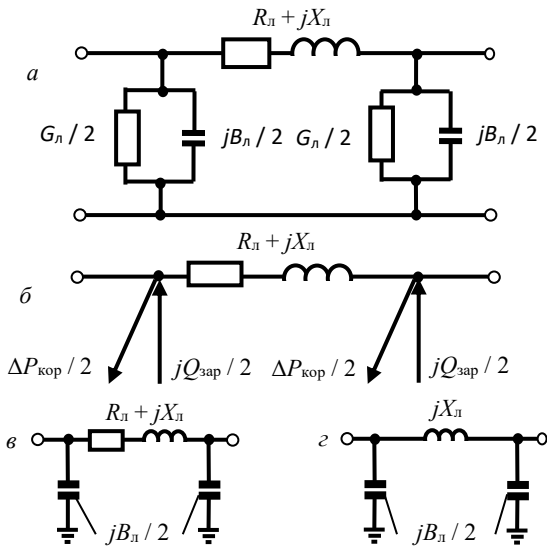


Рис. 3 – П-образные схемы замещения воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений: а и б – полная и расчетная; в – при допущении об отсутствии потерь на корону ($G_{л} = 0$); з – при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_{л} = 0; G_{л} = 0$)

Результаты составления схем замещения и определение их параметров для воздушной линии 750 кВ, выполненной проводами 4×АС–500/64, расположенными горизонтально ($D = 15,5$ м).

1. Удельное активное сопротивление воздушной линии $r_0 = 0,0604 / 4 = 0,0151$ Ом/км принимается по справочным данным из приложения А [5].

2. Удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$x_0 = 0,144 \lg (2 D_{cp} / d_{эк}) + 0,0157 / n_p,$$

где D_{cp} – среднее геометрическое расстояние между фазами линий; для заданного горизонтального расположения фаз воздушной линии $D_{cp} = 1,26 D = 1,26 \cdot 15,5 \approx 19,5$ м; $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр расщепленной фазы

$$d_{эк} = 2^{n_p} \sqrt{\{ [a_p / (2 \sin (\pi / n_p))]^{(n_p - 1)} (d / 2) n_p \}};$$

n_p – число проводов в фазе; $n = 4$; a_p – среднее геометрическое расстояние между проводами в фазе;

$a_p = 0,6$ м; d – диаметр провода; для провода АС–500/64 $d = 30,6$ мм (приложение А [5]).

Тогда

$$d_{эк} = 2^4 \sqrt{\{ [600 / (2 \sin (\pi / 4))]^3 (30,6 / 2) 4 \}} = 523,09 \text{ мм};$$

$$x_0 = 0,144 \lg (2 \cdot 19500 / 523,09) + 0,0157 / 4 = 0,274 \text{ Ом/км}.$$

3. Удельная емкостная проводимость воздушной линии

$$b_0 = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 D_{cp} / d_{эк}) = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 \cdot 19500 / 523,09) = 4,048 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

4. Удельная зарядная мощность, генерируемая воздушной линией,

$$q_0 = b_0 U_{ном}^2 = 4,048 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 = 2,277 \text{ Мвар/км}.$$

Примечание. Зарядная мощность q_0 подсчитывается для воздушной линии 750 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $U_{ном}$.

5. Удельные активные потери мощности (на корону) воздушной линии $\Delta P_{кор0} = 16,6$ кВт/км принимаются по справочным данным приложения А [5].

6. Удельная активная проводимость воздушной линии

$$g_0 = \Delta P_{кор0} / U_{ном}^2 = 16,6 \cdot 10^{-3} / 750^2 = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ См/км}.$$

Примечание. Активная проводимость g_0 подсчитывается для воздушной линии 750 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $U_{ном}$.

7. Экономическая плотность тока для провода 4×АС–500/64 принимается равной $j_{эк} = 1$ А/мм².

Тогда экономическая мощность воздушной линии

$$S_{эк} = \sqrt{3} I_{эк} U_{ном} = \sqrt{3} (1 \cdot 4 \cdot 500) 750 \cdot 10^{-3} \approx 5196 \text{ МВА}.$$

8. Отношение удельного индуктивного и активного сопротивлений воздушной линии равно $x_0 / r_0 = 0,274 / 0,01475 = 18,6$. Значение x_0 существенно превосходит значение r_0 , которое может не учитываться в схемах замещения воздушных линий 750 кВ.

9. Отношение удельной зарядной и экономической мощностей воздушной линии равно $q_0 / S_{эк} = 2,277 / 5196 = 0,00044$. Значение q_0 составляет примерно 0,044 % от $S_{эк}$. Для реальной воздушной линии 750 кВ при $l = 500$ км значение $Q_{зар}$ составляет примерно 22 % от $S_{эк}$, и зарядную мощность следует учитывать в схемах замещения воздушных линий 750 кВ.

10. Полное удельное сопротивление воздушной линии равно:

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = (0,015 + j0,274) = 0,2744 \angle 86,846^\circ \text{ Ом/км}.$$

11. Полная удельная проводимость воздушной линии равна:

$$\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = (0,0282 + j4,048) 10^{-6} = 4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ \text{ См/км}.$$

12. Полные удельные поперечные мощности в схемах замещения воздушной линии равны:

$$\underline{S}_{\text{поп } 0} = \Delta P_{\text{кор } 0} - jq_0 = (0,0166 - j2,277) \text{ МВА/км.}$$

13. Волновые параметры (волновое сопротивление $\underline{Z}_{\text{вол}}$ и коэффициент распространения волны γ_0) для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вол}} &= \sqrt{[(0,2744 \angle 86,846^\circ) / (4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ)] =} \\ &= 260,363 \angle -1,378^\circ \text{ Ом;} \\ \gamma_0 &= \sqrt{[(0,2744 \angle 86,846^\circ) (4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ)] =} \\ &= 1,0540 \cdot 10^{-3} \angle 88,223^\circ = \\ &= (0,03268 + j1,0535) 10^{-3} \text{ 1/км.} \end{aligned}$$

14. Основные соотношения, связывающие напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 по концам протяженной линии (уравнение длинной линии):

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \text{ ch } (\gamma_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\gamma_0 l); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ sh } (\gamma_0 l) + \underline{I}_2 \text{ ch } (\gamma_0 l). \end{aligned}$$

Для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ:

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,8646 \angle 0,543^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (130,9568 \angle 87,232^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (1,9318 \cdot 10^{-3} \angle 89,768^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,8646 \angle 0,543^\circ); \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,7042 \angle 1,417^\circ) + \\ &+ \sqrt{3} \underline{I}_2 (185,0781 \angle -91,382^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (2,7302 \cdot 10^{-3} \angle 89,987^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,7042 \angle 1,417^\circ); \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,4957 \angle 3,344^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (226,4670 \angle 87,508^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (3,3406 \cdot 10^{-3} \angle 90,325^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,4957 \angle 3,344^\circ). \end{aligned}$$

15. Постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии:

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch } (\gamma_0 l); \quad \underline{B} = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\gamma_0 l); \quad \underline{C} = [\text{sh } (\gamma_0 l)] / \underline{Z}_{\text{вол}}.$$

Для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,8646 \cdot 10^{-3} \angle 0,544^\circ; \\ \underline{B} &= 130,9570 \angle 87,013^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 1,9318 \cdot 10^{-3} \angle 89,768^\circ \text{ См;} \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,7042 \angle 1,417^\circ; \quad \underline{B} = 185,0781 \angle 87,232^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 2,7303 \cdot 10^{-3} \angle 89,987^\circ \text{ См;} \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,4957 \angle 3,344^\circ; \quad \underline{B} = 226,4670 \angle 87,508^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 3,3406 \cdot 10^{-3} \angle 90,235^\circ \text{ См.} \end{aligned}$$

16. Параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений \underline{Z}_l и \underline{Y}_l с учетом распределенности их параметров по длине линии

$$\underline{Z}_l = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\gamma_0 l); \quad \underline{Y}_l = (2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ th } (\gamma_0 l / 2).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 500 кВ

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 130,9568 \angle 87,013^\circ = (6,8238 + j130,7789) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (2,0721 \cdot 10^{-3} \angle 89,516^\circ) = \\ &= (17,5062 + j2072,0577) 10^{-6} \text{ См;} \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 185,0781 \angle 87,232^\circ = (8,9383 + j184,8622) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (3,2043 \cdot 10^{-3} \angle 89,402^\circ) = \\ &= (33,4688 + j3204,1651) 10^{-6} \text{ См;} \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 226,4670 \angle 87,508^\circ = (9,8487 + j226,2527) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (4,4687 \cdot 10^{-3} \angle 89,217^\circ) = \\ &= (61,1039 + j4468,2702) 10^{-6} \text{ См.} \end{aligned}$$

Примечание. Соотношения, связывающие напряжения U_1 , U_2 и токи I_1 , I_2 по концам протяженной линии с учетом распределенности их параметров по длине протяженной линии, постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии, с учетом распределенности параметров по длине протяженной линии, а также параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений Z_l и Y_l с учетом распределенности их параметров по длине протяженной линии были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета.

17. Параметры П-образной схемы замещения линии через удельные сопротивление \underline{z}_0 и проводимость \underline{y}_0 и поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , учитывающие распределенность параметров по длине протяженной линии, определяются как

$$\underline{Z}_l = (\underline{z}_0 l) \underline{K}_Z; \quad \underline{Y}_l = (\underline{y}_0 l) \underline{K}_Y,$$

где $\underline{K}_Z = \text{sh } (\gamma_0 l) / (\gamma_0 l)$; $\underline{K}_Y = \text{th } (\gamma_0 l / 2) / (\gamma_0 l / 2)$.

В качестве первого приближения при определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y также рассчитывались значения $\underline{K}_Z \approx \underline{K}_Z' = 1 + (\gamma_0 l)^2 / 6$ и $\underline{K}_Y \approx \underline{K}_Y' = 1 - (\gamma_0 l)^2 / 12$.

Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при длине $l = 250, 500, 750$ и 1000 км были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета, и приведены в табл. 3.

Определенные по выражениям пункта 18 рассматриваемого расчета зависимости модулей (Z_l , Y_l) и аргументов (φ_Z , φ_Y) комплексных \underline{Z}_l и \underline{Y}_l для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при разных её длинах адекватно отображают её волновые свойства. Полученные зависимости Z_l , Y_l , φ_Z и φ_Y от длины линии могут служить эталоном для сопоставления с ними аналогичных зависимостей, полученных при разных допущениях.

Таблица 3 – Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для воздушной линии 750 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км			
	250	500	750	1000
\underline{K}_Z	0,9885 └ 0,0413°	0,9544 └ 0,11675°	0,8993 └ 0,3862°	0,8252 └ 0,7244°
\underline{K}_Y	1,0058 └ -0,0207°	1,0238 └ -0,0849°	1,0554 └ -0,1993°	1,1039 └ -0,3835°
\underline{K}_Z'	0,9885 └ 0,0416°	0,9538 └ 0,1723°	0,8961 └ 0,4127°	0,8153 └ 0,8207°
\underline{K}_Y'	1,0058 └ -0,0204°	1,0231 └ -0,0803°	1,0520 └ -0,1758°	1,0925 └ -0,3062°

Анализ данных табл. 3 показывает:

1) поправочные коэффициенты представляют собой практически действительные числа, которые тем ближе к единице, чем меньше длина линии. Для участков линий с длиной 250, 500 и 750 км отличие модулей \underline{K}_Z от 1 составляет 1,2; 4,6 и 10 %, а модулей \underline{K}_Y – 0,6, 2,4 и 5,5 %. Отличием модулей \underline{K}_Z и \underline{K}_Y от 1 (1,2 и 0,6 % соответственно) при длине линии $l \leq 250$ км обычно пренебрегают;

2) погрешность в определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' по приближенным формулам, то есть отличие модулей \underline{K}_Z' от \underline{K}_Z и \underline{K}_Y' от \underline{K}_Y растет с увеличением длины и достигает при $l = 750$ км примерно 0,4 и 0,3 % для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' . Это дает основание при длинах линии 750 кВ $l \leq 750$ км использовать вместо поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y более простые выражения для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' .

18. Действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при разных её длинах были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 данного расчета, и приведены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает, что выводы о возможности отказа от учета распределенности параметров при $l \leq 250$ км, полученные выше (см. табл. 3) при исследовании изменения \underline{K}_Z и \underline{K}_Y (\underline{K}_Z' и \underline{K}_Y'), аналогичны для коэффициентов k_R , k_X , k_G и k_B при $l = 250$ км, значения которых мало отличаются от единицы.

Таблица 4 – Значения поправочных коэффициентов k_R , k_X , k_G , k_B , а также k_R' , k_X' и k_B' или k_X'' и k_B'' для воздушной линии 750 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км			
	250	500	750	1000
k_R	0,9754	0,9017	0,7889	0,6074
k_X	0,9885	0,9540	0,8964	0,8159
k_G	1,0573	1,2290	1,5153	1,9305
k_B	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924
k_R'	0,9769	0,9076	0,7920	0,6203
k_X'	0,9885	0,9539	0,8963	0,8157
k_B'	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924
k_X''	0,9884	0,9538	0,8960	0,8151
k_B''	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924

Сопоставление точных и приближенных значений k_R' , k_X' и k_B' показывает, что допущение об отсутствии потерь на корону, то есть пренебрежение второй слагаемой в формулах расчета k_X и k_B практически не сказывается на значениях k_X' и k_B' ($k_X \approx k_X'$, $k_B \approx k_B'$), а отличие k_R' от k_R при $l = 250$ и 500 км не превосходит 0,15 и 0,65 % соответственно. Переход к рассмотрению идеализированной линии (без потерь) связан только с изменением поправочного коэффициента к индуктивному сопротивлению, при этом отличие k_X'' от k_X' при $l = 250$ и 500 км составляет приблизительно 0,01 %. Таким образом, при длинах линий $l \leq 500$ км в использовании более точных выражений для k_R , k_X , k_G и k_B нет практической необходимости и, в зависимости от принятых допущений, достаточно использовать для расчетов поправочных коэффициентов выражения для k_R' , k_X' и k_B' или для k_X'' и k_B'' .

Полученные в табл. 4 результаты позволяют дополнить полную и расчетную схемы замещения воздушной линии 750 кВ, показанные на рис. 3, а, б схемами, соответствующими следующим случаям:

1) при допущении об отсутствии потерь активной мощности на корону ($G_{\text{л}} = 0$) (см. рис. 3, в), т. е.

$$\underline{Z}_{\text{л}} = R_{\text{л}} + jX_{\text{л}} = r_0 l k_R' + jx_0 l k_X'; \\ Y_{\text{л}} = jB_{\text{л}} = jb_0 l k_B';$$

2) при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_{\text{л}} = 0$; $G_{\text{л}} = 0$) (см. рис. 3, з), т. е.

$$\underline{Z}_{\text{л}} = jX_{\text{л}} = jx_0 l k_X''; Y_{\text{л}} = jB_{\text{л}} = jb_0 l k_B''.$$

Список литературы

1. Веников В. А. Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения : учеб. пособ. для электроэнерг. вузов : в 7 т. Т. 3 / В. А. Веников, В. В. Худяков, Н. Д. Анисимова и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Высш. школа, 1972. – 368 с.
2. Расчеты и анализ режимов работы сетей / Н. Д. Анисимова, В. А. Веников, В. В. Ежков и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергия, 1974. – 336 с.
3. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, В. В. Ежков и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
4. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. / В. В. Ежков, Г. К. Зарудский, Э. Н. Зуев и др.; под ред. В. А. Строева. – М. : Высш. шк., 1999. – 352 с.
5. Барбашов И. В. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах : учеб. пособ. / И. В. Барбашов, Г. В. Омеляненко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. – 158 с.
6. Барбашов И. В. Общая характеристика и основы анализа установившихся режимов современных электрических систем и сетей : текст лекций / И. В. Барбашов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 240 с.

References (transliterated)

1. Venikov V. A., Khudyakov V. V., Anisimova N. D., etc. *Elektricheskiye sistemy. Peredacha energii peremennym i postoyannym tokom vysokogo napryazheniya* [Electrical systems. Transmission of energy by alternating and direct current of high voltage]. Moscow, High school Publ, 1972. 368 p.
2. Anisimova N. D., Venikov V. A., Ezhkov V. V., etc. *Raschety i analiz rezhimov raboty setey* [Calculations and analysis of operating modes of the networks]. Moscow, Energy Publ, 1974. 336 p.
3. Astakhov Yu. N., Venikov V. A., Ezhkov V. V., etc. *Elektroenergeticheskiye sistemy v primerakh i illyustratsiyakh* [Electric power systems in examples and illustrations]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1983. 504 p.
4. Ezhkov V. V., Zarudsky G. K., Zuev E. N., etc. *Elektricheskiye sistemy i seti v primerakh i illyustratsiyakh* [Electrical systems and networks in examples and illustrations]. Moscow, High school Publ, 1999. 352 p.
5. Barbashov I. V., Omelyanenko G. V. *Parametry i skhemy zameshcheniya elementov elektricheskikh sistem v primerakh i zadachakh* [Parameters and equivalent circuit elements of electrical systems in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2017. 158 p.
6. Barbashov I. V. *Obshchaya kharakteristika i osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov sovremennykh elektricheskikh sistem i setey* [General characteristics and bases of the analysis of the established modes of modern electrical systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2013. 240 p.

Поступила (received) 10.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбашов Ігор Володимирович (Barbashov Igor Vladimirovich, Barbashov Igor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)1460438; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com

Обухов Валерій Романович (Obukhov Valeriy Romanovich, Obukhov Valeriy Romanovich) студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (095)1399595; e-mail: prosto.valeriy.o@gmail.com

Рыморєв Дмитро Сергійович (Rymoriev Dmytro Serhiovych, Rymoriev Dmytro Serhiovych) – студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)5225851; e-mail: Rydis@ukr.net

Ю. Л. САЕНКО, Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Проведен сравнительный анализ существующих методов идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений в точке общего присоединения с точки зрения их адекватности и точности. Сравнительный анализ проводился путем математического моделирования на основе тестовой системы электроснабжения с двумя присоединениями относительно одной точки общего присоединения. Сравнительному анализу подверглись методы включения/отключения потребителя, фоновой несимметрии системы, направления искажающих мощностей, эквивалентных симметричных составляющих проводимостей и наложения в сочетании с активным экспериментом. Результатом проведенных исследований оказалось не идентичность решений всех рассмотренных методов, а также несостоятельность идентификации абсолютно симметричного присоединения.

Ключевые слова: несимметрия напряжений; источник искажений; точка общего присоединения; идентификация; доленое участие; электроэнергетическая система; обобщенная нагрузка.

Ю. Л. САЕНКО, Д. М. КАЛЮЖНИЙ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ У ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

Проведено порівняльний аналіз існуючих методів ідентифікації та оцінки впливу джерел несиметрії напруг у точці загального приєднання з точки зору їх адекватності та точності. Порівняльний аналіз проводився шляхом математичного моделювання на основі тестової системи електропостачання з двома приєднаннями відносно однієї точки загального приєднання. У порівняльному аналізі були розглянуті методи включення / відключення споживача, фонові несиметрії системи, напрямку спотворюючих потужностей, еквівалентних симетричних складових провідностей і накладення в поєднанні з активним експериментом. Результатом проведених досліджень виявилось не ідентичність рішень усіх розглянутих методів, а також неспроможність ідентифікації абсолютно симетричного приєднання.

Ключові слова: несиметрія напруг; джерело спотворень; точка загального приєднання; ідентифікація; часткова участь; електроенергетична система; змішане навантаження.

YU. L. SAYENKO, D. N. KALYUZHNIY

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF IDENTIFICATION AND ASSESSMENT OF DISTURBANCE SOURCES OF UNBALANCED VOLTAGE IN THE POINT OF COMMON COUPLING

The article considers a comparative analysis of the existing methods of identification and assessment of disturbance sources of unbalanced voltage in the point of common coupling in terms of their adequacy and accuracy is carried out. Comparative analysis was carried out by mathematical modeling based on a test power supply system with two connections with respect to one point of common coupling. Methods of switching on / off of the consumer, background unbalance of the system, direction of distorting powers, equivalent symmetric components of conductance, and superposition in combination with an active experiment were subjected to a comparative analysis. The result of the research was not the identity of the solutions of all the considered methods, as well as the inconsistency of the identification of the absolutely symmetrical connection.

Keywords: unbalance voltage; disturbance source; point of common coupling; identification; share; electric power system; mixed load.

Постановка проблеми. Несимметрия напряжений являється однією з найбільш важливих проблем в питанні якості електричної енергії [1]. Це обумовлено значительними фінансовими втратами, які несуть постачальники і споживачі електроенергії при пониженому її якості [2]. Очевидно, що ідентифікації і оцінці впливу джерел несиметрії напруг на якість електроенергії в точці загального присоединения (ТОП) являється актуальною задачею, рішення якої дозволить не тільки розподіляти компенсацію економічних втрат серед присоединений ТОП, але і проводити контроль допустимих емісії іскажень напруг, а також визначати потужність і місце установки симетрично-компенсуючих пристроїв.

На сьогоднішній день розроблено велику кількість методів рішення розглянутої проблеми, які принципово відрізняються своїми базовими математичними моделями [3]. По цій причині виникає питання їх порівняльного

аналіза з точки зору адекватності і точності рішення розглянутого питання.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Початком досліджень проблеми ідентифікації і оцінки джерел іскаження симетрії напруг можна вважати 1967 рік, коли був введений перший стандарт на якість електричної енергії. Першим її рішенням виявився метод включення/відключення споживача [4]. Не дивлячись на свою простоту, його реалізація викликає практичні труднощі. Наступні спроби рішення розглянутої проблеми можна об'єднати однією загальною математичною моделлю, яка ґрунтується на використанні схем заміщення Нортона або Тевеніна [4-16]. Для цих методів головним недоліком стали невідомі параметри схеми заміщення електроенергетичної системи. Серед останніх нових рішень слід виділити метод симетричних складових еквівалентних провідностей, який розроблено на основі

© Ю. Л. Саєнко, Д. М. Калюжний, 2019

принципа компенсации симметричных составляющих несимметричных частей напряжений [17]. К его главному недостатку следует отнести косвенный подход оценки долевых вкладов в создание несимметрии напряжений исключительно по параметрам схем замещения нагрузки и электроэнергетической системы.

Цель исследований. Провести сравнительный анализ существующих методов идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений с точки зрения их адекватности и точности.

Основные материалы исследований изложены в следующем порядке. Вначале дано описание методов, подлежащих сравнительному анализу. В конце проведен их сравнительный анализ на базе тестовой математической модели.

Рассмотрение существующих методов идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений будем проводить на простейшем примере системы электроснабжения (рис. 1), где с одной стороны относительно ТОП подключена электроэнергетическая система (С), а с другой – потребитель электроэнергии (П).

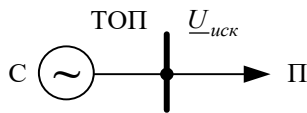


Рис 1. Система электроснабжения

В случае превышения уровня несимметрии напряжений по отдельным последовательностям ($\underline{U}_{иск}$) допустимых значений в ТОО необходимо определить в какой мере электроэнергетическая система и потребитель участвует в этом. В именованных единицах измерения это выражается следующим образом:

$$\underline{U}_{иск} = \underline{U}_{иск}^C + \underline{U}_{иск}^П, \quad (1)$$

где $\underline{U}_{иск}^C$ и $\underline{U}_{иск}^П$ – вклады в искажение симметрии напряжения со стороны электроэнергетической системы и потребителя, соответственно.

В относительных единицах измерения степень участия в искажении симметрии напряжений каждого присоединения выражается так:

$$d_{иск}^C + d_{иск}^П = 1, \quad (2)$$

где $d_{иск}^C$ и $d_{иск}^П$ – вещественные коэффициенты, характеризующие долевые вклады электроэнергетической системы и потребителя в создание несимметрии напряжений в ТОО.

Метод включения/отключения. Согласно данному методу [4] долевой вклад потребителя в создание несимметрии напряжений определяется через разность напряжений симметричных составляющих после ($\underline{U}_{иск}^{вкл}$) и до ($\underline{U}_{иск}^{откл}$) подключения потребителя к ТОО:

$$\underline{U}_{иск}^П = \underline{U}_{иск}^{вкл} - \underline{U}_{иск}^{откл} \quad (3)$$

Несмотря на свою простоту, практическая реализация данного метода в рамках методики измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ), которая регламентирует продолжительность элементарного i -го интервала измерений длительностью 10 периодов основной частоты [18], невозможна. Кроме этого $\underline{U}_{иск}^П$, определенное по (3), не отображает влияние исключительно искажающего потребителя на величину $\underline{U}_{иск}$. Оно отображает общее изменение уровня напряжения в ТОО, вызванное отключением или включением потребителя. Исходя из этого область его применения ограничивается предварительной оценкой влияния нового подключения на качество электрической энергии в ТОО.

Метод фоновой несимметрии системы. Данный метод можно считать разновидностью метода включения/отключения потребителя, суть которого заключается в следующем. Несимметрия напряжений в начале линии $\underline{U}_{иск}^{откл}$, которая питает ТОО со стороны электроэнергетической системы, считается постоянной и независимой от нагрузки потребителя (рис. 2). Она характеризует так называемую фоновую несимметрию системы $\underline{U}_{иск}^C$, которая создается исключительно электроэнергетической системой.

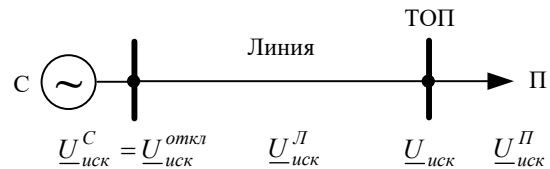


Рис 2. Система электроснабжения с выделенной линией

На основе принятых допущений долевой вклад потребителя в создание несимметрии напряжений в ТОО может быть определен через разность $\underline{U}_{иск}^{откл}$ и падения напряжения в линии $\underline{U}_{иск}^Л$ по отдельным последовательностям:

$$\underline{U}_{иск}^П = \underline{U}_{иск} - (\underline{U}_{иск}^C + \underline{U}_{иск}^Л), \quad (4)$$

Подробное описание данного метода, который рекомендован рабочей группой CIGRE C4.109 [5] как основной, а также способов определения фоновой несимметрии системы $\underline{U}_{иск}^C$, вычисления $\underline{U}_{иск}^Л$, в том числе и $\underline{U}_{иск}^П$ для различных случаев нагрузки, приведено в [5–8]. Очевидно, что точность данного метода будет определяться, в первую очередь, адекватностью определения фоновой несимметрии системы $\underline{U}_{иск}^C$ и ее стабильностью в процессе измерения ПКЭ.

Метод симметричных составляющих эквивалентных проводимостей. Согласно данному методу [17] долевого вклад потребителя в создание несимметрии напряжений в относительных единицах может быть определен как:

$$d_{иск}^{\Pi} = \left| \frac{Y_{иск}^{\Pi}}{Y_{иск}^C} \right| \left[\left| \frac{Y_{иск}^C}{Y_{иск}^C} \right| + \left| \frac{Y_{иск}^{\Pi}}{Y_{иск}^C} \right| \right]. \quad (5)$$

В выражение (5) входят симметричные составляющие эквивалентных проводимостей $Y_{иск}^{C(\Pi)}$, которые определяются через их фазные значения следующим образом:

$$\begin{cases} Y_2^{C(\Pi)} = \frac{1}{3} \cdot (Y_A^{C(\Pi)} + a \cdot Y_B^{C(\Pi)} + a^2 \cdot Y_C^{C(\Pi)}), \\ Y_0^{C(\Pi)} = \frac{1}{3} \cdot (Y_A^{C(\Pi)} + a^2 \cdot Y_B^{C(\Pi)} + a \cdot Y_C^{C(\Pi)}), \end{cases} \quad (6)$$

где $a = e^{j120}$ – оператор поворота метода симметричных составляющих.

К недостаткам данного метода следует отнести две его неопределенности. Первая из них 0/0 возникает, когда все $Y_{иск}^{C(\Pi)}$ равны нулю, а напряжение $U_{иск}$ в

ТОП отлично от нуля. Эта ситуация имеет место при симметричных пассивных и несимметричных активных параметрах схемы замещения системы электроснабжения. Вторая неопределенность, связанная с идентификацией несимметричного присоединения как неискажающего, возникает при нулевых значениях одной из двух симметричных проводимостей $Y_2^{C(\Pi)}$ или $Y_0^{C(\Pi)}$ несимметричного присоединения.

Кроме рассмотренных выше методов в мировой научной общественности предложено еще два способа для определения $U_{иск}^{\Pi}$, которые нашли более широкое применение в задаче распределения ответственности за искажение синусоидальной формы кривой напряжения [9-16]. В основе этих методов лежит представление системы электроснабжения в виде схемы замещения Тевенина (рис.3) по каждому виду искажения симметрии напряжений. В этой схеме замещения ЭДС $E_{иск}^C$ и $E_{иск}^{\Pi}$ характеризуют источники искажения симметрии напряжений в электроэнергетической системе и у потребителя. Параметры $Z_{иск}^C$ и $Z_{иск}^{\Pi}$ представляют собой сопротивления их неискажающих частей.

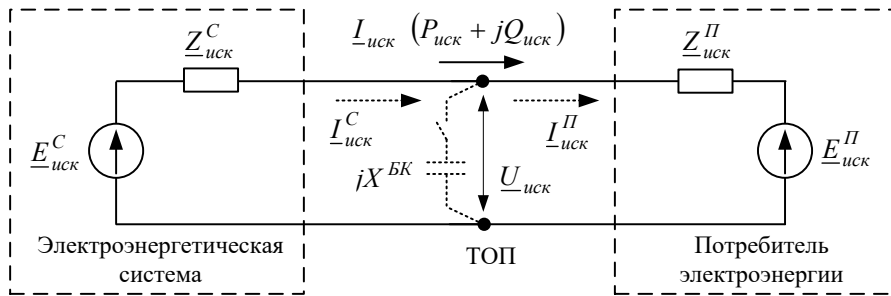


Рис 3. Схема замещения Тевенина

Первый из этих методов заключается в определении в относительных единицах долевого участия в создании несимметрии напряжений по направлению искаженных (вторичных) мощностей [9]:

$$d_{иск}^{C(\Pi)} = \frac{P_{иск}^{-C(\Pi)} \cdot [P_{иск}^{-C} + P_{иск}^{-\Pi}] + Q_{иск}^{-C(\Pi)} \cdot [Q_{иск}^{-C} + Q_{иск}^{-\Pi}]}{[P_{иск}^{-C} + P_{иск}^{-\Pi}]^2 + [Q_{иск}^{-C} + Q_{иск}^{-\Pi}]^2}, \quad (7)$$

где $P_{иск}^{-C(\Pi)}$ и $Q_{иск}^{-C(\Pi)}$ – искаженные активная и реактивная мощности присоединений ТОП с отрицательными значениями.

Следует отметить, что данный метод существует в нескольких модификациях, где для определения $d_{иск}^{C(\Pi)}$ используются отдельно активные и отдельно реактивные искаженные мощности [10-11].

К недостаткам данного метода следует отнести неоднозначность его решения при наличии двух присоединений в ТОП с источниками искажений симметрии напряжений. В этом случае искаженные мощности $P_{иск}$ и $Q_{иск}$ могут быть как положительными, так и отрицательными. Объясняется

это зависимостью знака данных мощностей от угла δ между векторами ЭДС $E_{иск}^C$ и $E_{иск}^{\Pi}$, который может принимать любые значения в диапазоне от 0 до 2π . Именно по этой причине данный метод признан несостоятельным [12].

Следующий способ предполагает использование метода наложения [11-16] в рамках которого $U_{иск}^{\Pi}$ может быть определено следующим образом:

$$U_{иск}^{\Pi} = Z_{иск}^C \cdot \frac{(U_{иск} - I_{иск} \cdot Z_{иск}^{\Pi})}{Z_{иск}^{\Pi} + Z_{иск}^C}, \quad (8)$$

Так как уравнение (9) содержит три неизвестные величины ($U_{иск}^{\Pi}$, $Z_{иск}^C$ и $Z_{иск}^{\Pi}$), то для раскрытия этой неопределенности предлагается в ТОП проводить активный эксперимент [16-17], например, с использованием коммутируемой батареи конденсаторов (БК). В результате по измеренным токам и напряжениям с включенной и отключенной БК

(рис. 3) $\underline{Z}_{иск}^C$ и $\underline{Z}_{иск}^II$ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{иск}^C = (\underline{U}_{иск} - \underline{U}_{иск}^{BK}) / (\underline{I}_{иск} - \underline{I}_{иск}^C); \\ \underline{Z}_{иск}^II = (\underline{U}_{иск} - \underline{U}_{иск}^{BK}) / (\underline{I}_{иск} - \underline{I}_{иск}^II), \end{cases} \quad (9)$$

где $\underline{U}_{иск}^{BK}$ – напряжение искажения в ТОП после включения БК;

$\underline{I}_{иск}$ – ток искажения в ТОП до подключения БК;

$\underline{I}_{иск}^C$ – ток искажения, протекающий от электроэнергетической системы к ТОП с включенной БК;

$\underline{I}_{иск}^II$ – ток искажения, протекающий от ТОП с включенной БК к потребителю электроэнергии.

Следует отметить, что адекватность данного метода будет обеспечиваться при следующих условиях. Во-первых, возмущение в системе электроснабжения должно быть вызвано только включением БК. Во-вторых, точность измерений токов и напряжений должна быть прецизионной, чтобы обеспечить устойчивость решения уравнения (10). Кроме этого, следует обратить внимание на трудности

практической реализации данного метода, которые заключаются в следующем. Во-первых, для определения токов $\underline{I}_{иск}^C$ и $\underline{I}_{иск}^II$ необходимо организовывать дополнительные измерительные каналы в ТОП до и после места включения БК. Во-вторых, длительность i-го элементарного измерения ПКЭ несоизмерима мала по сравнению с процессом физического включения/отключения БК, что ставит под сомнение возможность технической реализации этих коммутаций на протяжении всего интервала времени измерений ПКЭ.

Для численного анализа рассмотренных методов воспользуемся результатами математического моделирования параметров режима работы тестовой системы электроснабжения. Ее структурная схема приведена на рис. 4, а схема замещения – на рис. 5.

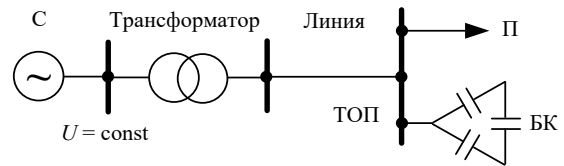


Рис 4. Тестовая система электроснабжения

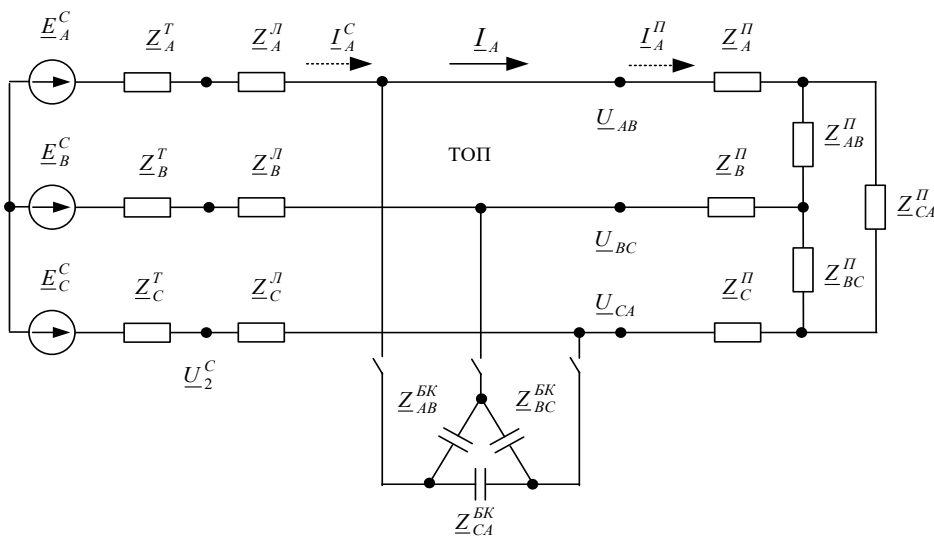


Рис 5. Схема замещения тестовой системы электроснабжения

Для однозначной трактовки результатов сравнительного анализа рассмотренных методов в тестовой системе электроснабжения потребитель электроэнергии был задан симметричным, что соответствует случаю неискажающего присоединения с нулевым фактическим вкладом. Единственным источником искажения симметрии напряжений в ТОП являлась электроэнергетическая система. С учетом этих условий значения параметров тестовой схемы замещения, приведенные к базисному напряжению ТОП (10 кВ), были заданы следующими. Электроэнергетическая система: $\underline{E}_A^C = 6,351 \cdot e^{j^0}$ В; $\underline{E}_B^C = 6,12 \cdot e^{j^{238}}$ В; $\underline{E}_C^C = 6,409 \cdot e^{j^{121}}$ В. Трансформатор

типа ТМ 2500/35: $\underline{Z}_A^T = \underline{Z}_B^T = \underline{Z}_C^T = 0,414 + j \cdot 2,86$ Ом. Воздушная линия АС-70 мм²: $\underline{Z}_A^II = \underline{Z}_B^II = \underline{Z}_C^II = 0,844 + j \cdot 0,864$ Ом. Нагрузка с максимальной мощностью 650 + j 250 кВА: $\underline{Z}_A^II = \underline{Z}_B^II = \underline{Z}_C^II = 121 + j \cdot 46$ Ом; $\underline{Z}_{AB}^II = \underline{Z}_{BC}^II = \underline{Z}_{CA}^II = 130 + j \cdot 55$ Ом. БК номинальной мощностью 300 кВар: $\underline{Z}_{AB}^{BK} = \underline{Z}_{BC}^{BK} = \underline{Z}_{CA}^{BK} = -j \cdot 100$ Ом.

Параметры режима работы тестовой системы электроснабжения с учетом различных состояний потребителя и БК приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений на

уровень несимметрии напряжений по обратной последовательности в ТОП. Из полученных данных следует, что все методы дают неидентичные результаты. Кроме этого они либо не идентифицируют симметричную нагрузку как источник искажения симметрии напряжений с соответствующими долевыми вкладами за исключением метода основанном на использовании активного

эксперимента, либо не могут идентифицировать ее вообще, как, например, метод симметричных составляющих эквивалентных проводимостей. Очевидно, что данный результат является неприемлемым, а существующие методы идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений в ТОП требуют дальнейшего совершенствования.

Таблица 1 – Параметры режима работы тестовой системы электроснабжения

Параметр	Состояние потребителя и БК		
	Потребитель отключен	Потребитель включен, БК отключена	Потребитель включен, БК включена
\underline{U}_2^C , В	$243,65 \cdot e^{-j58,52}$	$241,67 \cdot e^{-j59,33}$	$243,94 \cdot e^{-j59,42}$
\underline{U}_{AB} , кВ	$10,91 \cdot e^{j28,41}$	$10,75 \cdot e^{j27,45}$	$10,88 \cdot e^{j27,2}$
\underline{U}_{BC} , кВ	$10,68 \cdot e^{-j89,69}$	$10,53 \cdot e^{-j89,69}$	$10,66 \cdot e^{-j90,91}$
\underline{U}_{CA} , кВ	$11,11 \cdot e^{j150,35}$	$10,95 \cdot e^{j149,39}$	$11,08 \cdot e^{j149,14}$
\underline{U}_2 , В	$243,65 \cdot e^{-j58,52}$	$240,17 \cdot e^{-j59,49}$	$243,12 \cdot e^{-j59,74}$
\underline{I}_A , А	-	$35,84 \cdot e^{j23,25}$	-
\underline{I}_B , А	-	$34,48 \cdot e^{-j143,34}$	-
\underline{I}_C , А	-	$35,13 \cdot e^{j98,63}$	-
\underline{I}_2 , А	-	$0,79 \cdot e^{-j50,87}$	-
\underline{I}_A^C , А	-	-	$34,74 \cdot e^{j11,39}$
\underline{I}_B^C , А	-	-	$33,43 \cdot e^{-j108,7}$
\underline{I}_C^C , А	-	-	$34,05 \cdot e^{-j133,27}$
\underline{I}_2^C , А	-	-	$0,76 \cdot e^{-j16,23}$
\underline{I}_A^H , А	-	-	$36,28 \cdot e^{-j23,5}$
\underline{I}_B^H , А	-	-	$34,9 \cdot e^{-j143,59}$
\underline{I}_C^H , А	-	-	$35,56 \cdot e^{j98,38}$
\underline{I}_2^H , А	-	-	$0,795 \cdot e^{-j51,12}$

Таблица 2 – Результаты идентификации и оценки влияния источников искажения симметрии напряжений

Метод	Состояние потребителя и БК	
	Потребитель включен, БК отключена	Потребитель включен, БК включена
1. Метод включения/отключения потребителя, \underline{U}_2^H , В	$5,3e^{-j9,5}$	$3,84e^{-j144,64}$
2. Метод фоновой несимметрии системы, \underline{U}_2^H , В	$3,29e^{j144,8}$	$3,19e^{j179,4}$
3. Метод симметричных составляющих эквивалентных проводимостей, d_2^H , о.е.	0/0	0/0
4. Метод по направлению искаженных мощностей, d_2^H , о.е.	0	1
5. Метод наложения в сочетании с активным экспериментом, \underline{U}_2^H , В.	-	0

Выводы. Существующие методы идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений в ТОП характеризуются двумя основными недостатками. Первый из них, с математической точки зрения, формулируется как попытка решения уравнения с несколькими неизвестными. Очевидно,

что адекватное устранение данной неопределенности будет определяться точностью задания или определения дополнительных неизвестных величин. Так в методе фоновой несимметрии необходимо введение детерминированной информации о фоновой несимметрии системы в допущении ее постоянства. В

методе, основанном на принципе наложения, устранение указанной неопределенности выполняется за счет получения дополнительной информации по результатам активного эксперимента. Второй недостаток, связан с косвенным подходом определения долевого вклада в искажение симметрии напряжений. Оценка $\underline{U}_{иск}^C$ и $\underline{U}_{иск}^{\Pi}$ по косвенным параметрам может приводить к дополнительным неопределенностям и давать ложный результат. Так в методе по симметричным составляющим эквивалентных проводимостей нулевое значение одной из этих составляющих возможно при несимметричном присоединении. В методе по направлению искаженных мощностей долевого вклад определяется их знаком, который может принимать различные значения для присоединений с источниками искажений. Указанные недостатки существующих методов нашли свое подтверждение в их сравнительном анализе, который выявил не только не идентичность их решений, но также и несостоятельность идентификации абсолютно симметричной нагрузки. Как результат проведенных исследований ставится задача дальнейшего совершенствования методов идентификации и оценки влияния источников несимметрии напряжений в ТООП.

Список литературы

1. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. *Технічна електродинаміка*. 2011. №3. С. 46–52.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. Киев, 1981. 49 с. (Препринт / ИЭД АН УССР; 253).
3. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przegląd elektrotechniczny*. 2015. Vol. 91. Pp. 81–85.
4. Железко Ю. С., Кордюков Е. И., Курбацкий В. Г. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергетики. *Промышленная энергетика*. 1990. №11. С. 52–55.
5. CIGRE report 468. Review of disturbance emission assessment techniques. CIGRE/CIREC working group C4.109. 2011.
6. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu. Voltage unbalance emission assessment in radial power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012. Vol.27. Pp.1653-1661.
7. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, A. P. Agalgaonkar. Voltage unbalance emission assessment in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28. Pp. 2383-2393.
8. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, A. P. Agalgaonkar. Voltage unbalance emission assessment: sources of contribution and their ranking. *Australian Universities Power Engineering Conference AUPEC 2013*. Australia, 29 Sept.-3 Oct. 2013. Pp. 1-6.
9. Зыкин Ф. А.. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии. *Электричество*. 1992. №11. С. 13–19.
10. T. Tanaka, H. Akagi. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits, *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995. Vol. 10. Pp. 1737 – 1742.
11. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети. *Электричество*. 1996. №1. С. 32–38.
12. E.Thumborg, L.Soder. A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies. *IEEE Transaction on Power Delivey*. 1999. Vol.14. Pp 272-277.
13. Chun Li, Wilsun Xu, Tayjasant T. A critical impedance-based method for identifying harmonic sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19. Pp. 671 - 678.
14. M. Farhoodneal, Azah Mohamed, H. Shareef, R. A. Jabbar Khan. An improved method for determining contribution of utility and customer harmonic distortions in a power distribution system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2010. Vol. 2. Pp. 204-214.
15. W. Xu. An investigation on the validity of the power direction method for measurement of the electric power quality *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18. Pp. 214-219.
16. Гамазин С. И., Петрович В. А. Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии. *Промышленная энергетика*. 2003. №1. С. 32–38.
17. M. H. Shawon, S. Barcentewicz, A. Bień, Z. Hanzelka. Localization of Harmonic Sources in Power System - Simulation and Laboratory Study. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'16*. Spain, 4-6 May 2016 (ICREPQ'16). Pp. 546 – 551.
18. Сендерович Г. А.. Определение действительного вклада потребителя в создание несимметрии на сборных шинах. *Вісник Національного технічного університету „Харківський Політехнічний інститут”*. 2004. №47. С.136–139.
19. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.

References (transliterated)

1. Kuznyeczov V.G., Shpolyans'kyj O.G., Yaremchuk N.A. Uzagalnenyj pokaznyk yakosti energii v elektrychnykh merezhax i systemax [A generalized indicator of energy quality in electrical networks and systems]. *Technical electrodynamics*. 2011, no 3, pp. 46–52.
2. Shydlovskij A.K., Kuzneczov V.G., Nykolaenko V.G. Ekonomicheskaya ocenka posledstvij snizheniya kachestva elektricheskoy energii v sovremenny'kh sistemakh elektrosnabzheniya [Economic assessment of the consequences of reducing the quality of electric energy in modern power supply systems]. Kiev, 1981. 49 p.
3. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przegląd elektrotechniczny*. 2015. Vol. 91. Pp. 81–85.
4. Zhelezko Ju. S., Kordjukov E. I., Kurbackij V. G. Pravila primeneniya skidok i nadbavok k tarifam za kachestvo jelektroenergii. [Rules for applying discounts and surcharges to electricity quality tariffs]. *Promyshlennaja jenergetika*. 1990. no.11, pp. 52–55.
5. CIGRE report 468. Review of disturbance emission assessment techniques. CIGRE/CIREC working group C4.109. 2011.
6. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu. Voltage unbalance emission assessment in radial power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012. Vol.27. Pp.1653-1661.
7. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, A. P. Agalgaonkar. Voltage unbalance emission assessment in interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2013. Vol. 28. Pp. 2383-2393.
8. U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, A. P. Agalgaonkar. Voltage unbalance emission assessment: sources of contribution and their ranking. *Australian Universities Power Engineering Conference AUPEC 2013*. Australia, 29 Sept.-3 Oct. 2013. Pp. 1-6.
9. F. A. Zykin. Opredelenie stepeni uchastija nagruzok v snizhenii kachestva jelektricheskoy jenerгии [Determination of the degree of participation of loads in reducing the quality of electrical energy]. *Jelektrichestvo*. 1992, no. 11, pp. 13–19.
10. T. Tanaka, H. Akagi. A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits, *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1995. Vol. 10. Pp. 1737 – 1742.
11. S. S. Smimov, L. I. Kovernikova. Vklad potrebitelja v urovni naprjazenija vysshih garmonik v uzлах jelektricheskoy seti [The contribution of the consumer to the voltage levels of higher harmonics in the nodes of the electrical network]. *Jelektrichestvo*. 1996, no. 1, pp. 32–38.
12. E.Thumborg, L.Soder. A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies. *IEEE Transaction on Power Delivey*. 1999. Vol.14. Pp 272-277.
13. Chun Li, Wilsun Xu, Tayjasant T. A critical impedance-based method for identifying harmonic sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19. Pp. 671 - 678.
14. M. Farhoodneal, Azah Mohamed, H. Shareef, R. A. Jabbar Khan. An improved method for determining contribution of utility and

customer harmonic distortions in a power distribution system. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2010. Vol. 2. Pp. 204-214.

15. W. Xu. An investigation on the validity of the power direction method for measurement of the electric power quality *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18. Pp. 214-219.

16. Gamazin S. I., Petrovich V. A. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitelja v iskazhenii parametrov kachestva jelektricheskoy jenerгии [Determination of the actual contribution of the consumer in the distortion of the parameters of the quality of electrical energy]. *Promyshlennaja jenergetika*. 2003, no. 1. pp. 32–38.

17. M. H. Shawon, S. Barczentewicz, A. Bień, Z. Hanzelka. Localization of Harmonic Sources in Power System - Simulation and

Laboratory Study. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'16*. Spain, 4-6 May 2016 (ICREPQ'16). Pp. 546 – 551.

18. G. A. Senderovich. Opredelenie dejstvitelnogo vklada potrebitelja v sozdanie nesimmetrii na sbornyh shinah [Determination of the actual contribution of the consumer to the creation of asymmetries on busbars]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu „Kharkivskiy Politekhichnyi instytut”*. 2004, no 47, pp.136–139.

19. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.

Поступила (received) 01.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саєнко Юрій Леонідович (Саенко Юрий Леонидович, Sayenko Yuriy Leonidovych) – доктор технічних наук, професор, декан енергетичного факультету, Приазовський держаний технічний університет; м. Маріуполь. Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9729-4700>; e-mail: yls62@i.ua

Калюжний Дмитро Миколайович (Калюжный Дмитрий Николаевич, Kalyuzhnyj Dmytro Mykolajovych) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-0734>; KalyuzhnyyDN@gmail.com

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. А. ДАНИЛЬЧЕНКО, И. И. БОРЗЕНКОВ, И. Л. ЛЕБЕДИНСКИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ В ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статье рассматривается вопрос определения технических потерь электрической энергии в изоляционных конструкциях при передаче электрической энергии по высоковольтным воздушным линиям электропередачи. Уточнен расчет потерь электрической энергии за счет уточнения активной составляющей тока утечки при потерях энергии в диэлектрике, а также проводимости образовавшегося слоя загрязнения на поверхности изолятора в зависимости от степени загрязнения атмосферы и длительности воздействия погодных условий.

Ключевые слова: ток утечки, изоляция, изоляторы стеклянные, изоляторы фарфоровые, тангенс дельта.

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, І. І. БОРЗЕНКОВ, І. Л. ЛЕБЕДИНСЬКИЙ

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ ВИТОКУ В ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

У статті розглядається питання визначення технічних втрат електричної енергії в ізоляційних конструкціях при передачі електричної енергії по високовольтним повітряним лініях електропередавання. Уточнено розрахунок втрат електричної енергії за рахунок уточнення активної складової струму витоку при втратах енергії в діелектрику, а також провідності утвореного шару забруднення на поверхні ізолятора в залежності від ступеня забруднення атмосфери і тривалості впливу погодних умов.

Ключові слова: струм витоку, ізоляція, ізолятори скляні, ізолятори фарфорові, тангенс дельта.

S. U. SHEVCHENKO, D. A. DANYLCHENKO, I. I. BORZENKOV, I. L. LEBEDINSKY

DETERMINATION OF LEAKAGE CURRENTS IN THE INSULATION OF OVERHEAD ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

The compilation of electric energy balances in power systems is one of the most important components of the technical and economic indicator of the power system as a whole, since a qualitative assessment of various types of losses provides an objective answer to the system's energy efficiency in energy saving. The article deals with one of the issues of determining technical energy losses in insulating structures when transmitting electrical energy through high-voltage overhead power lines, by specifying the active and reactive component of the total leakage current across the surface of the insulator during thermal dissipation of energy in the dielectric depending on the degree of contamination of the surface of the insulating structure disc insulator. One of the methods for determining the loss of the dispersed electrical energy in the dielectric of a plate insulator depending on the degree of contamination of its surface with definition of the active and reactive component of the total leakage current by an experimental method is proposed. The method consists in determining the dielectric loss tangent and capacitance plate insulators of stationary conditions for the three states of its surface (clean dry, clean wetted with water, contaminated with a layer of dust). Two types of plate insulators PF – 70 A suspended porcelain, PSD - 70 E suspended glass were chosen as objects of research. According to the obtained experimental data, calculations were made of the active and reactive components of the total leakage current on the surface of the insulator, as well as the energy dissipated in the dielectric. A brief analysis of the results.

Keywords: leakage current, insulation, glass insulators, porcelain insulators, tan delta.

Введение. Как известно для всех объектов энергосистем составляются балансы электроэнергии. Баланс электроэнергии – количественная характеристика, которая учитывает, что количество электроэнергии, которое поступило на объект всегда должно равняться сумме электроэнергии, которая вышла с объекта и которая была израсходована внутри него. Однако, также существует небаланс системы – как следствие погрешности фиксации приборами составляющих баланса, а также наличием потерь, которые совсем не фиксируются приборами, например, это: технические потери, значение которых определяется расчетным путем, и коммерческие потери, которые объясняются как характеристиками объекта, так и воздействием на них внешних сил.

Величина технических потерь энергии при передаче электрической энергии в изоляционных конструкциях воздушных линий электропередач согласно [1], с учетом степени загрязнения атмосферы (СЗА) определяется по следующей формуле:

$$\Delta W_{\text{isol}}^{(P)} = \frac{U_{\text{nom}}^2}{3 \cdot R_{\text{isol}} \cdot N_{\text{insul}}} \cdot T_{\text{hum}} \cdot N_{\text{gir}}, \quad (1)$$

где U_{nom} – номинальное напряжение ВЛ, кВ; N_{isol} – количество изоляторов в фазе ВЛ; N_{gir} – количество гирлянд изоляторов, которую принимают при проектировании ВЛ; T_{hum} – продолжительность в расчетном периоде влажной погоды (туман, роса, дождь, мокрый снег, изморозь), ч; R_{isol} – электрическое сопротивление одного изолятора, кОм, которое определяется согласно [2] по формуле:

$$R_{\text{isol}} = 1345 - 215 \cdot (N_p - 1), \quad (2)$$

где N_p – номер уровня степени загрязнения атмосферы, которое определяется согласно [3].

Цель работы. Как видно из формулы (1) в ней не учитываются такие параметры, как: сопротивление току утечки или величина проводимости слоя загрязнения на поверхности юбки изолятора в зависимости от значения его толщины [4], и времени воздействия погодных условий. Не учтены указанные

параметров вносит существенную погрешность в определение величины тока утечки, а приведенное сопротивление R_{isol} формула (2), значение которого изменится линейно в зависимости от СЗА, не дает полной информации для определения технических потерь энергии (1) в изоляционных конструкциях ВЛ при передаче электрической энергии. В работе предпринята попытка учесть выше перечисленные параметры косвенными методами.

Влияние погодных условий уменьшают электрическую прочность изоляторов [4] и в некоторых случаях при интенсивном загрязнении поверхности изоляторов приводит к их перекрытию. Увлажнение поверхности изоляционной конструкции приводит к увеличению удельной проводимости слоя загрязнения по поверхности изолятора и как следствие увеличению токов утечки, что в свою очередь приводит к увеличению потерь энергии.

Определение величины тока утечки и проводимости слоя загрязнения изоляционной конструкции может быть выполнено при помощи измерения таких параметров изоляции как: тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в конструкции изолятора и ёмкости изолятора C_{insul} в зависимости от СЗА и рода воздействия погодных условий (туман, роса, дождь, мокрый снег, изморозь). В проведенных исследованиях в лабораторных условиях были изучены три состояния поверхности тарелки изолятора: сухая чистая; сухая с слоем пыли; чистая смоченная водой. Такой подход к проведению экспериментальных исследований позволяет смоделировать сразу несколько вариантов поверхностной проводимости изоляционной детали изоляторов, что соответствует разным степеням загрязнения окружающей среды.

Определение емкости изолятора и тангенса угла диэлектрических потерь.

Активная составляющая тока утечки по поверхности изолятора в разных источниках [4 - 10] определяется выражением:

$$I_u = \frac{U}{R_u}, \quad (3)$$

где R_u – сопротивление току утечки по поверхности изолятора если слой загрязнения имеет толщину Δ с удельным объемным сопротивлением ρ .

Сопротивление току утечки можно определить по следующей формуле:

$$R_u = \frac{\rho \cdot L_u}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (4)$$

где L_u – длина пути утечки.

Следовательно, из формул (3) и (4) ток утечки будет определяться как:

$$I_u = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_u}, \quad (5)$$

Исходя из выражения (5), не имея значений таких параметров как толщина слоя загрязнения Δ и его удельного объемного сопротивления ρ , невозможно рассчитать величину тока утечки. Кроме того, формула (5) приведена для расчета цилиндрического гладкого изолятора, что делает ее применение на практике для

расчетов реальных конструкций практически невозможным.

Если рассмотреть классическую электрическую схему замещения [5] гирлянды изоляторов (рис. 1), то выяснится, что определить из нее значения емкости изолятора не представляется возможным. В разных источниках приводят средневзвешенные значения емкостей: емкость по отношению к опоре ВЛ $C_1 = 4 - 5$ пФ; емкость по отношению к проводу ВЛ $C_2 = 0,5 - 0,1$ пФ; и емкость изолятора $C = 50 - 70$ пФ которые влияют на распределение напряжения по гирлянде изоляторов. Из приведенных значений очень сложно определить полную емкость каждого отдельного изолятора в гирлянде. Как правило в расчетах полей используют проходную емкость изолятора в качестве его полной емкости.

Следует обратить внимание на то, что величина емкости C будет изменяться в зависимости от отсутствия или наличия слоя загрязнения. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость слоя загрязнения будет зависеть от его состояния и состава. Поэтому определение емкости загрязненного изолятора позволит учесть наличие на его поверхности определенного вида загрязнения.

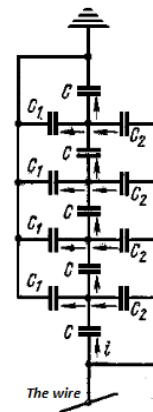


Рис. 1 Схема замещения гирлянды изоляторов.

Все выше изложенное определяет необходимость уточнения токов утечки. В работе нами предлагается определить токи утечки проведя измерения двух параметров изолятора таких как: емкость C_x и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ экспериментальным путем. На основании полученных результатов экспериментов появляется возможность определения активной составляющей тока утечки расчетным путем.

Для экспериментального определения емкости C_x изолятора и тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в работе было проведено 3 серии экспериментов, по 100 опытов в каждой серии, с использованием измерительного прибора «Вектор 2М», который работает на основании принципа моста Шеринга (рис. 2) и предназначен, для измерения параметров изоляции, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в высоковольтной изоляции при различных значениях испытательных напряжений.

Процесс измерения заключается в уравнивании (балансировке) мостовой схемы

поочередной регулировкой сопротивления резистора и емкости магазинов конденсаторов.

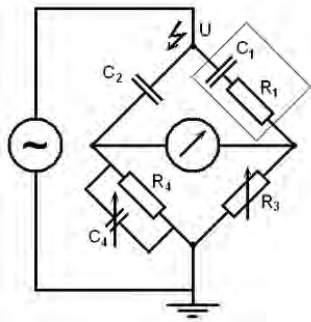


Рис. 2 Схема моста Шеринга

где C_1 – исследуемый конденсатор, R_1 – последовательное сопротивление в эквивалентной схеме исследуемого конденсатора, C_2 – эталонный конденсатор, R_3 – безиндукционный резистор, C_4 – переменный конденсатор, R_4 – переменный безиндукционный резистор, включённый параллельно с C_4 .

В качестве объектов исследования были выбраны два типа изоляторов:

- «ПФ-70А» Рис. 3, подвесной фарфоровый изолятор с длиной пути утечки $l_{yt} = 303$ мм и минимальной разрушающей нагрузкой 70 кН;

- «ПСД-70Е» Рис. 4, подвесной стеклянный двукрылый изолятор (для районов с загрязненной атмосферой) усиленной изоляционной характеристикой и длиной пути утечки $l_{yt} = 411$ мм с минимальной разрушающей нагрузкой 70 кН.

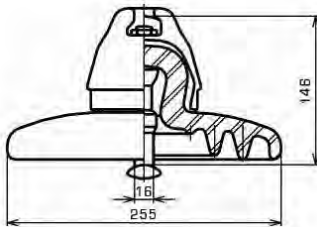


Рис. 3 Изолятор типа ПФ-70А

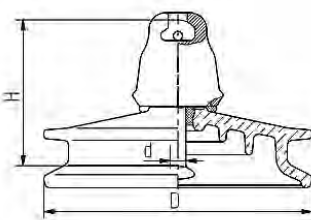


Рис. 4 Изолятор типа ПСД-70Е

Измерения исследуемых параметров проводились для трех состояний поверхности тарелки изоляторов (чистой сухой, загрязненной слоем пыли, чистой смоченной водой) с использованием «Нормальной» схемы измерения которая представлена на рис. 5.

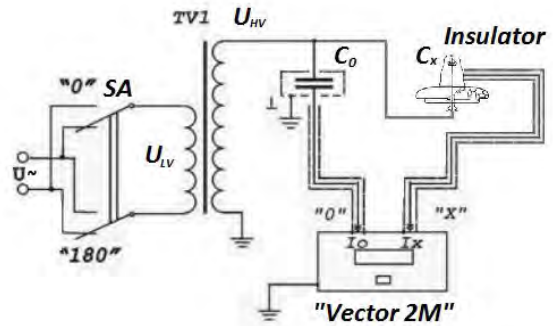


Рис. 5 «Прямая» схема измерения

При измерениях применяют две схемы включения моста: так называемую «Нормальную», или «Прямую», в которой измерительный элемент включен между одним из электродов испытуемой изоляционной конструкции и землей, и «Перевернутую», где он включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокого напряжения моста. «Нормальную» схему применяют, когда оба электрода изолированы от земли, «Перевернутую» – когда один из электродов наглухо соединен с землей.

Испытательное напряжение U_{HV} подаваемое на объект «Пестик» изолятора по «Прямой» схеме измерения составляло 10 кВ. Полученные средние значения результатов измерений емкости изолятора C_x и тангенса диэлектрических потерь $tg\delta$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Средние значения емкости изолятора C_x и $tg\delta$

Тип	Состояние поверхности изолятора					
	Сухой чистый		Сухой грязный		Чистый смоченный водой	
	C_x , pF	$tg\delta$, %	C_x , pF	$tg\delta$, %	C_x , pF	$tg\delta$, %
ПФ-70А	87.82	9.12	82.86	21	120.3	20.9
ПСД-70Е	67.76	2.039	65.72	2.067	77.31	3.49

Как видно с таблицы 1 при разных состояниях загрязнения поверхности тарелки изоляторов значения емкости C_x имеют разные величины и даже превышают значения приведенные в [5]. Следовательно, если учесть изменяющийся параметр $tg\delta$ активная составляющая тока утечки I_a по поверхности изолятора тоже будет иметь разные значения.

Расчет активной составляющей тока утечки по поверхности изолятора

При переменном напряжении в изоляции протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол ϕ (рис. 6), меньший 90 град. эл. на небольшой угол δ , обусловленный наличием активного сопротивления.

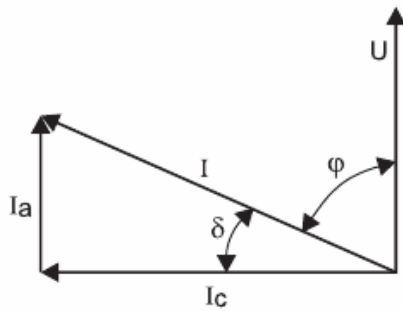


Рис. 6. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями: U — напряжение на диэлектрике; I — полный ток через диэлектрик; I_a , I_c — соответственно активная и емкостная составляющие полного тока; φ — угол фазного сдвига между приложенным напряжением и полным током; δ — угол между полным током и его емкостной составляющей

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. При постоянном напряжении потери энергии определяются только силой сквозного тока, обусловленного объемной и поверхностной проводимостями. При переменном напряжении к этим потерям добавляются потери, обусловленные различного вида поляризациями, а также наличием полупроводниковых примесей, окислов железа, углерода, газовых включений и т. п.

Рассматривая простейший диэлектрик, можно записать выражение рассеиваемой в нем под воздействием переменного напряжения мощности:

$$P_a = U \cdot I_a, \tag{6}$$

где U - приложенное к диэлектрику напряжение, I_a - активная составляющая тока, протекающего через диэлектрик.

Схему замещения диэлектрика обычно представляют в виде последовательно соединенных конденсатора и активного сопротивления. Из векторной диаграммы (см. рис. 6):

$$I_a = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \tag{7}$$

где δ - угол между вектором полного тока I и его емкостной составляющей I_c .

Следовательно после подстановки (7) в (6) потери энергии в диэлектрике будут равны:

$$P_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \tag{8}$$

Емкостную составляющую I_c полного тока можно определить из следующего выражения:

$$I_c = U \cdot \omega \cdot C_x, \tag{9}$$

где C_x - емкость конденсатора (данного диэлектрика) при угловой частоте ω .

В результате рассеиваемая в диэлектрике мощность будет равна:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg} \delta \tag{10}$$

Из (10) видно, что потери энергии, рассеиваемые в диэлектрике, пропорциональны тангенсу угла δ ,

частоте приложенного напряжения и емкости конденсатора.

Подставив полученные экспериментальные значения таблицы 1 в выражения (7) (9) (10) получим искомые значения активной I_a и реактивной I_c составляющей полного тока, а также рассеиваемую мощность в диэлектрике P_a , которые сведены в таблице 2 для изолятора типа ПФ-70А и в таблице 3 для изолятора типа ПСД-70Е.

Таблица 2 - Расчетные значения искомых величин изолятора типа ПФ-70А

Состояние поверхности изолятора	Параметры					
	U, кВ	f, Гц	X _c , Ом	I _c , А	I _a , А	P _a , Вт
Сухой чистый	10	50	3.63 · 10 ⁷	0.3 · 10 ⁻³	2.5 · 10 ⁻⁵	0.25
Грязный сухой	10	50	3.85 · 10 ⁷	0.3 · 10 ⁻³	5.8 · 10 ⁻⁵	0.58
Чистый смоченный водой	10	50	3.85 · 10 ⁷	0.4 · 10 ⁻³	7.9 · 10 ⁻⁵	0.79

Таблица 3 - Расчетные значения искомых величин изолятора типа ПСД-70Е

Состояние поверхности изолятора	Параметры					
	U, кВ	f, Гц	X _c , Ом	I _c , А	I _a , А	P _a , Вт
Сухой чистый	10	50	4.7 · 10 ⁷	0.2 · 10 ⁻³	4.3 · 10 ⁻⁶	0.043
Грязный сухой	10	50	4.8 · 10 ⁷	0.2 · 10 ⁻³	4.3 · 10 ⁻⁶	0.043
Чистый смоченный водой	10	50	4.1 · 10 ⁷	0.2 · 10 ⁻³	8.5 · 10 ⁻⁶	0.085

Как как можно заметить с таблиц 1, 2 и 3 при разных состояниях поверхности тарелки изоляторов изменяется емкость C_x изолятора при этом изменяется угол диэлектрических потерь и как следствие появление активной составляющей тока I_a этих потерь. Сравнивая значения в таблице 1 можно заметить, что стеклянный изолятор менее изменяет свою емкостную характеристику чем фарфоровый изолятор при тех же экспериментальных условиях, это можно объяснить тем, что фарфор имеет пористую структуру и наличие микротрещин в глазури на поверхности тарелки изолятора приводит к увеличению емкости при интенсивных увлажнениях его поверхности за счет впитывания влаги в тело диэлектрика изолятора.

Вывод. В ходе проведения работы видим, что при эксплуатации гирлянд изоляторов, изготовленных из фарфора и стекла при различных уровнях зон загрязнения атмосферы и погодных условий, токи утечки по поверхности изоляторов, могут изменять свои значения. Так же видно, что емкость и тангенс угла диэлектрических потерь изолятора так же изменяют свои значения в зависимости от вида загрязнения тарелки изолятора.

Так же необходимо заметить, что прикладываемое напряжение к одному изолятору при проведении исследования в лабораторных условиях было величиной 10 кВ, однако в реальных условиях эксплуатации распределение напряжения по гирлянде изоляторов (рис. 1) в зависимости от класса

напряжения воздушной линии электропередач имеет иные значения напряжения.

Как видим данный вопрос по уточнению токов утечки по изоляционным конструкциям линий электропередач нуждаются в дополнительных исследованиях. Так как не известно поведение значений токов утечки в реальных эксплуатационных условиях при длительных погодных воздействиях на загрязненные участки поверхности тарелки изоляторов.

Список литературы

- 1 СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82: 2013 Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання.
- 2 Железко Ю. С. Расчет анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. // М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. - 280 с
- 3 СОУ-Н МЕВ 40.1-00013741-92:2014 Ізоляція електроустановок напругою від 6 кВ до 750 кВ. Інструкція з вибору та експлуатації.
- 4 Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пингаль; Под общ. ред. В.П. Ларионова.-3-е изд., перераб. и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1986-464 с.
- 5 Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических вузов. Под общей ред. Д.В. Разевиго. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1976.
- 6 Техника высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
- 7 M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- 8 Fontana E. et al. Novel sensor system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines //IEEE transactions on power delivery. – 2006. – Т. 21. – №. 4. – С. 2064-2070.
- 9 Bychkov P. N. Insulation contamination of overhead transmission lines by extreme service conditions / Bychkov P. N., Zabrodina I. K., Shlapak V. S. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Т. 23. – №. 1. – С. 288-293.
- 10 Shevchenko S. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires. / Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Minakova K. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) - 17 - 21 pp.

References

- 1 SOU-N EE 40.1-37471933-82: 2013 Metodichni rekomendatsiyi vyznachennya tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoyi enerhiyi v transformatorakh i liniyakh elektroperedavannya.
- 2 Zhelezko Yu. S. Raschet analiz i normirovaniye poter' elektroenergiyi v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov / Zhelezko Yu. S., Artemyev A. V., Savchenko O. V. // M.: Publishing house NTS ENAS, 2004. - 280 s
- 3 SOU-N MEV 40.1-00013741-92:2014 Izolyatsiya elektroustanovok napruhoju vid 6 kV do 750 kV. Instruktziya z vyboru ta ekspluatatsiyi.
- 4 Tekhnika vysokikh napryazheniy: Izolyatsiia i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh: Uchebnik dlya vuzov / V.V. Bazutkin, V.P. Larionov, Yu. S. Pinal; Under total ed. V.P. Larionov.-3rd ed., Pererab. and additional-M.: Energoatomizdat, 1986-464 s.
- 5 Tekhnika vysokikh napryazheniy. Uchebnik dlya studentov elektrotekhnicheskikh i elektroenergeticheskikh vuzov. Under the general ed. D.V. Razevigi. Ed. 2nd, Pererab. and add. M., "Energy", 1976.
- 6 Tekhnika vysokikh napryazheniy: kurs lektsiy / V. F. Vazhov, V. A. Lavrinovich. - Tomsk: TPU publishing house, 2008. - 150 p.
- 7 M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- 8 Fontana E. et al. Novel sensor system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines //IEEE transactions on power delivery. – 2006. – Т. 21. – №. 4. – С. 2064-2070.
- 9 Bychkov P. N. Insulation contamination of overhead transmission lines by extreme service conditions / Bychkov P. N., Zabrodina I. K., Shlapak V. S. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Т. 23. – №. 1. – С. 288-293.
- 10 Shevchenko S. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires. / Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Minakova K. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) - 17 - 21 pp.

Надійшла (received) 03.07.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Сергей Юриевич (Шевченко Сергій Юрійович, Shevchenko Sergey) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9658-7787>, E-mail: syurik42@gmail.com

Данильченко Дмитрий Алексеевич (Данильченко Дмитро Олександрович, Danylchenko Dmytro) - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>, E-mail: Danylchenko.e@khpri.edu.ua

Борзенков Игорь Игоревич (Борзенков Ігор Ігорович, Borzenkov Igor) – аспирант кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, E-mail: i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua

Лебединский Игорь Леонидович (Лебединський Ігор Леонідович, Lebedinsky Igor) - кандидат технических наук, Заведующий кафедры электроэнергетики, Сумской государственной университет, Сумы, Украина, E-mail: i.lebedinskiy@etech.sumdu.edu.ua

УДК 621.311

О. М. ДОВГАЛЮК, Ш. Н. САЙДОВ, І. С. ЯКОВЕНКО**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ РОБОТІ ТРЕЙДЕРІВ НА ЕНЕРГОРИНКУ УКРАЇНИ**

Виконаний аналіз основних систем накопичення електричної енергії, які можуть використовуватися трейдерами для підвищення ефективності роботи на ринку електричної енергії в Україні. Розглянуто основні технічні характеристики та особливості функціонування різних видів систем накопичення енергії в умовах ринку електричної енергії України. Розроблено критерій економічної ефективності використання систем накопичення енергії для роботи трейдерів, який враховує поточну ситуацію на ринку електричної енергії, технічні характеристики систем накопичення та особливості функціонування конкретного трейдера. З використанням запропонованого критерію визначено найбільш ефективні системи накопичення енергії для роботи трейдерів в умовах нового лібералізованого ринку електричної енергії в Україні.

Ключові слова: акумулювання, система накопичення, електрична енергія, стиснене повітря, розплавлена сіль, супермаховик, трейдери, енергетичний ринок, ефективність, прибуток, амортизація.

О. Н. ДОВГАЛЮК, Ш. Н. САЙДОВ, И. С. ЯКОВЕНКО**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ТРЕЙДЕРОВ НА ЭНЕРГОРЫНКЕ УКРАИНЫ**

Выполнен анализ основных систем накопления электрической энергии, которые могут использоваться трейдерами для повышения эффективности работы на рынке электрической энергии в Украине. Рассмотрены основные технические характеристики и особенности функционирования различных видов систем накопления энергии в условиях рынка электрической энергии Украины. Разработан критерий экономической эффективности использования систем накопления энергии для работы трейдеров, учитывающий текущую ситуацию на рынке электрической энергии, технические характеристики систем накопления и особенности функционирования конкретного трейдера. С использованием предложенного критерия определены наиболее эффективные системы накопления энергии для работы трейдеров в условиях нового либерализованного рынка электрической энергии в Украине.

Ключевые слова: аккумулярование, система накопления, электрическая энергия, сжатый воздух, расплавленная соль, супермаховик, трейдери, энергетический рынок, эффективность, прибыль, амортизация.

О. М. DOVGALYUK, SH. N. SAIDOV, I. S. YAKOVENKO**PECULIARITIES INVESTIGATION OF THE USING ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS AT THE TRADERS WORK ON THE ENERGY MARKET OF UKRAINE**

The analysis of the energy storage systems role in the electric power systems operation in modern conditions of energy storage technologies development and the introduction of the electricity market in Ukraine performed. The energy storage systems classification by energy storage type, which is based on the World Energy Council general approach, has been reviewed. The analysis of the main technical characteristics and functioning features of energy storage systems various types that can be used by traders to improve the work efficiency in the conditions of the Ukraine electric energy market has been performed. The traders work features in the conditions of reforming the Ukraine electric energy market identified. Based on these features, the possibility of increasing the traders' work efficiency when using energy storage systems is revealed. The economic efficiency criterion in the energy storage systems using for the traders work, which takes into account the current situation on the electric energy market, the energy storage systems technical characteristics and the particular trader operating characteristics, has been developed. The using traders possibility comparison of various energy storage systems when working on the Ukraine electric energy market has been carried out. The most effective energy storage systems for the traders work in the new liberalized Ukraine electric energy market are determined using the proposed technical and economic criterion.

Keywords: accumulation, energy storage systems, electric energy, compressed air, molten salt, super flywheel, traders, energy market, efficiency, profit, depreciation.

Вступ. Останніми роками у світі приділяється значна увага розвитку технологій та практичному застосуванню накопичення енергії. Впровадження нового конкурентного ринку електричної енергії в Україні характеризується збільшенням учасників, створенням нових сегментів ринку, появою нових послуг, зміною структури генерації, впровадженням нових механізмів формування тарифів на електроенергію. В таких умовах змінюється роль накопичувачів електричної енергії, які раніше використовувалися тільки в якості акумуляторних батарей і джерел безперебійного живлення навантажень невеликої потужності, а в нинішніх умовах стають важливим елементом

електроенергетичної системи, здатним суттєво впливати на режими її роботи.

Причинами такої уваги до систем накопичення енергії (СНЕ) стали:

- збільшення потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які через нестабільність видачі потужності протягом доби і сезону потребують застосування СНЕ;
- підвищення вимог з боку споживачів до безперебійності електропостачання;
- актуальність покриття пікових навантажень в електроенергетичній системі;
- регулювання частоти і напруги в електричній мережі;

© О. М. Довгалюк, Ш. Н. Сайдов, І. С. Яковенко, 2019

- поява на ринку електроенергії трейдерів, які здійснюватимуть купівлю електричної енергії виключно з метою її перепродажу на ринку, що більш ефективним буде за умови використання СНЕ.

Крім того використання СНЕ як виробниками електроенергії, так і іншими учасниками ринку електричної енергії буде забезпечувати їх власникам можливість відігравати активну роль на балансуєчому сегменті енергоринку.

Таким чином, дослідження особливостей використання СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України та їх впливу на роботу електроенергетичних систем є актуальною і досить важливою задачею для електроенергетики України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання використання СНЕ для систем розподіленої генерації розглядалися вченими для вирішення різних завдань. Так, в роботах [1-4] пропонуються варіанти застосування нових систем акумулювання, розглянуті різні варіанти структурного виконання таких систем, коли система акумулювання знаходиться поруч зі споживачем, віддалено від споживача або безпосередньо в вузлі генерації енергосистеми.

В роботі [5] був проведений аналіз основних систем акумулювання електроенергії. Авторами цієї роботи був зроблений висновок, що система акумулювання, що використовує маховик, дозволяє додатково вирішити актуальну задачу підвищення якості електричної енергії. Запропоновано використовувати такий вид акумуляції для підвищення ефективності роботи електричної мережі з деякими видами ВДЕ.

В роботі [6] авторами було запропоновано використовувати систему стисненого повітря для подальшого перетворення енергії повітря в електричну енергію. Використання такої установки в залежності від її потужності можливе як для систем електропостачання окремих підприємств або невеликих селищ, так і для об'єднаної енергосистеми країни в цілому.

В Україні питання застосування СНЕ розглядається давно, як і в усьому світі [7-10]. Увага приділяється удосконаленню технології зберігання енергії, застосуванню СНЕ в різних електричних мережах і системах та ін.

У той же час зараз в умовах реформування ринку електричної енергії, в зв'язку з чим з'являються нові аспекти використання СНЕ, дане питання набуває особливої актуальності.

Мета статті. Метою даної статті є виконання порівняння можливості використання різних СНЕ для підвищення ефективності роботи трейдерів на ринку електричної енергії України.

Основні матеріали дослідження. СНЕ відіграють важливу роль в роботі будь-якої енергосистеми. Їх основна функція зводиться до того, що вони накопичують електроенергію в період зниження попиту, у базовому періоді сумарного графіка навантаження, і потім видають електроенергію

під час максимального споживання, в пікові періоди сумарного графіка навантаження.

На сьогоднішній день до основних завдань застосування СНЕ в електроенергетичній системі можна віднести такі:

- покриття пікових навантажень;
- регулювання частоти і напруги;
- заміщення обортового резерву;
- зменшення завантаженості ліній електропередачі;
- підвищення надійності і якісних показників електропостачання;
- забезпечення інтеграції ВДЕ в систему.

Існують різні способи накопичення енергії: механічний, термічний, хімічний, електрохімічний, електричний. Класифікація основних видів СНЕ, заснованих на даних способах накопичення, представлена на рис. 1. За основу покладено принцип класифікації, представлений у [11].



Рис. 1 – Класифікація СНЕ

Для роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії особливий інтерес викликають ті СНЕ, які здатні на значний термін накопичити велику кількість енергії для подальшої оптової торгівлі. Серед розглянутих СНЕ у світі для зберігання великої кількості енергії найбільше розповсюдження знайшли механічні великої потужності (гідроакумуючі електростанції (ГАЕС), пневматичні) та електрохімічні (літій-іонні, свинцево-кислотні акумуляторні батареї тощо).

ГАЕС, які використовуються практично у всіх країнах світу, дозволяють накопичувати енергію у вигляді водосховища, яке заповнюється водою під час провалів споживання. У той час, коли в енергосистемі необхідна потужність, воду подають на лопаті турбіни, яка починає обертати генератор. Даний спосіб накопичення має переваги по відношенню до інших: можливість швидкого набору високої потужності; широкий діапазон регулювання потужності; високі ресурсні характеристики. Серед недоліків такої СНЕ слід зазначити значну вартість, велику територію, яку займає станція, а також необхідність затоплення прилеглих територій при будівництві.

СНЕ з використанням пневматичної установки стисненого повітря активно розробляється, впроваджується і успішно експлуатується в даний час у багатьох країнах світу [1, 3, 4]. Технологія

використання стисненого повітря для СНЕ передбачає використання резервуара для підвищення тиску під водою. При цьому відбувається закачування повітря за допомогою компресорів в резервуар в період надлишку електроенергії в системі. Повітря при підвищенні тиску в резервуарі нагрівається і підігріває воду, яку необхідно накопичити для подальшого використання для зворотного декомпресії, в результаті якої температура повітря знижується. При цьому тепла вода, яка була накопичена під час закачування повітря, впорскується в поршневу систему, яка буде працювати в зворотному напрямку щодо закачування повітря, що призводить до обертання турбіни для вироблення електроенергії.

Така СНЕ може розміщуватися на узбережжі або в глибині материка, де в якості резервуара можуть використовуватися підземні порожнини природного походження. СНЕ такого виду експлуатується в Нью-Гемпширі (США), потужність установки становить 1,5 МВт. Найбільша в Європі промислова СНЕ, яка використовує стиснене повітря для накопичення, побудована в німецькому селі Фельдхайм, її потужність становить 10 МВт, а ємність акумуляторів 10,8 МВт·год.

До переваг такої СНЕ відноситься гарне співвідношення вартості і технічних характеристик. Недоліками системи є можливість використання її тільки для установок великої потужності, а також необхідність наявності певних умов місцевості для використання установки.

У світі активно розвиваються СНЕ з використанням розплавленої солі, які здійснюють накопичення за принципом парогенератора [2, 12]. Розплавлена сіль утримує тепло протягом тривалого часу, тому її розміщують на сонячних теплових установках, де сотні геліостатів (великих сконцентрованих на сонці дзеркал) збирають тепло сонячного світла і нагрівають рідину всередині - у вигляді розплавленої солі. Потім вона направляється в резервуар, де далі за допомогою парогенератора приводить в обертання турбіну, в результаті чого виробляється електроенергія.

Найпотужнішою в світі СНЕ з використанням розплавленої солі є Ivanpah Solar Electric Generating System (США), потужність даної установки становить 392 МВт [13].

Перевагами цієї СНЕ є висока енергоемність і ефективність роботи парової турбіни. До недоліків її відноситься незначна тривалість зберігання.

Механічні СНЕ з використанням маховика засновані на запасанні кінетичної енергії з подальшим перетворенням її в електричну. Принцип роботи такої СНЕ схожий на принцип роботи синхронного компенсатора на шинах підстанції [14]. Відмінність полягає в тому, що маховикова СНЕ генерує як активну, так і реактивну енергію, в залежності від cosφ, а синхронний компенсатор тільки реактивну потужність. Система «двигун-генератор», працюючи в режимі двигуна, обертає маховик і збільшує його кінетичну енергію. При нестачі потужності в мережі

відбувається перемикання клем системою управління і система «двигун-генератор» переходить в режим генератора, перетворюючи накопичену в маховику кінетичну енергію в електричну.

Серед переваг такої СНЕ слід зазначити здатність швидко накопичувати енергію за короткий час і за потреби в потужності швидко генерувати її в мережу. Недоліком системи є обмежений час генерації, оскільки енергія, що накопичується в маховику, зменшується, а також неможливість зберігання накопиченої енергії тривалий час.

Супермаховик завдяки особливостям конструкції має більшу питому міцність і, як наслідок, значно більшу енергоемність у порівнянні з класичним маховиком, а також є більш безпечним в експлуатації (при виникненні розриву супермаховика не утворюється великих осколків). Ці відмінності дозволяють використовувати супермаховики у більш потужних системах [5].

СНЕ на основі акумуляторних батарей широко використовуються в енергосистемах світу як найпростіший спосіб накопичення. При невеликій потужності одиничної установки для СНЕ великої потужності можна використовувати з'єднання декількох акумуляторних батарей [15, 16]. Перевагою таких СНЕ є можливість миттєвого включення, висока питома енергоемність. Серед недоліків слід відзначити використання токсичних речовин, сильну залежність ефективної ємності від температури, а також високу вартість вироблення енергії для покриття дисбалансу системи живлення [17].

Основні технічні характеристики накопичувачів електроенергії, які використовуються в світі для оптової торгівлі електроенергією та покриття пікових навантажень і можуть бути застосовані при роботі трейдерів в Україні, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики накопичувачів електричної енергії

Характеристика СНЕ	Щільність енергії, кВт / м ³	Енергоемність, МВт·год	Номинальна потужність, МВт	ККД η, в.о.	Питома вартість, дол./кВт
ГАЕС	0,5-1,5	1680-14000	100-14000	0,8-0,82	1500-4300
Стиснене повітря	3-6	1080-2700	135-300	0,5-0,8	950-1200
Розплавлена сіль	500-3000	≤ 300	≤ 50	0,75-0,8	3100-3300
Супермаховик	20-80	≤ 5	20-40	0,85-0,87	1900-2500
Свинцево-кислотні акумуляторні батареї	50-80	200-400	20-100	0,85-0,9	1700-4900
Літій-іонні акумуляторні батареї	200-500	7-40	1-10	0,75-0,92	1200-10000
Нікель-кадмієві акумуляторні батареї	60-150	10-50	1-40	0,65-0,72	2000-6500

Слід зазначити, що на сьогоднішній день з розглянутих систем накопичення в Україні практично реалізовані лише ГАЕС, інші для умов зберігання великої кількості не використовуються, проте мають для цього гарні показники.

Існуюча на сьогоднішній день Європейська федерація енергетичних трейдерів (ЄФЕТ) включає більше 100 компаній, що здійснюють торговельну діяльність на ринку електричної енергії і газу, з 27 європейських країн [18]. Від України як асоційовані члени ЄФЕТ входять компанії ДТЕК і «Нафтогаз України». ЄФЕТ наголошує на важливості застосування СНЕ для забезпечення можливості трейдерам конкурувати на ринку електричної енергії на рівних умовах з іншими учасниками, а також важливість використання накопичувачів енергії для забезпечення балансування і режимів електроенергетичних систем. Важливою світовою тенденцією стає збільшення потужності СНЕ, використовуваних трейдерами.

В Україні механізм функціонування трейдерів на ринку електричної енергії визначений законом України про ринок електричної енергії [19]. Трейдери виступають учасниками ринку, які здійснюють купівлю електричної енергії виключно з метою її перепродажу. Особливістю є необхідність продажу електричної енергії трейдерами лише іншим учасникам ринку, крім споживачів електричної енергії. Це обумовлює специфіку функціонування трейдерів на ринку електричної енергії.

Купівля і продаж електричної енергії на ринку на добу наперед (РДН) і внутрішньодобовому ринку (ВДР) України здійснюється у ході організованих електронних торгів, які проводяться за допомогою програмного забезпечення оператора ринку (ОР) [20]. Відповідно до порядку організації та проведення торгів на РДН, який установлений правилами РДН та ВДР, в ході торгів ОР на основі балансу сукупного попиту на електричну енергію та її сукупної пропозиції визначає для кожного операційного періоду і доби постачання:

- ціну купівлі і продажу електричної енергії на РДН за принципом граничного ціноутворення з виділенням окремих зон z ;

- обсяги купленої та проданої на торгах електричної енергії [20].

За результатами проведених торгів кожної доби ОР надає оператору системи передачі (ОСП) інформацію щодо договірних обсягів купівлі і продажу електричної енергії, ціни і оприлюднює результати торгів на своєму веб-сайті. Після цього ОР та всі учасники РДН проводять відповідні грошові розрахунки згідно встановлених правил.

Обсяг електричної енергії, яку трейдер купує як учасник ринку, відноситься до зони з нижчим тарифом, на відміну від обсягу електричної енергії, яку трейдер продає на ринку (рис. 2).

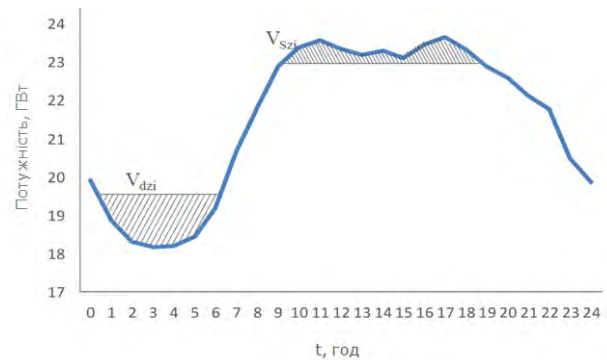


Рис. 2 – Зони економічно доцільної купівлі і продажу електричної енергії трейдерами на ринку електричної енергії

Для більшої ефективності роботи в таких умовах на ринку електричної енергії трейдерам доцільно використовувати СНЕ, які будуть характеризуватись найкращими умовами щодо зберігання великої кількості енергії, враховувати всі особливості поточної ситуації на ринку та специфіку кожного трейдера.

Завдяки розвитку різноманітних технологій накопичення та зберігання електроенергії виробники надають широкий вибір систем накопичення за типом, ємністю, тривалістю розряду тощо. В таких умовах важливою стає оцінка економічної доцільності застосування відомих технологій та СНЕ для вирішення в енергосистемі конкретних завдань.

Аналіз ефективності застосування СНЕ є складним багатокритеріальним завданням, яке повинно вирішуватися з урахуванням поточної ситуації на ринку електроенергії.

Для цього був розроблений критерій економічної доцільності застосування СНЕ, в якості якого виступає прибуток власника СНЕ. Значення критерію визначається з урахуванням поточної ситуації на ринку електроенергії відповідно до основної функції СНЕ. Так, у разі використання СНЕ трейдерами основною функцією системи накопичення буде тривале зберігання великої кількості енергії. В цьому випадку сумарний прибуток визначаємо за виразом:

$$P_{\Sigma}(x) = \sum_{i=1}^n D_{Szi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{dzi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{aszi}(x), \quad (1)$$

де $P_{\Sigma}(x)$ – сумарний прибуток трейдера за період часу $[0, n]$ при використанні СНЕ виду x ;

$\sum_{i=1}^n D_{Szi}(x)$ – вартість проданої трейдером електричної енергії на ринку за період часу $[0, n]$ при використанні СНЕ виду x ;

$\sum_{i=1}^n D_{dzi}(x)$ – вартість купленої трейдером електричної енергії на ринку за період часу $[0, n]$ при використанні СНЕ виду x ;

$$\sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) - \text{вартість зберігання електричної енергії}$$

при використанні СНЕ виду x за період часу [0, n];

$$\sum_{i=1}^n D_{aszi}(x) - \text{вартість амортизації та}$$

обслуговування СНЕ виду x за період часу [0, n].

Сумарна за період часу [0, n] вартість проданої електричної енергії на ринку враховує поточний стан ситуації на ринку і відповідно до [20] визначається наступним чином

$$\sum_{i=1}^n D_{Szi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{Szi} \cdot P_{zi}), \quad (2)$$

де V_{Szi} – обсяг продажу електричної енергії трейдером у зоні z та операційному періоді i, який визначений на торгах РДН;

P_{zi} – ціна купівлі-продажу електричної енергії у зоні z та операційному періоді i, яка визначена на торгах РДН;

z – індекс зони;

m – кількість зон.

Сумарна за період часу [0, n] вартість купленої електричної енергії відповідно до [20] визначається за формулою

$$\sum_{i=1}^n D_{dzi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{dzi} \cdot P_{zi}), \quad (3)$$

де V_{dzi} – обсяг купівлі електричної енергії учасником ринку у зоні z та операційному періоді i, який визначений на торгах ринку на добу наперед.

Вартість зберігання електричної енергії залежить від СНЕ, яка використовується трейдером, і за період часу [0, n] визначається за виразом:

$$\sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{Szi} \cdot P_{zi} \cdot (1 - \eta)), \quad (4)$$

де η – ККД СНЕ, в.о.

Вартість амортизації та обслуговування СНЕ за період часу [0, n] визначається за формулою:

$$\sum_{i=1}^n D_{aszi}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{I_{SSE} \cdot \alpha_{as} \cdot t_i}{8760}, \quad (5)$$

де I_{SSE} – капітальні вкладення в СНЕ;

α_{as} – норми відрахувань на амортизацію та обслуговування СНЕ;

t_i – тривалість i-го операційного періоду, год.

Для порівняння різних варіантів СНЕ, які можуть застосовуватись трейдерами для функціонування на ринку електричної енергії, та визначення економічно

доцільного з них знаходимо максимальне значення коефіцієнту ефективності відповідно до виразу

$$P_{\Sigma}(x) \rightarrow \max. \quad (6)$$

На основі даних про сумарне навантаження ОЕС України [21] з використанням багатошарової штучної нейронної мережі ANNSTLF [22] виконано прогнозування величини сумарного навантаження ОЕС України, графік якого представлено на рис. 3. Прогноз виконувався для 30 попередніх днів зимового періоду 2018 р. Прогнозування виконано для 30 наступних днів. При прогнозуванні було використано 30 нейронів прихованого шару.

Результати прогнозування зіставлені з реальними даними для навантаження за розрахунковий період, на основі чого визначена величина помилки прогнозування, максимальне значення якого за весь період складає -2,44%. Це свідчить про достатню достовірність процесу прогнозування навантаження для вирішення поставленої задачі.

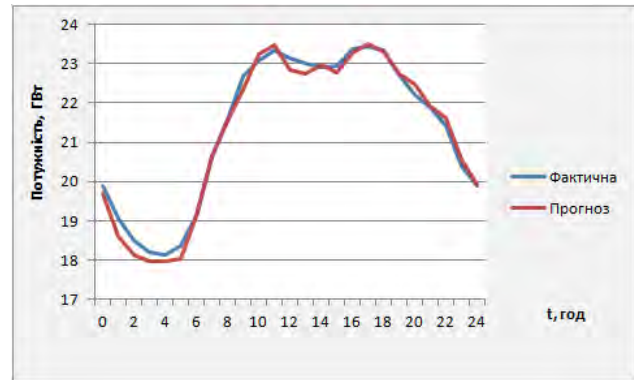


Рис. 3 – Сумарне навантаження ОЕС України

Для визначеного графіка навантаження відповідно до запропонованої методики був виконаний розрахунок коефіцієнту ефективності застосування різних видів СНЕ, на основі якого зроблено порівняння варіантів використання різних СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України. Результати цього розрахунку представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України

Вид СНЕ	Характеристика СНЕ	ККД η , в.о.	Вартість СНЕ I_{SSE} , млн. дол.	Критерій економічної доцільності $P_{\Sigma}(x)$, млн. дол.
1	СНЕ відсутня	-	-	0,585
2	ГАЕС	0,81	4179,6	0,255
3	Стиснене повітря	0,65	1080	0,148
4	Розплавлена сіль	0,77	2970	0,239
5	Свинцево-кислотні акумуляторні батареї	0,87	4410	0,319
6	Супермаховик	0,86	2250	0,363

В якості базового варіанта розглянутий такий, при якому трейдер не використовує СНЕ, тобто купує електроенергію і здійснює її продаж без зберігання.

Аналіз даних табл. 2 показує, що найбільш економічно доцільним для трейдерів є варіант перепродажу електричної енергії без зберігання. Проте ця умова не завжди виконується протягом доби, що потребує застосування СНЕ. Використання супермаховика для трейдерів в умовах ринку електричної енергії є недоцільним, оскільки мінімальна різниця між закупкою, яка відбувається в базовій частині графіку або в часи полупікового навантаження, та продажем електричної енергії, що відбувається в часи пік навантаження, відповідно до прогнозного графіку навантаження ОЕС України становить більше 5 годин.

Таким чином, економічно доцільним для роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії України є застосування акумуляторних батарей.

Висновки.

1. Проведений аналіз особливостей роботи і технічних характеристик основних СНЕ, які застосовуються в світі для накопичення великого обсягу енергії, показав, що для поліпшення роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії в Україні можуть використовуватися механічні та електрохімічні СНЕ.

2. Розроблено критерій економічної ефективності використання СНЕ для роботи трейдерів на ринку електричної енергії, який враховує особливості поточної ситуації на ринку, а також технічні характеристики СНЕ й специфіку роботи трейдерів.

3. Проведено порівняння різних СНЕ для використання трейдерами при роботі на ринку електричної енергії України. Застосування розробленого критерію економічної ефективності використання СНЕ дозволило визначити найбільш ефективні з них при роботі трейдерів в умовах нового лібералізованого ринку електричної енергії в Україні.

4. Використання СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України дозволить підвищити ефективність роботи ринку і забезпечить поліпшення режимів ОЕС України.

Список літератури

- Kim Y.-M., Lee J.-H., Kim S.-J., Favrat D. Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses / Y.-M. Kim, J.-H. Lee, S.-J. Kim, D. Favrat // *Entropy*. - 2012. - № 14. - P. 1501-1521.
- Mohamad F., Teh J., Lai C.-M., Chen L.-R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review / F. Mohamad, J. Teh, C.-M. Lai, L.-R. Chen // *Energies*. - 2018. - № 11. - P. 2278.
- Madlener I.R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air storage for enhanced grid integration of wind power / I.R. Madlener, J. Latz // *Appl Energy*. - 2013. - № 101. - P. 299-309.
- Raju M., Kumar Khaitan S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant / M. Raju, S. Kumar Khaitan // *Appl Energy*. - 2012. - № 89. - P. 474-481.
- Соколова М.А., Томасова В.С., Jastrzębski R.P. Сравнительный анализ систем запасаения энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков /

М.А. Соколова, В.С. Томасова, R.P. Jastrzębski // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. - 2014. - № 4 (92). - P. 149-155.

- Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Перспективы создания и дальнейшего развития CES-технологий / Г.К. Лавренченко, А.В. Копытин // *Холодильная техника*. - 2014. - № 11. - P. 44-50.
- Жаркін А.Ф., Новський В.О., Мартинов В.В. [та ін.] Системи накопичення енергії на основі застосування потужних двофазних перетворювачів / А.Ф. Жаркін, В.О. Новський, В.В. Мартинов, А.Г. Пазєєв, С.О. Палачов, Ю.В. Руденко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2018. - № 26 (1302). - Т. 1. - С. 25-33.
- Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // *Ползуновский вестник*. - 2013. - № 4-2. - С. 176-181.
- Фіалко Н.М., Тимченко М.П. Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення / Н.М. Фіалко, М.П. Тимченко // *Промислова теплотехніка*. - 2017. - № 4. - Т. 39. - С. 44-54.
- Заславський В.А., Пасічна М.В. Системи зберігання енергії: аспекти безпеки і оптимізації / В.А. Заславський, М.В. Пасічна // *Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки*. - 2018. - № 1. - С. 65-71.
- World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/01-E-storage.pdf>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- Breidenbach N., Martin C., Jockenhöfer H., Bauer T. Thermal Energy Storage in Molten Salts: Overview of Novel Concepts and the DLR Test Facility TESIS / N. Breidenbach, C. Martin, H. Jockenhöfer, T. Bauer // *Energy Procedia*. - 2016. - № 99. - P. 3-10.
- U.S. Energy storage monitor [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://energystorage.org/energy-storage/us-energystorage-monitor>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- Ibrahima H., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems - Characteristics and comparisons / H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2008. - № 12. - P. 1221-1250.
- Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo // *Applied Energy*, Elsevier Ltd. - 2015. - № 137. - P. 511-536.
- Mares J., Libra M., Poulek V. Electric energy storage / J. Mares, M. Libra, V. Poulek // *ELEKTRO Casopis pro Elektrotechniku*. - 2011. - № 2. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869. - (Дата звернення: 26.12.2018).
- Dvorak P., Vaca P., Pleha D. Electricity accumulation / P. Dvorak, P. Vaca, D. Pleha // *TZB-Info*. - 2011. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://oze.tzbinfo.cz/7435-akumulace-elektriny>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- European Federation of Energy Traders [Електронний ресурс]: Офіційний веб-сайт. - Режим доступу: <https://www.efet.org/>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- Про ринок електричної енергії [Електронний ресурс]: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. - Електронні текстові дані. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку [Електронний ресурс]: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- НЕК «Укренерго» [Електронний ресурс]: Офіційний веб-сайт. - Режим доступу: <https://ua.energy/activity/dispatch-information/ues-operation/>. - (Дата звернення: 08.01.2019).
- Тишевич Б.Л. Використання нейронних мереж для короткострокового прогнозування електричного навантаження в енергосистемах / Б.Л. Тишевич // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: Гірництво. - 2015. - № 28. - С. 104-109.

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. Raju M., Kumar Khaitan S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant. *Appl Energy*. 2012, vol. 89, pp. 474-481.
5. Sokolova M.A., Tomasova V.S., Jastrzębski R.P. Sravnitel'nyj analiz sistem zapasaniya jenerгии i opredelenie optimal'nyh oblastej primeneniya sovremennyh supermahovikov [Comparative analysis of energy storage systems and identification of optimal areas of application for modern super-flywheels]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014, vol. 4 (92), pp. 149-155.
6. Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V. Perspektivy sozdaniya i dal'nejshego razvitiya CES--tehnologij [Prospects for the creation and further development of CES technologies]. *Holodil'naja tehnika*. 2014, vol. 11, pp. 44-50.
7. Zharkin A.F., Novs'kyj V.O., Martynov V.V. [ta in.]. Systemy nakopychennja energii' na osnovi zastosuvannja potuznyh dvonaprijamlenyh peretvorjuvachiv [Systems of energy accumulation based on the use of powerful two-way converters]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Ser. : Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah*. 2018, vol. 26 (1302), no. 1, pp. 25-33.
8. Smolencev N.I. Nakopiteli jenerгии v lokal'nyh jelektricheskikh setjah [Energy storage devices in local electrical networks]. *Polzunovskij vestnik*. 2013, vol. 4-2, pp. 176-181.
9. Fialko N.M., Tymchenko M.P. Tehnologii' nakopychennja energii' u skladi intelektual'nyh system energozabezpechennja [Technologies of energy accumulation in intelligent power supply systems]. *Promysova teplotehnika*. 2017, vol. 4, no. 39, pp. 44-54.
10. Zaslavs'kyj V.A., Pasichna M.V. Systemy zberigannja energii': aspekty bezpeky i optymizacii' [Energy storage systems: security and optimization aspects]. *Naukovy zapysky NaUKMA. Komp'juterni nauky*. 2018, vol. 1, pp. 65-71.
11. World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications. Available at: <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/01-E-storage.pdf>. (accessed: 08.01.2019).
12. Breidenbach N., Martin C., Jockenhöfer H., Bauer T. Thermal Energy Storage in Molten Salts: Overview of Novel Concepts and the DLR Test Facility TESIS. *Energy Procedia*. 2016, vol. 99, pp. 3-10.
13. U.S. Energy storage monitor. Available at: <http://energystorage.org/energy-storage/us-energystorage-monitor>. (accessed: 08.01.2019).
14. Ibrahima H., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems - Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, vol. 12, pp. 1221-1250.
15. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy, Elsevier Ltd*. 2015, vol. 137, pp. 511-536.
16. Mares J., Libra M., Poulek V. Electric energy storage. *ELEKTRO Casopis pro Elektrotechniku*. 2011, vol. 2. Available at: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869. (accessed 26.12.2018).
17. Dvorak P., Baca P., Pleha D. Electricity accumulation. *TZB-Info*. 2011. Available at: <http://oze.tzbinfo.cz/7435-akumulace-elekriny>. (accessed 08.01.2019).
18. European Federation of Energy Traders. Available at: <https://www.efet.org/>. (accessed 08.01.2019).
19. Pro rynek elektrychnoi' energii': Zakon Ukraїny vid 13.04.2017 r. № 2019-VIII [On the Electricity Market: Law of Ukraine dated April 13, 2017 № 2019-VIII]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. (accessed 08.01.2019).
20. Pravyly rynku «na dobu napered» ta vnutrishn'odobovogo rynku: Postanova NKREKP vid 14.03.2018 № 308 [Market rules "one day in advance" and the internal market: NERC Regulation dated March 14, 2018, № 308]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18>. (accessed 08.01.2019).
21. NEK «Ukrenergo»: Oficijnyj veb-sajt [NPC "Ukrenergo": Official website]. Available at: <https://ua.energy/activity/dispatch-information/ues-operation/>. (accessed 08.01.2019).
22. Tyshevych B.L. Vykorystannja nejronnyh merezh dlja korotkostrokovogo prognozuvannja elektrychnogo navantazhennja v energosystemah [Use of neural networks for short-term forecasting of electric load in power systems]. *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu Ukraїny «Kyїvs'kyj politehničnyj instytut». Serija: Girmystvo*. 2015, vol. 28, pp. 104-109.

Надійшла (received) 18.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Довгалик Оксана Миколаївна (Довгалик 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; e-mail: Dovgalyuk_O@khpi.edu.ua.

Сайдів Шералі Нуралійович (Саидов Шерали Нуралиевич, Saidov Sherali Nuralievich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри електричних станцій, м. Харків; тел.: (057) 707-65-65; e-mail: Saidov.sh.n@gmail.com.

Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Яковенко Иван Сергеевич) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: i.c.jakovenko@gmail.com.

О. В. КУЛАПИН, К. В. МАХОТИЛО

МОДЕЛЮВАННЯ СМАРТ-МЕРЕЖІ СПОЖИВАЧІВ-ПРОСЬЮМЕРІВ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Запропоновано модель вузла смарт-мережі для споживача-просьюмера в межах котеджного селища. Модель включає в себе типові добові графіки навантаження будинку та генерації дахової фотоелектричної системи, модель акумуляторної системи зберігання енергії та контролера вузла смарт-мережі. Розроблено алгоритми керування роботою вузла смарт-мережі, який передбачає різні режими роботи для літа та зими. В залежності від години доби, стану заряду акумулятора, генерації фотоелектричної системи та навантаження будинку контролер керує балансує споживанням або віддачею енергії до мережі, зарядженням або розрядженням акумулятора, купівлею або продажем енергії просьюмером до енергосистеми. Метою керування влітку є повне використання енергії, виробленої власною фотоелектричною системою, для власного споживання та продажу надлишків в енергосистему в години пікового навантаження. Метою керування взимку є зниження витрат споживача за рахунок перенесення навантаження на нічні години та збільшення доходів від перепродажу накопиченої енергії до енергосистеми в пікові години. За результатами моделювання на прикладі котеджного селища в харківській області визначено мінімальну ємність акумуляторної системи, якої достатньо для забезпечення автономності споживача-просьюмера влітку та отримання доходу від перепродажу енергії взимку. Показано, що запропоновані алгоритми керування роботою вузла смарт-мережі дозволяють споживачу-просьюмеру ефективно використовувати власну фотоелектричну систему та надавати системні послуги об'єднаній енергосистемі.

Ключові слова: смарт мережа, споживач-просьюмер, фотоелектрична система, математична модель, алгоритм керування.

A. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАРТ-СЕТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ-ПРОСЬЮМЕР С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Предложена модель узла смарт-сети для потребителя-просьюмера в пределах коттеджного поселка. Модель включает в себя типичные суточные графики нагрузки дома и генерации крышной фотоэлектрической системы, модель аккумуляторной системы хранения энергии и контроллера узла смарт-сети. Разработаны алгоритмы управления работой узла смарт-сети, предусматривающие различные режимы работы для лета и зимы. В зависимости от времени суток, состояния заряда аккумулятора, генерации фотоэлектрической системы и нагрузки дома контроллер управляет балансирующим потреблением или отдачей энергии в сеть, зарядом или разрядом аккумулятора, покупкой или продажей энергии просьюмером в энергосистему. Целью управления летом является полное использование энергии, производимой собственной фотоэлектрической системой, для собственного потребления и продажи излишков в энергосистему в часы пиковой нагрузки. Целью управления зимой является снижение затрат потребителя за счет переноса нагрузки на ночные часы и увеличение доходов от перепродажи накопленной энергии в энергосистему в пиковые часы. По результатам моделирования на примере коттеджного поселка в харьковской области определена минимальная емкость аккумуляторной системы, достаточная для обеспечения автономности потребителя-просьюмером летом и получения дохода от перепродажи энергии зимой. Показано, что предложенные алгоритмы управления работой узла смарт-сети позволяют потребителю-просьюмеру эффективно использовать собственную фотоэлектрическую систему и оказывать системные услуги объединенной энергосистеме.

Ключевые слова: смарт сеть, потребитель-просьюмер, фотоэлектрическая система, математическая модель, алгоритм управления.

O. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO

MODELING SMART GRID OF PROSUMERS WITH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The smart-grid node model for prosumer within a cottage community has been proposed. The model includes a typical cottage load daily profiles and a roof photovoltaic system generation daily profiles, an energy storage system model and a smart grid node controller. The control algorithms for the smart grid node operation, providing different operation modes for summer and winter are developed. Depending on the time of day, the battery state of charge, the photovoltaic system generation and the cottage load, the controller controls the balancing power consumption or output to the grid, the battery charge or discharge, the energy buy or sale by prosumer. The control goal in summer is to fully use the energy produced by own photovoltaic system for own needs and to sale of surplus energy to the grid during peak hours. The control goal in winter is to reduce consumer costs by shifting the load overnight and increasing revenues from the resale of stored energy to the grid during peak hours. The minimum battery capacity of the energy storage system, sufficient to ensure the consumer autonomy in the summer and generate income from the energy resale in the winter, was estimated based on the simulation results for the case of a cottage community in the Kharkiv region. It is shown that the proposed algorithms for control of a smart grid node allow the prosumer to effectively use their own photovoltaic system and provide system services to the energy system.

Keywords: smart grid, prosumer, photovoltaic system, mathematical model, control algorithm.

Постановка проблеми. Останнім часом у світі зростає інтерес до нових принципів організації виробництва, розподілу і споживання енергії, які передбачають активне залучення абонентів енергетичних кампаній до управління роботою енергомереж. Одним з них є створення спільнот просьюмерів, тобто об'єднань абонентів мережі нового типу, які не лише купують, а й виробляють і продають енергію, в основному від відновлюваних джерел з

малою встановленою потужністю. Технологічною базою для їх функціонування є смарт-мережі (СМ), які об'єднують розподілену генерацію й споживачів електричною мережею гнучкої конфігурації та інформаційною системою обміну даних й керування. Також в спільнотах просьюмерів передбачається активне використання систем акумуляції електроенергії.

Можна очікувати, що найбільш активний розвиток спільнот просьюмерів буде відбуватись серед сільських господарств та власників котеджних будинків, які вже зараз є лідерами з встановлення малих фотоелектричних систем в Україні. Однак, на цьому шляху існує багато технічних проблем, які належить подолати [1]. Тому задача розробки методів створення СМ для спільнот просьюмерів з акумулюванням енергії є актуальною і потребує широких теоретичних та практичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках даного дослідження смарт мережа – це невелика гнучка мережа, яка об'єднує споживачів відновлюваних джерел енергії, системи зберігання енергії, навантаження, вузли підключення до об'єднаної енергосистеми (ОЕС) та інформаційно-керуючу систему. СМ може працювати як в режимі, приєднання до ОЕС, та і в автономному режимі. Головною перевагою технології СМ є те, що вона може забезпечити гнучку та двосторонню взаємодію споживачів і виробників електроенергії, гарантуючи надійність і ефективність енергопостачання [2].

Як показують останні дослідження [3], забезпечення стійкості і довгострокової ефективності процесу розподілу енергії в мережах з великою часткою розподіленої відновленої генерації потребує створення нового типу споживача енергії – просьюмера. У порівнянні з традиційними споживачами просьюмери керують споживачами, генерують, передають, а також зберігають енергію [4]. Передбачається, що вимірювальні прилади просьюмерів, об'єднаних СМ, можуть інтегруватись з їх побутовими системами управління енергоспоживанням [6], системами зберігання енергії [7], електромобілями [8] для інтелектуального керування спільною роботою [9].

Просьюмери можуть використовувати власні системи накопичення енергії для майбутнього споживання, або продажу надлишкової енергії іншим споживачам [5]. За останніми дослідженнями, на сьогодні найбільш пристосованою технологією накопичення енергії для масштабу невеликої СМ, є електрохімічні Li-Ion акумулятори [6]. Одним з лідерів ринку індивідуальних систем зберігання енергії є компанія Tesla Motors, Inc., яка займається розробкою і виробництвом акумуляторних систем Powerwall для побутових фотоелектричних систем, крім неї такі системи випускають LG, Nissan, BMW. Ємність їх акумуляторів складає 2,5–13,5 кВт·год [9]. Також перспективним є використання в СМ акумуляторів електромобілів ємністю 35-60 кВт·год, які можуть використовуватись для зберігання і віддачі енергії до мережі [8].

Координація роботи всього цього енергетичного обладнання просьюмером вручну фактично неможлива і вимагає створення автоматизованої системи керування та алгоритмів, які можуть адаптуватись до різних цілей окремих просьюмерів, кліматичних умов й ситуації на енергоринку. Найбільш активно теоретичними дослідженнями та розвитком малих СМ займаються в США. В своїй більшості відомі техніко-

економічні дослідження СМ використовують звичайні моделі попиту на електроенергію з урахуванням кліматичних умов даної місцевості [10]. Але розробка оптимальної стратегії управління СМ просьюмерів має спиратись на більш детальне моделювання режимів генерації та споживання.

В останній час для моделювання роботи СМ широко застосовуються моделі з бібліотек пакету Matlab [11]. Стандартно вони включають в себе блоки джерел енергії (фотоелектричних та вітрових), Li-Ion системи акумуляції та навантаження. Перевагою і в той же час недоліком таких моделей є детальний опис роботи перетворювачів енергії [12], який потребує тривалих обчислень при моделюванні процесів, що відбуваються в СМ на протязі годин чи діб. Іншим недоліком є складність завдання правил керування режимами роботи локальної СМ та її взаємодії з ОЕС. Тому для моделювання процесів взаємодії просьюмерів в межах СМ необхідно використовувати спеціально розроблені, більш спрощені, проте зручні для експериментування з законами керування моделі.

Мета роботи. Створити математичну та комп'ютерну модель смарт-мережі населеного пункту сільської місцевості для споживачів-просьюмерів та розробити алгоритм керування її роботою.

Основні матеріали дослідження. В даній роботі розглядається СМ для спільноти просьюмерів бази котеджного селища в Харківській області з домами, обладнаними автономними фотоелектричними системами та акумуляторами.

В якості базового елемента для створення моделі СМ обрано вузол просьюмера. У вузлі здійснюється підключення навантаження абонента, власної фотоелектричної системи (ФЕС), акумуляторної системи зберігання енергії (АС), а також підключення до електричної мережі (рис. 1).

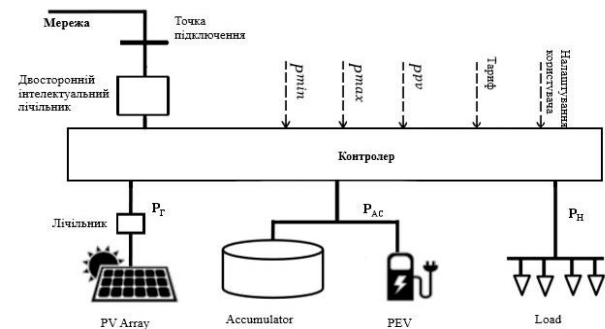


Рис 1 - Вузол просьюмера в смарт-мережі

Облік споживання та генерації енергії здійснює інтелектуальний лічильник, а роботою вузла керує контролер. З організаційної точки зору з інформаційною підсистемою контролера також взаємодіють диспетчер розподільчої мережі, який встановлює межі потужності генерації та споживання вузла, а також роздрібний енергопостачальник, з яким укладено енергетичний контракт споживача-просьюмера.

Задачами системи керування вузла просьюмера є повне забезпечення його споживачів енергією,

максимізація використання енергії, генерованої ФЕС, максимізація доходу від продажу енергії в ОЕС, мінімізація витрат на купівлю енергії з ОЕС, мінімізація незапланованих перетоків енергії з ОЕС, максимізація використання встановленого енергетичного обладнання.

Для створення алгоритмів керування, що відповідають вказаним задачам, необхідно розробити математичну модель вузла. Вона включає в себе моделі навантаження, генерації ФЕС, акумуляторної системи та контролер. Якості засобу комп'ютерного моделювання обрано пакет MatLab та базові елементи тулбоксу Simulink.

Модель навантаження та генерації. На рис. 2. наведено літні та зимові графіки потужності генерації P_G дахової ФЕС та споживання P_H електроенергії будинком в обраному для дослідження когеджному селищі, в Харківській області. Це – розрахункові дані, отримані для типових робочих днів за сонячної погоди з урахуванням реального орієнтування даху будинку. Встановлена потужність ФЕС прийнята рівною 5 кВт, а встановлена потужність електроприймачів будинку – 2,5 кВт (ця потужність не враховує систему опалення/кондиціонування).

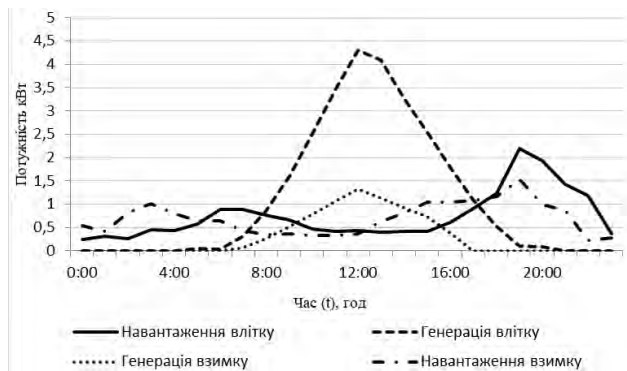


Рис 2 - Графік навантаження та генерації ФЕС

Модель акумуляторної системи. Для моделювання акумуляторної системи зберігання енергії розроблено вказану на рис. 3 спрощену модель Li-Ion акумулятора на базі інтегратора з обмеженнями.

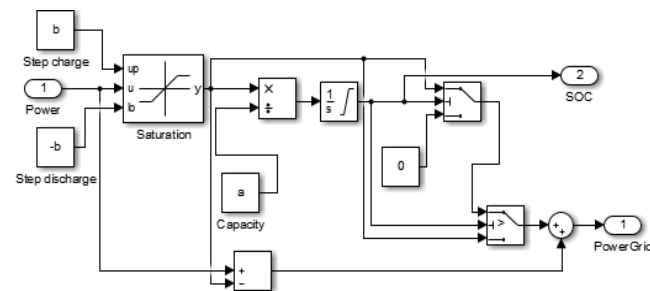


Рис. 3 – Модель системи зберігання енергії

Моделювання здійснюється у нормованих параметрах, приведених до ємності акумулятора. На вхід моделі АС подається різниця між потужністю, генерованою ФЕС, та спожитою будинком. На виході моделі видається так звана балансуєча потужність мережі P_M , тобто потужність, яка буде спожита з чи віддана до мережі енергопостачальної компанії поза

запланованих операцій купівлі й продажу просьюмера. Фактично, величина P_M відображає залучення ОЕС для балансування генерації й споживання в СМ, яке має бути мінімізовано системою керування СМ.

Величина P_M залежить як від потужності на вході АС, так і від стану заряду акумулятора:

$$P_M = f(P_{AC}, SOC), \quad (1)$$

де P_{AC} – потужність на вході АС; SOC – стан заряду акумулятора АС.

Потужність заряджання та розряджання акумулятора відповідають технічним обмеженням:

$$P_A = \begin{cases} b, & \text{при } P_{AC} > b; \\ P_{AC}, & \text{при } -b \leq P_{AC} \leq b; \\ -b, & \text{при } P_{AC} < -b, \end{cases} \quad (2)$$

де P_A – потужність заряджання або розряджання акумулятора; b – максимальна потужність заряджання чи розряджання акумулятора.

Коли акумулятор повністю заряджений, потужність заряджання дорівнює нулю, $P_A=0$.

Стан заряду акумулятора у поточний момент часу, визначається у відносних одиницях за формулою:

$$SOC = 1/C_{ном} \int P_A dt; \quad 0,2 \leq SOC \leq 1, \quad (3)$$

де $C_{ном}$ – номінальна ємність акумулятора; обмеження знизу 0,2 відображає типову максимальну глибину розряджання Li-Ion акумулятора у 20%.

Таким чином, балансуєча потужність мережі P_M визначається за наступним виразом:

$$P_M = \begin{cases} P_{AC} - P_A, & \text{при } SOC < 1 \\ P_{AC}, & \text{при } SOC = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Модель вузла просьюмера в СМ. На рис. 4 подано запропоновану модель СМ.

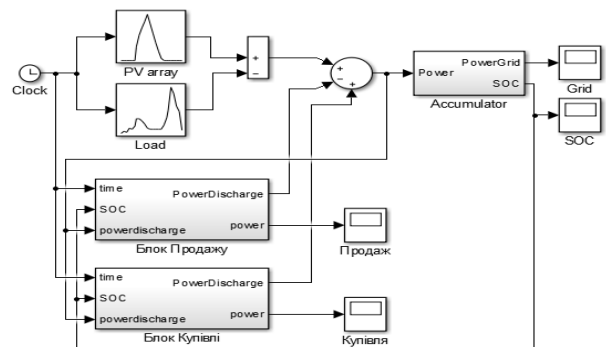


Рис. 4 – Модель вузла просьюмера в СМ

Модель є спрощеною і не враховує, зокрема втрати, та процеси комутації в обладнанні, але дозволяє оцінити ефективність різних алгоритмів керування роботою вузла просьюмера СМ.

Рівняння балансу у вузлу просьюмера в СМ визначається формулою:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} - P_{\text{П}} + P_{\text{К}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}}, \quad (5)$$

де: P_{Γ} – потужність, що генерується даховою ФЕС; P_{H} – потужність, що споживається будинком; $P_{\text{П}}$ – потужність, що продається просьюмером до ОЕС; $P_{\text{К}}$ – потужність, що купується просьюмером з ОЕС.

Система керування роботою вузла СМ.

Система керування (СК) роботою вузла просьюмера в СМ представлена двома блоками: продажу та купівлі енергії (см. рис.4). СК дає команди на купівлю або продаж потужності в визначений період доби згідно заданої операційної стратегії просьюмера.

У літній період енергія, що споживається будинком просьюмера, більшу частину днів менша за енергію, що генерується даховою ФЕС. Тому його операційна стратегія передбачає накопичення енергії від ФЕС в АС і максимальне використання для власних потреб протягом всієї доби, а також продаж її надлишків в енергосистему в години максимальної ціни в ОЕС. Тобто мета стратегії – максимальний рівень автономності споживача-просьюмера та максимізація доходу від надлишків генерації ФЕС.

У зимній період генерації від ФЕС зазвичай недостатньо для покриття навантаження будинку. Тому операційна стратегія просьюмера передбачає використання АС для накопичення енергії, купленої в енергосистемі в години найменшої за добу ціни, і подальший її продаж в енергосистему в години максимальної ціни в ОЕС. Тобто мета стратегії – максимізація доходу від перенесення навантаження і покриття експлуатаційних витрат на СМ.

При цьому в кожен момент часу балансує потужність мережі $P_{\text{М}}$ має бути мінімальною. При розрахунках вважається, що сплата за споживання $P_{\text{М}}$ здійснюється за роздрібним тарифом енергопостачальної компанії, а віддача $P_{\text{М}}$ до мережі не оплачується.

Алгоритм роботи вузла СМ в літній період.

Впродовж доби в літній період можливі чотири різні режими роботи вузла СМ, які реалізуються СК.

Режим 1. Генерація ФЕС P_{Γ} покриває навантаження будинку P_{H} , надлишки потужності заряджають АС та віддаються до мережі.

Якщо $SOC < 1$, то АС заряджає акумулятор до стану $SOC = 1$, а надлишок потужності видається в мережу ($P_{\text{М}} > 0$) для балансування вузла:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}} \quad (6)$$

Коли акумулятор заряджений, $SOC = 1$, уся надлишкова потужність віддається в мережу:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{М}} \quad (7)$$

Режим 2. Потужність навантаження P_{H} перевищує генерацію P_{Γ} , але дефіцит потужності у вузлу СМ менший за максимальну потужність розрядження акумулятора b . Дефіцит потужності покривається за рахунок енергії, накопиченої в АС:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} \quad (8)$$

Режим 3. Дефіцит потужності у вузлу СМ менший за максимальну потужність розрядження акумулятора b , а тариф на електроенергію T в поточний момент часу t більший, ніж середньодобовий $T_{\text{сд}}$, $T(t) > T_{\text{сд}}$. АС використовується як для покриття дефіциту потужності у вузлу, так і для продажу енергії в мережу до повного розрядження акумулятора ($SOC = 0,2$):

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} - P_{\text{П}} = P_{\text{А}} \quad (9)$$

Режим 4. Навантаження P_{H} перевищує власну генерацію ФЕС P_{Γ} , і дефіцит потужності більший за максимальну потужність розрядження акумулятора b . Покриття навантаження в вузлу здійснюється спільно за рахунок розрядження акумулятора та балансує споживання енергії з мережі $P_{\text{М}}$:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}} \quad (10)$$

Алгоритм роботи вузла СМ в зимовий період.

Впродовж доби в зимовий період СК реалізує ті ж чотири режими роботи вузла СМ, що й в літній період, а також ще один додатковий режим.

Режим 5. Тариф T в поточний момент часу t менший, ніж середньодобовий, $T(t) < T_{\text{сд}}$ і акумулятор не повністю заряджений, $SOC < 1$. Відбувається покупка енергії в мережі для покриття дефіциту потужності в СМ, а також для зарядження акумулятора:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} + P_{\text{К}} = P_{\text{А}}. \quad (11)$$

Вибір ємності акумулятора АС просьюмера.

Незважаючи на стале зниження цін, Li-Ion акумулятори залишаються самою дорогою частиною відновлюваних систем електропостачання. Тому ємність АС необхідно вибрати такою, щоб забезпечити повне використання енергії від ФЕС та ефективну роботу просьюмера на ринку при мінімальній вартості системи.

На рис 5 представлені результати моделювання роботи вузла СМ протягом доби для різних варіантів ємності акумулятора АС. Тут $W_{\text{П}}$ – планована продаж енергії до мережі, $W_{\text{К}}$ – планована купівля енергії з мережі, $W_{\text{М}}$ – енергія, відана чи спожита з мережі при балансуванні потужності.

Як видно на рис. 5,а, в зимовий період, починаючи з ємності АС 7,2 кВт·год просьюмера з'являється можливість продавати енергію до мережі $W_{\text{П}} > 0$. Завдяки багатозонному тарифу він може отримувати прибуток від використання власної АС для продажу акумуляованої вночі енергії у години піку. Згідно алгоритму роботи СМ при ємності до 13,5 кВт·год енергія з АС продається лише у години ранкового, а при більшій – і у години вечірнього піку навантаження в ОЕС. Після досягнення ємності у 22 кВт·год обмеження по потужності не дозволяють повністю зарядити АС за нічні години, обсяг купівлі енергії $W_{\text{К}}$

не змінюється, і подальше збільшення АС не є доцільним.

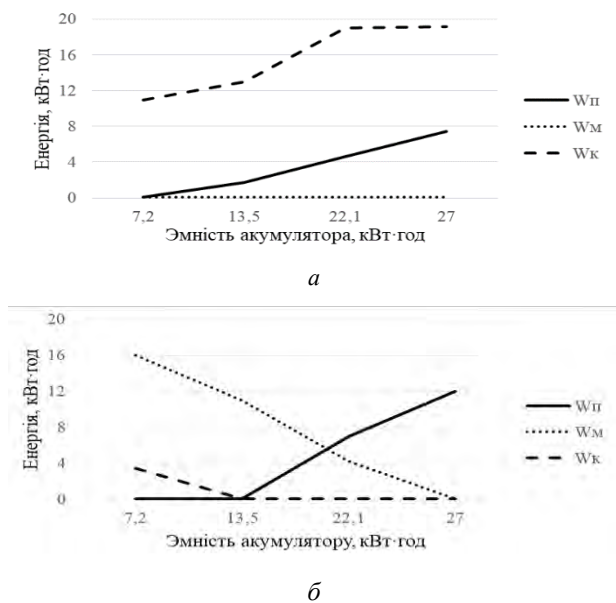


Рис. 5 – Добові показники роботи вузла СМ:
а) в зимовий період, б) в літній період

В літній період (див. рис. 5,б) при ємності акумулятора більше 13,5 кВт-год просьюмер може відмовитись від купівлі енергії з мережі і почати продавати в години пік енергію з власної ФЕС. При ємності акумулятора в 27 кВт-год АС може повністю акумулявати енергію, вироблену даховою ФЕС протягом доби в липні. Завдяки СМ ця енергія повністю покриває власне споживання просьюмера і буде продана до мережі в години піку за найвигіднішим для нього тарифом. Але подальше збільшення ємності АС не є доцільним, тому що для її заряджання не вистачить енергії від ФЕС.

Таким чином, найменша ємність акумулятора для вузла споживача-просьюмера в СМ розглянутого котеджного селища складає 13,5 кВт-год.

Для створення АС вузла СМ можуть використовуватись окремі установки на базі Li-Ion акумуляторів або, чи разом з ними, акумуляторні батареї власного електроавтомобіля споживача-просьюмера. Ємність відомих окремих акумуляторних установок складає 2,5; 4; 7 або 13,5 кВт-год. Ємність акумулятора сучасного електроавтомобіля перевищує 30 кВт-год, але його заряд у будь-який час повинен бути достатнім для середньої по дальності поїздки. Виходячи з цього, можна прийняти, що ємність акумулятора електроавтомобіля, доступна системі зберігання вузла просьюмера, складає 7,2 кВт-год. Тобто АС просьюмера легко може бути реалізована на базі будь-якого з цих рішень.

Моделювання режимів роботи СМ. На рис. 6 наведено приклади добових графіків роботи вузла СМ з АС ємністю 13,5 кВт-год за сонячної погоди.

Рис. 6,а відображає роботу вузла СМ влітку, коли СМ підтримує максимальний рівень автономності просьюмера. Як видно, в період з 0:00 по 5:00 вузол СМ працює в режимі 3. АС повністю розрядилась до кінця

попередньої доби, і незначна потреба будинку в потужності покривається з мережі. В період з 5:30 до 11:30 СМ працює в режимі 2. Навантаження будинку покривається за рахунок генерації з ФЕС. В період з 11:30 до 17:30 СМ переходить в режим 1, тому що потужність, генерована ФЕС, достатня для покриття навантаження будинку і заряджання АС. В період з 17:30 до 0:00 СМ переходить в режим 4, коли АС забезпечує навантаження та продаж надлишків потужності за вигідним тарифом до повного розряду акумуляторів. Як видно, вузол просьюмера купує енергію з мережі лише вночі і в мінімальних обсягах. АС зберігає енергію від ФЕС для власних потреб і продажу до мережі у пікові години.

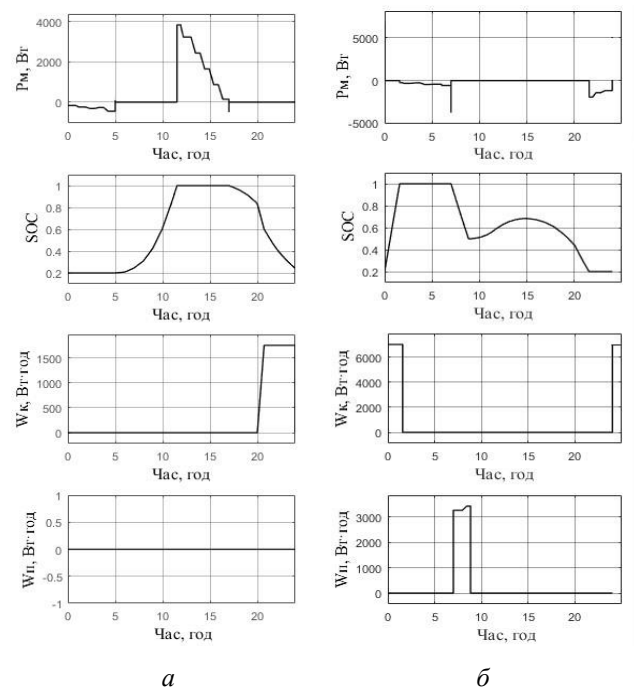


Рис. 6 – Робота вузла просьюмера:
а) в літній період, б) в зимовий період

Рис. 6,б відображає роботу вузла СМ взимку, коли СМ використовує АС для здобуття максимального прибутку від перенесення навантаження між годинами доби. З 0:00 до 6:30 СМ працює в режимі 5. СМ купує енергію з мережі за зниженим тарифом для повного заряду АС та покриття незначного навантаження будинку. В період з 6:30 до 8:00 СМ переходить в режим 3 та перепродає частину купленої вночі енергії за більш вигідним тарифом в часи ранкового піку в ОЕС. З 8:00 до 10:30 СМ працює в режимі 2, навантаження будинку покривається розрядженням АС. В період з 10:30 до 18:00 СМ працює в режимі 1. Генерація з ФЕС перевищує ене навантаження будинку, та додатково забезпечує заряджання АС. В період з 18:00 до 0:00 СМ працює в режимі 4, коли навантаження будинку покривається за рахунок розряджання АС та покриття дефіциту з мережі.

Як видно, вузол просьюмера купує та продає енергію з мережі в основному за планом, невелике балансування споживання енергії відбувається лише в часи вечірнього максимуму. АС використовується для

перенесення навантаження будинку на ніч та перепродажу енергії в години піку.

Висновки. Розроблена математична модель вузла просьюмера в смарт-мережі дозволяє досліджувати режими його роботи протягом доби. На прикладі котеджного селища в Харківській області запропоновано алгоритм керування роботою вузла та вибрано ємність акумуляторної системи зберігання енергії, які забезпечують власне навантаження споживача-просьюмера й дозволяють продавати енергію до мережі, надаючи системні послуги ОЕС. В літній період СМ котеджного селища майже не споживає енергію з мережі і продає її в години максимуму навантаження в ОЕС. В зимовий період СМ збільшує споживання в години нічного мінімуму навантаження та приймає участь у покритті навантаження в години максимуму. Така стратегія забезпечує високий рівень автономності споживачів-просьюмерів та доходу від володіння фотоелектричною системою з акумуляторною системою зберігання енергії.

Список літератури

1. Diaz, N.L.; Luna, A.C.; Vasquez, J.C. Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 5202–5213.
2. Rathnayaka, A.J.D. Development of a Community-Based Framework to Manage Prosumers in Smart Grid. Ph.D. Thesis, Curtin University, Perth, Australia, 2014
3. Rathnayaka, A.J.D.; Potdar, V.M.; Dillon, T.; Hussain, O.; Kuruppu, S. Analysis of energy be have our profiles of prosumers. In Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Beijing, China, 25–27 July 2012; pp. 236–241
4. Mahmood, A.; Butt, A.R.; Mussadiq, U.; Nawaz, R.; Zafar, R.; Razzaq, S. Energy sharing and management for prosumers in smart grid with integration of storage system. In Proceedings of the 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 19–21 April 2017; pp. 153–156.
5. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. Evaluation of wireless home automation technologies. In Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 76–81.
6. Jarnut, M.; Wermiński, S.; Waśkowicz, B. Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 74, 925–937.
7. Nefedov, E.; Sierla, S.; Vyatkin, V. Towards electric vehicles integration to distributed energy resources of prosumer. In Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 769–772.31.
8. Parag, Y.; Sovacool, B.K. Electricity market design for the prosumer era. *Nat. Energy* 2016, 1, 1–6.
9. Tesla Motors, Inc. Powerwall Product Homepage, 2015. Available at: http://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall (accessed on 16.05.19).

10. Renewable Energy Based Micro Grid Power Management System. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/renewable-energy-based-micro-grid-power-management-system> (accessed 20.05.19)
11. Simplified Model of a Small Scaled Micro-Grid. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html> (accessed 20.05.2019)
12. Nosratabadi, S. M.; Hooshmand, R. A.; Gholipour, E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 341–363.

References

1. Diaz, N.L.; Luna, A.C.; Vasquez, J.C. Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 5202–5213.
2. Rathnayaka, A.J.D. Development of a Community-Based Framework to Manage Prosumers in Smart Grid. Ph.D. Thesis, Curtin University, Perth, Australia, 2014
3. Rathnayaka, A.J.D.; Potdar, V.M.; Dillon, T.; Hussain, O.; Kuruppu, S. Analysis of energy be have our profiles of prosumers. In Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Beijing, China, 25–27 July 2012; pp. 236–241
4. Mahmood, A.; Butt, A.R.; Mussadiq, U.; Nawaz, R.; Zafar, R.; Razzaq, S. Energy sharing and management for prosumers in smart grid with integration of storage system. In Proceedings of the 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 19–21 April 2017; pp. 153–156.
5. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. Evaluation of wireless home automation technologies. In Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 76–81.
6. Jarnut, M.; Wermiński, S.; Waśkowicz, B. Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 74, 925–937.
7. Nefedov, E.; Sierla, S.; Vyatkin, V. Towards electric vehicles integration to distributed energy resources of prosumer. In Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 769–772.31.
8. Parag, Y.; Sovacool, B.K. Electricity market design for the prosumer era. *Nat. Energy* 2016, 1, 1–6.
9. Tesla Motors, Inc. Powerwall Product Homepage, 2015. Available at: http://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall (accessed on 16.05.19).
10. Renewable Energy Based Micro Grid Power Management System. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/renewable-energy-based-micro-grid-power-management-system> (accessed 20.05.19)
11. Simplified Model of a Small Scaled Micro-Grid. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html> (accessed 20.05.2019)
12. Nosratabadi, S. M.; Hooshmand, R. A.; Gholipour, E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 341–363.

Надійшла (received) 21.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Махотіло Костянтин Володимирович (Махотіло Константин Владимирович, Makhotilo Kostiantyn Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7081-071X>; e-mail: kvmahotilo@gmail.com

Кулапін Олександр Валентинович (Кулапін Александр Валентинович, Kulapin Olexander Valentinovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9283-6910>; e-mail: sasha.kulapin@gmail.com

О. В. ЧУЛЄВА, В. М. ЗОЛОТАРЬОВ

РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОСТОРОВОГО СТРУКТУРУВАННЯ ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ КОМПОЗИЦІЙ ПОЛІОЛЕФІНІВ СИСТЕМАМИ БІФУНКЦІОНАЛЬНИХ КРЕМНІЙОРГАНІЧНИХ СПОЛУК

Метою статті є визначення впливу хімічного складу та кінетичних характеристик ініціаторів на процес просторового структурування (зшивання) поліолефінів біфункціональними кремнійорганічними сполуками. Досліджували поліетилен низької густини, лінійний поліетилен низької густини, суміші Sb_2O_3 з бром та хлорорганічними сполуками в співвідношенні 1:3, як антипірени; системи зшивання на основі винілтриметоксисилану. Ініціатори щеплення - дікумилпероксид та [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксид. Зразки полімерних композицій виготовляли на лінії компаундування та екструзійній лінії виготовлення кабельної продукції. Визначення показників просторового структурування (зшивання): фракції гелю, теплової деформації, залишкового видовження проводили за стандартними методиками. Вперше використано ці методи досліджень з метою визначення впливу діалкілпероксидів на процеси просторового структурування поліолефінів в присутності галогеновмісних антипіренів. Показана ефективність використання [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксиду як ініціатору щеплення

Ключові слова: модифікація поліолефінів, просторове структурування, органосилани, пожежобезпечність кабелів.

Е. В. ЧУЛЕЕВА, В. М. ЗОЛОТАРЁВ

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПОЛИОЛЕФЕНОВ СИСТЕМАМИ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Целью статьи является определение влияния химического состава и кинетических характеристик инициаторов на процесс пространственного структурирования (сшивание) полиолефинов бифункциональными кремнийорганическими соединениями. Исследовали полиэтилен низкой плотности, линейный полиэтилен низкой плотности, смеси Sb_2O_3 с бром и хлорорганическими соединениями в соотношении 1: 3, как антипирены; системы сшивания на основе винилтриметоксисилану. Инициаторы прививки - дикумилпероксид и [1,3-фениленбис (1-метилетилиден)] бис [третбутил] пероксид. Образцы полимерных композиций изготавливали на линии компаундирования и экструзионной линии изготовления кабельной продукции. Определение показателей пространственного структурирования (сшивание): фракции геля, тепловой деформации, остаточного удлинения проводили по стандартным методикам. Впервые использованы эти методики исследований с целью определения влияния диалкилпероксидов на процессы пространственного структурирования полиолефинов в присутствии галогеносодержащих антипиренов. Показана эффективность использования [1,3-фениленбис (1-метилетилиден)] бис [третбутил] пероксида как инициатора прививки

Ключевые слова: модификация полиолефинов, пространственное структурирование, пожаробезопасность кабелей.

O. V. CHULIEIEVA, V. M. ZOLOTARYOV

REGULATION OF SPATIAL STRUCTURING PROCESSES OF FIREFIGHTING COMPOSITIONS OF POLYOLEFINS BY BIFFUNCTIONAL SILICON ORGANIC SYSTEMS

The purpose of the article is to determine the influence of the chemical composition and kinetic characteristics of the initiators on the process of spatial structuring (crosslinking) of polyolefins by bifunctional organosilicon compounds. Investigated low density polyethylene, linear low density polyethylene, mixtures of Sb_2O_3 with bromine and organochlorine compounds in the ratio 1: 3, as flame retardants; vinyltrimethoxysilane-based crosslinking systems. The vaccine initiators are dicumyl peroxide and [1,3-phenylenebis (1-methylethylidene)] bis [tert-butyl] peroxide. Samples of polymer compositions were made on the compounding line and the extrusion line for the manufacture of cable products. Determination of spatial structuring indicators (crosslinking): gel fractions, thermal deformation, and residual elongation were performed according to standard methods. For the first time, these research methods were used to determine the effect of dialkyl peroxide on the spatial structuring of polyolefins in the presence of halogen-containing flame retardants. The effectiveness of using [1,3-phenylenebis (1-methylethylidene)] bis [tert-butyl] peroxide as a graft initiator is shown.

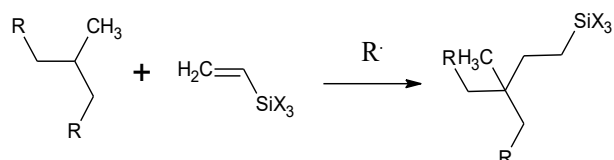
Keywords: modification of polyolefins, spatial structuring, organosilanes, fire safety cables.

Вступ. Освоєння промислового виробництва сучасних конструкцій кабельної продукції з максимальною робочою температурою жили 363 К вимагає застосування нових прогресивних полімерних матеріалів, які поєднують такі дві властивості, як теплостійкість та пожежобезпечність. Важливим фактором, який стримує впровадження цих полімерних матеріалів під час виробництва кабелів та кабельної продукції, є притаманна поліолефінам пожежна небезпека, що обумовлена горючістю та процесами, які її супроводжують, тобто спроможністю

матеріалу до спалахування та підтримання й розповсюдження горіння [1, 2].

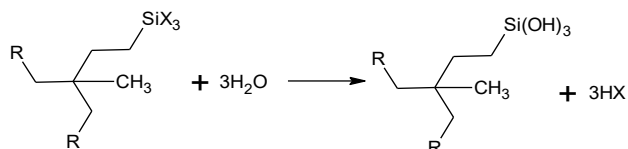
В Україні та за кордоном розроблено композиції поліолефінів, які здатні до зшивання силанами, але вони не згасають самостійно [3 – 7].

Механізм взаємодії органосиланів і поліолефінів в загальному вигляді можна представити наступною схемою [8]:

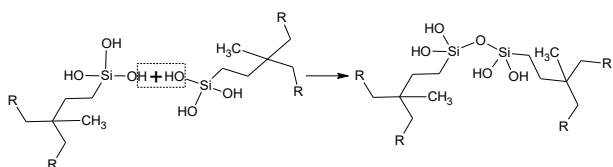


X_3 – групи, які легко гідролізуються.

Просторова структуризація полімеру, який модифіковано силаном здійснюється за рахунок утворення силоксанових ланок в процесі гідролізу під дією вологи:



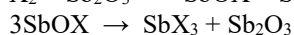
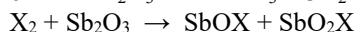
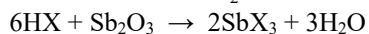
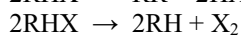
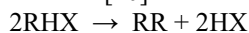
які згодом конденсуються утворюючи — Si — O — Si — зв'язки з виділенням води.



Для зниження займистості композицій, які здатні до зшивання силанами, спроможності підтримувати і поширювати горіння як антипірени використовували суміші Sb_2O_3 з бром та хлорорганічними сполуками.

Максимальний синергічний ефект під час затухання Sb_2O_3 здійснює в співвідношенні 1:3 зі сполуками галогенів [9].

Виділення галогену та взаємодія зі Sb_2O_3 протікає згідно схеми [10]:



де R – органічний радикал; X – галоген (бром або хлор)

Важливим етапом одержання структурованих пожегобезпечних композицій поліолефінів є щеплення біфункціональних кремнійорганічних сполук з використанням ініціаторів щеплення. Широке застосування як ініціаторів щеплення отримали діалкілперокси. Але залежність цього процесу від хімічного складу та кінетичних характеристик ініціаторів щеплення вивчено недостатньо. Особливо в присутності галогеновмістких антипіренів. Ефективність процесу зшивання пожегобезпечних полімерних матеріалів в значній мірі залежить від якісного проведення процесу щеплення біфункціональних кремнійорганічних сполук.

Мета роботи. Вивчення впливу хімічного складу та кінетичних характеристик ініціаторів на процес зшивання поліолефінів біфункціональними кремнійорганічними сполуками. Це дасть можливість

обґрунтовано підходити до визначення ініціаторів щеплення та раціонального складу сухих концентратів силанів для регулювання процесів просторового структурування поліолефінів системами біфункціональних кремнійорганічних сполук.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити: залежність фракції гелю від кількісного та якісного складу ініціаторів щеплення біфункціональних кремнійорганічних сполук до поліолефінів після щеплення та зшивання полімерних композицій; залежність теплової деформації та залишкового відносного видовження від хімічного складу та кінетичних характеристик ініціаторів щеплення.

Матеріали та обладнання. В роботі використали поліетилен низької густини (LDPE), лінійний поліетилен низької густини (LLDPE) як матричні полімери, суміші Sb_2O_3 з бром та хлорорганічними сполуками як антипірени в співвідношенні 1:3; системи зшивання на основі вінілтриметоксисилану. Ініціатори щеплення – дікумілпероксид ($C_{18}H_{22}O_2$) та [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксид ($C_{20}H_{34}O_4$). Модифікація поліолефінів галогеновмісними антипіренами проведена на лінії компаундування BTS50–35D компанії ERMAFA (Германія) на базі двошнекового екструдера. Щеплення біфункціональних кремнійорганічних сполук

проведено під час виготовлення кабельної продукції на лінії ізолювання компанії ROSENDAHL на базі екструдера RE 1 – 120 ARZ. Визначення вмісту фракції гелю проводили згідно стандарту [11]. Теплову деформацію та залишкове відносне видовження визначали за методами стандарту [12].

Результати досліджень. Кінетичні характеристики дікумілпероксиду та [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксиду представлено в таблиці 1 [13].

Таблиця 1 – Кінетичні характеристики ініціаторів щеплення

пероксид	Енергія активації	Температура, °C	$K_{роз} \cdot 10^5, c^{-1}$		
дікумілпероксид	153	140	18		
		150	53		
		160	140		
[1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксид перша пероксидна група	152	140	22		
		150	58		
		170	450		
		друга пероксидна група	161	140	10
				150	30
				160	84

Визначали зміну ступеню зшивання за значенням фракції гелю під час використання ініціаторів щеплення різного хімічного складу та кінетичних характеристик. Особливе значення має відсутність або

незначне значення фракції гелю в пожежобезпечних композиціях після проведення щеплення. Процес щеплення здійснюється під час виробництва силових ізольованих та захищених проводів. Головною умовою є забезпечення відсутності структурованих часточок впродовж виготовлення пожежобезпечної кабельної продукції. Наявність структурованих утворень призводить до погіршення якості та зовнішнього вигляду кабельної продукції. Склад компонентів полімерних композицій наведено в таблиці 2.

Сухий концентрат силану СКС – 1 містить ініціатор щеплення дікумілпероксид, СКС – 2 – [1,3-феніленбіс(1-етилтиліден)]біс [третбутил] пероксиду, СКС – 2.

Таблиця 2 – Пожежобезпечні композиції поліолефінів які здатні до зшивання силанами

Найменування компонентів	Вміст компонентів, % мас.					
	1	2	3	4	5	6
LDPE (ППР 2,0)	89,7			87,0		
LLDPE (ППР 3,0)		89,7			87,0	
LLDPE (ППР 2,0)			89,7			87,0
Антипірен (ХОС + Sb ₂ O ₃)				8,4	8,4	8,4
Антипірен (БОС + Sb ₂ O ₃)	5,3	5,3	5,3			
Світлостабілізатор	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Сухий концентрат силану СКС – 1, СКС - 2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Результати досліджень залежності фракції гелю від хімічного складу полімерних композицій та хімічного складу і кінетичних характеристик ініціаторів щеплення наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Фракція гелю полімерних композицій після щеплення та зшивання

показник	композиції					
	1	2	3	4	5	6
Фракція гелю після щеплення						
СКС – 1	25	30	40	15	20	25
СКС – 2	4	5	6	3	4	6
Фракція гелю після зшивання						
СКС – 1	50	61	72	20	25	30
СКС – 2	60	68	78	26	30	36

Важливим показником, який характеризує зшивання композицій полімерів, є: теплова деформація після витримки зразків впродовж 900 с за температури (473 ± 3) К; (напруження розтягу 0,2 МПа); залишкове відносне видовження після зняття напруження та охолодження. Результати цих досліджень надано на рис. 1, 2. Більші значення фракції гелю після зшивання пожежобезпечних полімерних композицій мають полімерні композиції з ініціатором щеплення [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксид (таблиця 3), в якому має місце ступінчатий розпад пероксидних груп. Енергія активації розкладу другої пероксидної групи більше, в той час як швидкість розкладу менше (таблиця 1).

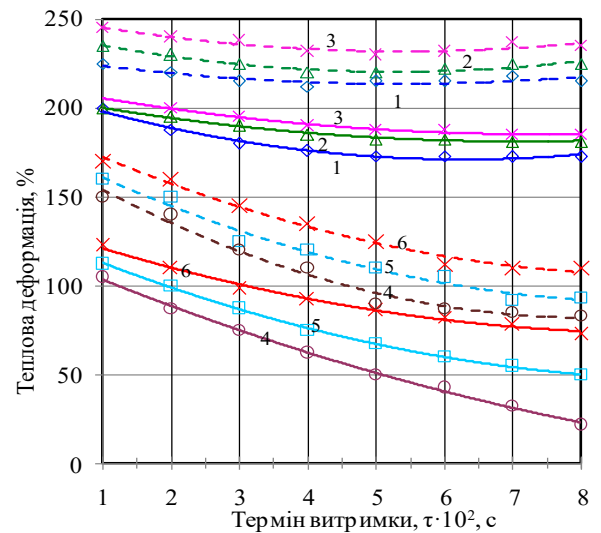


Рис. 1 – Залежність теплової деформації від тривалості витримки (τ) полімерних композицій 1 – 6

--- для (СКС – 1)

— для (СКС – 2)

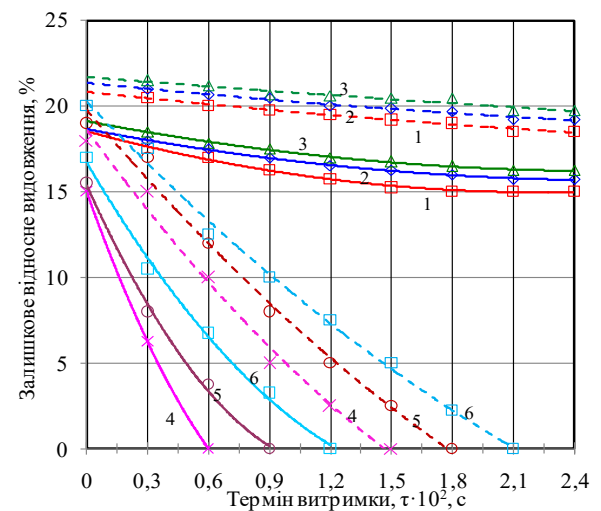


Рисунок 2 – Залежність залишкового відносного видовження ($I_{зал}$) від тривалості витримки (τ) полімерних композицій 1 – 6

--- для (СКС – 1)

— для (СКС – 2)

Для полімерних композицій з ініціатором [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксид значення теплової деформації більше, а відносне видовження менше ніж для полімерних композицій з ініціатором дікумілпероксид. Щеплення біфункціональних кремнійорганічних сполук проходить рівномірніше у разі використання ініціатору [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксиду. Що призводить до підвищення ступеню зшивання.

Висновки. На процес структурування поліолефінів біфункціональними кремнійорганічними сполуками суттєво впливають ініціатори щеплення.

Значення фракції гелю значно підвищується (60-78 %) за умови використання ініціатору [1,3-феніленбіс(1-метилетиліден)]біс[третбутил]пероксиду у порівнянні з дікумілпероксидом для всіх полімерних композицій. Такий характер зміни спостерігається і для показника теплової деформації та залишкового видовження.

Список літератури.

1. Чулеєва О.В. Золотарьов В.М. Здатна до зшивання композиція. – Патент України на винахід № 84011//Бюл.№ 17. – 2008.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання 3-тє, перероблене і доповнене. Мінпалівернерго України, 2010 – 736 с.
3. Isac, Sheela Silane Grafting of Polyethylenes / Sheela Isac, K.E.George.// International Journal of Polymeric Materials.- 2005.- Vol. 54.- P. 397-413.
4. Yussuf A.A, Kosior E, Alban L, Silane grafting and crosslinking of metallo- cene-catalysed LLDPE and LDPE/ A.A. Yussuf, E. Kosior, L. Alban // Malaysian Polym. J.-2007.- Vol.2, №2.-PP.58-71.
5. Sengupta, Saurav S. Comparative Analysis of Radical-Mediated Polyethylene Modifications: Vinyltriethoxysilane Versus Mercaptopropyltriethoxysilane Addition /Saurav S. Sengupta, J. Scott Parent // Polym. Eng. and Sci.-2006. – Vol. 46.- PP.480-485.
6. Azizi H. Silane crosslinking of polyethylene: the effects of EVA, ATH and Sb₂O₃ on properties of the production in continuous grafting of LDPE / H. Azizi, J. Barzin, J. Morshedian // eXPRESS Polymer Letters. – 2007. – Vol. 1, №6. – PP. 378 – 384.
7. Morshedian, J Silane grafting of polyethylene: Effect of molecular structure, physical form, blending, and antioxidants/ J. Morshedian, P.M. Hosein-pour // e-Polymers.-2009.- Vol. 9, №1, PP. 278–294
8. Композиції поліолефінові здатні до зшивання. Закономірності процесу гідролітичної поліконденсації / О.В. Чулеєва, В.М. Золотарьов, В.О. Пахаренко, Л.Г. Василець // Вісник КНУТД. – 2010. – № 4. – С. 166-174.
9. Чулеєва Е.В. Сшиваемые композиции полиолефинов, не поддерживающие горение. Кинетика сшивания, реологические и теплофизические свойства / Е.В. Чулеєва, В.М. Золотарьов // Пластические массы. – 2015. – № 9-10. – С. 10-14.
10. Селихов Н.А. Антипирены: современные технологические аспекты производств и применения, анализ рыночной конъюнктуры. Черкассы, 2007. – 57 с.
11. ISO 10147:2011 – Pipes and fitting made of cross-linked polyethylene (PE - X) Estimation of determination of the gel content.
12. EN60811-507:2012 Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 507: Mechanical tests – Hot set test for cross-linked materials.
13. Мышковский В.И. Каучук и резина / В.И. Мышковский, З.Н. Нудельман, В.Л. Антоновский– 1980, № 10, с.20.

References (transliterated)

1. Chulva O.V. Zolotarov V.M. Zdatna do zshivannya kompoziciya [Stitchable composition.] - Patent of Ukraine for wine number 84011 // Bul.№ 17. - 2008.
2. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Vidannya 3-tye, pereroblene i dopovnene [Rules of arrangement of electrical installations. Edition 3, revised and supplemented]. Minpalivenergo Ukraine, 2010 - 736 p.
3. Isac, Sheela Silane Grafting of Polyethylenes / Sheela Isac, K.E.George.// International Journal of Polymeric Materials.- 2005.- Vol. 54.- P. 397-413.
4. Yussuf A.A., Kosior E, Alban L, Silane grafting and crosslinking of metallo-cene-catalysed LLDPE and LDPE / A.A. Yussuf, E. Kosior, L. Alban // Malaysian Polym. J.-2007. - Vol.2, No.2.-PP.58-71.
5. Sengupta, Saurav S. Comparative Analysis of Radical-Mediated Polyethylene Modi cations: Vinyltriethoxysilane Versus Mercaptopropyltriethoxysilane Addition / Saurav S. Sengupta, J. Scott Parent // Polym. Eng. and Sci.-2006. - Vol. 46.- PP.480-485.
6. Azizi H. Silane crosslinking of polyethylene: the effect of EVA, ATH and Sb₂O₃ on LDPE / H. Azizi, J. Barzin, J. Morshedian // eXPRESS Polymer Letters. - 2007. - Vol. 1, No. 6. - pp. 378-384.
7. Morshedian, J. Silane grading of polyethylene: Effect of molecular structure, blending, and antioxidants / J. Morshedian, P.M. Hosein-pour // e-Polymers.-2009. - Vol. 9, No. 1, PP. 278–294
8. Chuleeva O.V. Kompoziciyi poliolefinovi zdatni do zshivannya. Zakonomirnosti procesu gidrolitichnoyi polikondensaciyi [Polyolefin compositions capable of crosslinking. Patterns hydrolytic polycondensation process]/ O.V. Chulu, V.M. Zolotarov, V.O. Pakharenko, L.G. Vasilets // Visnyk KNUVD. - 2010. - № 4. - p. 166-174.
9. Chuleeva E.V. Sshivaemye kompozicii poliolefinov, ne podderzhivayushie gorenje. Kinetika sshivaniya, reologicheskie i teplofizicheskie svoystv [Stitched polyolefin compositions that do not support combustion. Crosslinking kinetics, rheological and thermal properties] / E.V. Chuleeva, V.M. Zolotarov // Plastics. - 2015. - № 9-10. - S. 10-14.
10. Selikhov N.A. Antipireny: sovremennye tehnologicheskie aspekty proizvodstv i primeneniya, analiz rynochnoy konyunktury [Flame retardants: modern technological aspects of production and application, analysis of market conditions]. Cherkasy, 2007. - 57 p.
11. ISO 10147: 2011 - Pipes and fittings made of cross-linked polyethylene (PE-X).
12. EN60811-507: 2012 Electric and optical fiber cables - Test methods for non-metallic materials - Part 507: Mechanical tests - Hot set test for cross-linked materials.
13. Myshkovsky V.I. Kauchuk i rezina [caoutchouc and rubber] / V.I. Myshkovsky, Z.N. Nudelman, V.L. Antonovsky, 1980, № 10, p.20.

Надійшла(received) 04.07.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чулеєва Олена Володимирівна (Чулеєва Елена Владимировна, Chulieieva 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

Золотарьов Володимир Михайлович(Золотарев Владимир Михайлович, Zolotaryov Volodymyr) – доктор технічних наук, Генеральний директор, приватне акціонерне товариство «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3886-4993>; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

УДК 621.319

*А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ, И. А. МИРЧУК***ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СУДОВЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ ОХЛАЖДЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

На современных судах с увеличением степени электрооборудования увеличивается число и сечение кабелей судовых сетей, что требует значительной площади для их прокладки. По сравнению с кабелями общепромышленного назначения судовые силовые кабели должны обеспечивать допустимую рабочую температуру токопроводящей жилы до 85 °С, что позволяет повысить на (25–30)% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах. Рассеиваемая тепловая мощность в окружающую среду при протекании номинального тока по токопроводящей жиле существенным образом зависит от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их толщины, температуры воздуха, условий охлаждения. Сформулирована задача оптимизации конструкции силового судового кабеля для обеспечения максимальной плотности теплового потока при фиксированной толщине (массе) полимерной изоляции. Приведены результаты оптимизации при варьировании толщины защитной полимерной оболочки. Представленная методика оптимизации конструкции одножильного силового кабеля по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду может быть применена для кабелей бортовых систем, эксплуатирующихся в экстремальных условиях. Показана эффективность применения полимерных материалов с более высокими значениями коэффициента теплопроводности для защитной оболочки кабелей специального назначения.

Ключевые слова: судовые кабели, токовая нагрузка, линейная плотность теплового потока, целевая функция, толщина защитной полимерной оболочки, коэффициент теплопроводности, тепловое сопротивление, экстремальные условия, бортовые системы.

*Г. В. БЕЗПРОЗВАННИХ, І. А. МИРЧУК***ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ СУДНОВИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ЗА УМОВАМИ ОХОЛОДЖЕННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

На сучасних судах зі збільшенням ступеня електрообладнання збільшується число і перетин кабелів суднових мереж, що вимагає значної площі для їх прокладання. У порівнянні з кабелями загальнопромислового призначення суднові силові кабелі повинні забезпечувати допустиму робочу температуру струмопровідної жили до 85 °С, що дозволяє підвищити на (25-30)% струмове навантаження при оптимальних масогабаритних розмірах. Теплова потужність, що розсіюється в навколишнє середовище при протіканні номінального струму по струмопровідній жилі, істотно залежить від теплофізичних властивостей полімерних матеріалів ізоляції та захисної оболонки, їх товщини, температури повітря, умов охолодження. Сформульовано задачу оптимізації конструкції силового суднового кабелю для забезпечення максимальної щільності теплового потоку при фіксованій товщині (масі) полімерної ізоляції. Наведено результати оптимізації при варіюванні товщини захисної полімерної оболонки. Представлена методика оптимізації конструкції одножильного силового кабелю за умови забезпечення максимального розсіювання потужності теплового потоку в навколишнє середовище може бути застосована для кабелів бортових систем, що експлуатуються в екстремальних умовах. Показана ефективність застосування полімерних матеріалів з більш високими значеннями коефіцієнта теплопровідності для захисної оболонки кабелів спеціального призначення.

Ключові слова: суднові кабелі, струмове навантаження, лінійна щільність теплового потоку, цільова функція, товщина захисної полімерної оболонки, коефіцієнт теплопровідності, тепловий опір, екстремальні умови, бортові системи.

*G. V. BEZPROZVANNYCH, I. A. MIRCHUK***OPTIMIZATION OF DESIGN OF SHIP POWER CABLES WITH CONDITIONS OF COOLING IN OPERATION**

On modern ships, with an increase in the degree of electrical equipment, the number and cross-section of cables of ship networks increases, which requires a considerable area for their installation. Compared with cables for general industrial use, ship power cables should provide the allowable operating temperature of the conductive core to 85 °C, which allows increasing the allowable current load by (25–30)% at optimal weight and dimensions. The dissipated thermal power to the environment when the rated current flows through the conductive core is significantly dependent on the thermo physical properties of the insulation materials and the polymer protective sheath, their thickness, air temperature, cooling conditions. The task of optimizing the design of the power ship's cable is formulated to ensure maximum heat flow with a fixed thickness (mass) of polymer insulation. The optimization results for varying the thickness of the protective polymer shell are given. The proposed method of optimizing the design of a single-conductor power cable according to the conditions for ensuring the maximum dissipation of heat flow power into the environment can be applied to cables of onboard systems operating in extreme conditions. The efficiency of the use of polymeric materials with higher values of thermal conductivity for the protective sheath of special-purpose cables is shown.

Keywords: ship cables, current load, linear heat flux density, objective function, protective polymer shell thickness, thermal conductivity coefficient, thermal resistance, extreme conditions, onboard systems.

Введение. На современных судах с увеличением степени электрооборудования увеличивается число и сечение кабелей судовых сетей, что требует значительной площади для их прокладки. Масса кабелей, входящих в бортовую сеть, может достигать 1/3 от общей массы всего судового электрооборудования [1-3].

Кабели на борту судов часто подвергаются экстремальным условиям. Конструкция и материалы должны быть специально предназначены для решения этих сложных задач. Силовые судовые кабели используются для подвода электроэнергии от автономных электроэнергетических установок (дизель-генераторы, аккумуляторные и солнечные

© А. В. Беспрозванных, И. А. Мирчук, 2019

батареи) к исполнительным агрегатам (всевозможного рода электродвигателям и устройствам автоматики), для обеспечения освещения, как внутреннего, так и внешнего, для питания холодильных установок, кондиционеров, нагревателей и др.

Конструкция силовых судовых кабелей должна обеспечивать функционирование систем, в которых они используются, при всем диапазоне возможных условий эксплуатации, если обеспечивается электромагнитная совместимость.

По сравнению с существующими кабелями современные судовые силовые кабели должны обеспечивать допустимую рабочую температуру токопроводящей жилы до 85 °С [1, 3-6], что позволяет повысить на (25–30)% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах.

Так, силовые судовые кабели на напряжение 3 – 20 кВ, предназначенные для стационарной прокладки в любых условиях на борту судов, изготовленные в соответствии с [5-6] (табл. 1, табл. 2), имеют высокую гибкость и малый радиус изгиба, что дает возможность использовать в условиях ограниченного пространства для монтажа.

При этом кабели не распространяют горение при групповой прокладке в пучках [3-6]. Кабели соответствуют требованиям SOLAS (Международная конвенция по охране человеческой жизни на море). Изоляция и защитная полимерная оболочка кабелей не содержат галогены и не распространяют горение: пожарная безопасность на борту судов имеет первостепенное значение. Огонь, дым, выбросы токсичных газов могут создать потенциальную и реальную угрозу для жизни и оборудования: риск взрывоопасности возрастает в малых и замкнутых пространствах (рис. 1).

Таблица 1 – Расчетные данные судовых силовых кабелей на напряжение 1,8/3,0 кВ

Сечение, токопроводящей жилы, мм ²	Номинальный ток при прокладке на открытом воздухе, (А)	Наружный диаметр (мм)			Масса, (кг/км)
		мин.	ном.	макс.	
1 x 25	127	15,0	16,0	17,5	550
1 x 35	157	15,0	17,0	10,5	680
1 x 50	196	17,5	10,0	19,5	830
1 x 70	242	19,0	19,3	21,5	1 050
1 x 95	293	22,0	22,3	24,5	1 380
1 x 120	339	23,5	24,5	26,5	1 650
1 x 150	389	25,0	26,2	20,0	1 980
1 x 185	444	27,5	28,6	30,5	2 390
1 x 240	522	31,0	32,3	34,5	3 000
1 x 300	601	33,0	34,5	36,5	3 620
3 x 25	89	20,0	29,0	31,0	1 650
3 x 35	110	30,0	31,2	33,5	2 030
3 x 50	137	33,0	34,0	36,5	2 650
3 x 70	169	35,5	37,7	40,5	3 450
3 x 95	205	40,5	42,2	45,0	4 500
3 x 120	237	44,0	45,3	49,0	5 400
3 x 150	273	47,5	49,0	52,0	6 550

Таблица 2 – Расчетные данные судовых силовых кабелей на напряжение 6,0/10,0 кВ

Сечение, мм ²	Номинальный ток при прокладке на открытом воздухе, (А)	Наружный диаметр (мм)			Масса, (кг/км)
		мин.	ном.	макс.	
1 x 25	127	22,0	23,0	24,5	850
1 x 35	157	23,0	24,0	26,0	980
1 x 50	196	24,0	25,1	27,0	1 160
1 x 70	242	26,0	27,2	29,0	1 140
1 x 95	293	28,0	29,1	31,0	1 750
1 x 120	339	29,5	30,8	33,0	2 040
1 x 150	389	31,0	32,4	34,5	2 380
1 x 185	444	33,0	34,4	36,5	2 810
1 x 240	522	35,5	37,1	39,5	3 420
1 x 300	601	38,0	39,5	42,0	4 140
3 x 25	89	43,0	44,7	47,5	3 210
3 x 35	110	45,5	47,1	50,5	3 700
3 x 50	137	47,5	49,2	52,5	4 320
3 x 70	169	51,5	53,3	56,5	5 280
3 x 95	205	55,5	57,5	61,0	6 430
3 x 120	237	59,5	61,4	65,0	7 530
3 x 150	273	62,5	64,8	69,0	8 720



Рис.1 – Фрагмент трассы кабелей на судне

Совокупность конструктивных особенностей и применяемых материалов судовых силовых кабелей должна обеспечивать комплекс электрических, механических, тепловых характеристик в соответствии с условиями эксплуатации при оптимальных массогабаритных размерах.

Проблема оптимизации конструкции судовых силовых кабелей. Силовые судовые кабели должны

иметь, с одной стороны, меньший вес и диаметр, а с другой, – большие токовые нагрузки. Толщина изоляции силовых судовых кабелей, также как и силовых кабелей общепромышленного назначения, регламентируется стандартами [3-6]. Так, согласно нормам, приведенным в [5], толщина изоляции судовых кабелей на напряжение 1,8/3,0 кВ выбирается из условий обеспечения механической, а не электрической, прочности кабеля, и зависит от материала изоляции (см. табл. 3).

Таблица 3 – Влияние материала изоляции на толщину изоляции судовых силовых кабелей напряжением 1,8/3 кВ [5]

Номинальное сечение жилы, мм ²	Толщина изоляции, мм		
	Этиленпропиленовая резина (EPR S 95)	Твердая этиленпропиленовая резина (HERP)	Сшитый полиэтилен (XLPE)
10	2,2	2,0	2,0
16	2,2	2,0	2,0
25	2,2	2,0	2,0
35	2,2	2,0	2,0
50	2,2	2,0	2,0
70	2,2	2,0	2,0
95	2,4	2,0	2,0
120	2,4	2,0	2,0
150	2,4	2,0	2,0
185	2,4	2,0	2,0
240	2,4	2,0	2,0
300	2,4	2,0	2,0
400	2,6	2,0	2,0
500	2,8	2,2	2,2
630	2,8	2,4	2,4

Толщина наружной полимерной оболочки определяется в зависимости от внутреннего расчетного диаметра D под оболочкой кабеля [5]. Так, толщина оболочки в зависимости от конструктивного исполнения силовых кабелей на напряжение 1,8/3 кВ равна [5]:

а) для небронированных кабелей и бронированных кабелей с одной оболочкой:

$t_1 = 0,04D + 0,8$ мм при минимальной толщине 1,0 мм;

б) для небронированных кабелей с двумя оболочками:

$t_2 = 0,025D + 0,9$ мм при минимальной толщине 1,0 мм

в) для бронированных кабелей с двумя оболочками:

$t_2 = 0,025D + 0,6$ мм при минимальной толщине 0,8 мм, т.е. стандартами устанавливается минимальная толщина. При такой толщине обеспечивается требуемая механическая прочность конструкции кабеля.

Вместе с тем, отдаваемая (рассеиваемая) мощность в окружающую среду (например, в воздух), при протекании номинального тока по токопроводящей жиле, будет существенным образом зависеть от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их

толщины, температуры воздуха, условий охлаждения (естественное либо принудительное).

Целью статьи является оптимизация конструкции силовых судовых кабелей при эксплуатации в закрытом помещении по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду.

Методика расчета теплопередачи в одножильном силовом кабеле коаксиальной конструкции. Расчет теплопередачи в кабеле цилиндрической формы выполняется для установившегося режима, при котором тепловое состояние кабеля стабилизировано, тепловые свойства материалов не меняются во времени.

Для кабеля цилиндрической формы удобно использовать тепловой поток, отнесенный к единице длины цилиндрической стенки – линейную плотность теплового потока q_l . В общем случае линейная плотность теплового потока при теплопередаче через цилиндрическую стенку, состоящую из n слоев разной толщины и с разными теплофизическими свойствами, рассчитывается как [7-8]

$$q_l = \frac{\pi (T_g - T_{os})}{R_{\Sigma}} ; \quad (1)$$

где T_g – температура токопроводящей жилы, нагретой за счет протекания номинального тока I , К; T_{os} – температура окружающей среды – воздуха, К; R_{Σ} – суммарное тепловое сопротивление элементов кабеля и окружающей среды, (К·м)/Вт; q_l – линейный тепловой поток, рассеиваемый кабелем при протекании номинального тока I по жиле, Вт/м.

На рис. 2 показана конструкция силового одножильного коаксиального кабеля: 1 – токопроводящая жила, 2 – изоляция, 3 – металлический экран по изоляции, 4 – защитная полимерная оболочка. В силу больших значений теплопроводности металлов тепловыми сопротивлениями токопроводящей жилы и металлического экрана можно пренебречь: $R_1 = R_3 \approx 0$ [9]. Считаем, что контакт между конструктивными элементами кабеля – совершенный. Температура на соприкасающихся поверхностях соседних слоев одинакова (см. рис. 2, эпюра качественного распределения температуры по слоям).

Общее (суммарное) тепловое сопротивление R_{Σ} определяется как [9-10]

$$R_{\Sigma} = R_2 + R_4 + R_{os} ; \quad (2)$$

где: R_2 – тепловое сопротивление изоляции;

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln\left(\frac{2r_2}{2r_1}\right); \quad (3)$$

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda_4} \ln\left(\frac{2r_4}{2r_3}\right); \quad (4)$$

– тепловое сопротивление полимерной защитной оболочки;

$$R_{os} = \frac{1}{\alpha_{эф} * S_{ts}}; \quad (5)$$

– тепловое сопротивление R_{os} окружающего воздуха.

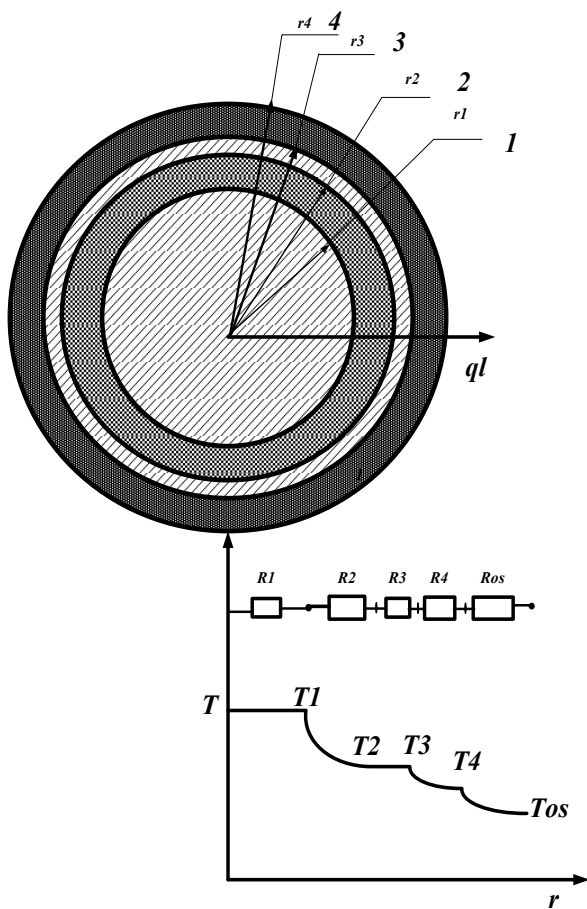


Рис. 2 – Тепловая схема замещения одножильного силового кабеля коаксиальной конструкции

В приведенных формулах (3) – (4) обозначено: λ_2, λ_4 – коэффициенты теплопроводности изоляции и защитной полимерной оболочки; $2r_1, 2r_2 = 2r_1 + 2\Delta_{ins}, 2r_4 = 2r_3 + 2\Delta_j$ $S_{ts} = \pi * (2r_4) * l_{pr}$ – диаметр жилы, диаметр изолированного провода, толщина изоляции, диаметр по полимерной защитной оболочке, диаметр по металлическому экрану, толщина защитной полимерной оболочки, поверхность охлаждения провода длиной l_{pr} соответственно.

Эффективный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду за счет конвекции α_c и излучения α_{rad} определяется на основании [9]: $\alpha_{ef} = \alpha_c + \alpha_{rad}$.

В общем случае коэффициенты теплопроводности являются параметрами, зависящими от температуры. В предположении их постоянства наблюдается *логарифмический* закон изменения температуры по толщине изоляции и защитной полимерной оболочке, т.е. по радиусу (см. рис. 2).

Линейная плотность теплового потока как целевая функция оптимизации конструкции кабеля. Формулировка задачи оптимизации заключается в обеспечении максимального теплового потока при *фиксированной* толщине (массе) полимерной изоляции Δ_{ins} . Другими словами, *целевой функцией* оптимизации является линейная плотность рассеиваемого теплового потока q_l . Варьируемый проектный параметр: толщина Δ_j защитной полимерной оболочки. Следует учитывать определенные *ограничения*, связанные с технологичностью конструкции, ее механической прочностью в эксплуатации. Например, толщина оболочки не должна быть меньше некоторого минимума Δ_{jmin} , приведенного в [5].

Алгоритм поиска оптимума заключается в исследовании зависимости $q_l(\Delta_j)$. При обнаружении максимума его положение определяется обычными способами поиска экстремума [11].

Расчеты показывают, что оптимум существует: зависимость линейного теплового потока от толщины полимерной защитной оболочки имеет максимум (см. рис. 3, кривые 2, 3 и 4). На рис. 3 приведены результаты расчета для изолированного провода (кривая 1) и одножильного экранированного кабеля коаксиальной конструкции (кривые 2, 3 и 4) для температуры медной жилы 85°C при естественной конвекции охлаждающего воздуха температурой 20°C . Эффективный коэффициент теплопередачи равен $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Кривая 1 соответствует изолированному полиэтиленовому проводу с жилой сечением 150 мм^2 при варьировании толщины изоляции Δ_{ins} , т.е. при изменении r_2 ($K=r_2/r_1$). Кривые 2, 3 и 4 – одножильному экранированному кабелю коаксиальной конструкции с жилой сечением 150, 185 и 240 мм^2 соответственно. Толщина изоляции равна 2 мм. Толщина полимерной оболочки Δ_j – варьируется, т.е. при изменении r_4 ($K=r_4/r_1$).

Для изолированного провода оптимальная толщина полиэтиленовой изоляции, соответствующая максимальной рассеиваемой мощности, равна радиусу токопроводящей жилы (см. кривая 1 рис. 3), т.е. 6,9 мм для жилы сечением 150 мм^2 . Для толщины изоляции, равной 2 мм, рассеиваемая мощность составляет всего 25% от максимального значения.

Для кабеля оптимальное значение толщины защитной полимерной оболочки для жилы такого же сечения 150 мм^2 составляет порядка 190 мм, но при таком значении рассеиваемая мощность возрастает в 3,2 раза в сравнении с изолированным проводом.

Однако при этом значимо, в десятки раз, увеличиваются массо-габаритные размеры кабеля.

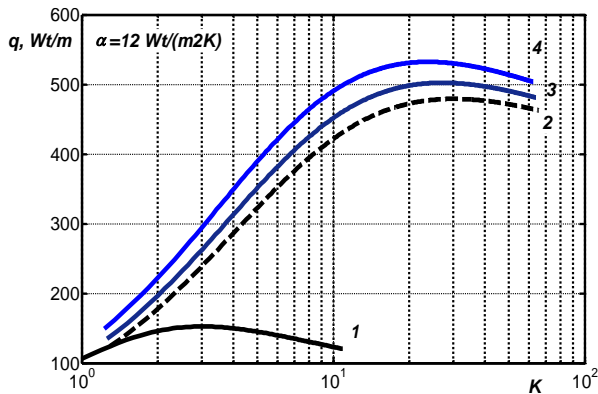


Рис. 3 – К выбору оптимальной толщины защитной полимерной оболочки в силовом судовом кабеле по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду

Для рекомендуемой стандартами [5] минимальной толщины защитной полимерной оболочки, равной 1 мм, линейный тепловой поток существенно уменьшается. Однако остается больше на 30% в сравнении с изолированным проводом при условии одинакового сечения медной жилы, равной 150 мм^2 (сравни кривые 2 и 1 рис. 3). Важно, что при токовой нагрузке 389 А (см. табл. 1) и активном сопротивлении токопроводящей жилы, равном $0,124 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$ при температуре 85°C , выделяемая мощность $P_{\text{выд}} = 389 \cdot 389 \cdot 0,156 \cdot 10^{-3} = 156 \text{ Вт/м}$ соизмерима с рассеиваемой. Другими словами, при такой толщине полимерной защитной оболочки обеспечивается устойчивый тепловой баланс.

Динамика изменения линейной плотности теплового потока от толщины обусловлена характером зависимостей составляющих и суммарного теплового сопротивления (см. рис. 4). Кривые, представленные на рис. 4, соответствуют:

а) для изолированного провода: 1 – для теплового сопротивления изоляции R_2 , 2 – теплоотдачи в окружающую среду R_{os} и 3 – общего теплового сопротивления R_{Σ} ;

б) для кабеля с оболочкой: 1' – для теплового сопротивления изоляции R_2 , 1'' – теплового сопротивления защитной полимерной оболочки R_4 , 2' – теплоотдачи в окружающую среду R_{os} , 3' – общего теплового сопротивления R_{Σ} .

На рис. 5 представлено влияние коэффициента теплопроводности материала защитной полимерной оболочки [12-14] силового судового кабеля при эксплуатации при разной температуре в условиях естественной конвекции. Температура токопроводящей жилы равна 85°C . Кривая 1 – эффективный коэффициент теплопередачи равен $12 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, кривая 2 – $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ для коэффициента теплопроводности оболочки $2,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Кривая 3 – эффективный коэффициент теплопередачи равен $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, кривая 4 – $12 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ для коэффициента теплопроводности оболочки $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Температура окружающего воздуха для 4-х случаев равна 20°C . Кривая 5 – эффективный коэффициент теплопередачи равен $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ для коэффициента теплопроводности полимерной оболочки $10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ и температуре окружающего воздуха 30°C . Разработка и внедрение новых высоконаполненных антипиренами безгалогенных кабельных композиций обеспечивает требуемые значения теплофизических характеристик, в том числе и повышенные значения коэффициента теплопроводности [12-13].

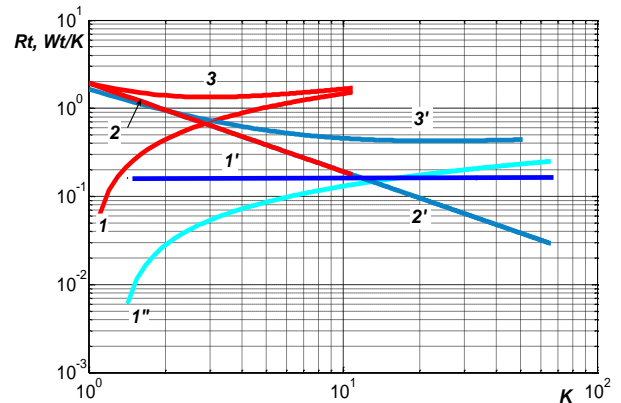


Рис. 4 – Влияние толщины изоляции и полимерной защитной оболочки на тепловое сопротивление изолированного провода и силового одножильного кабеля

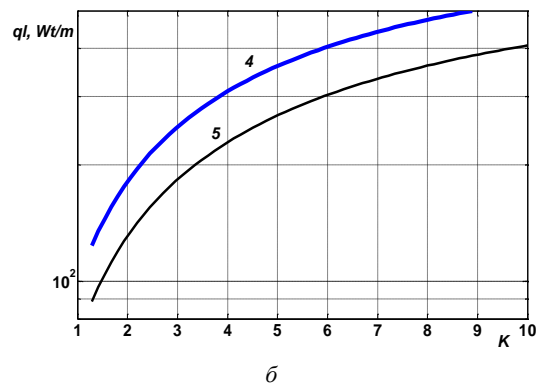
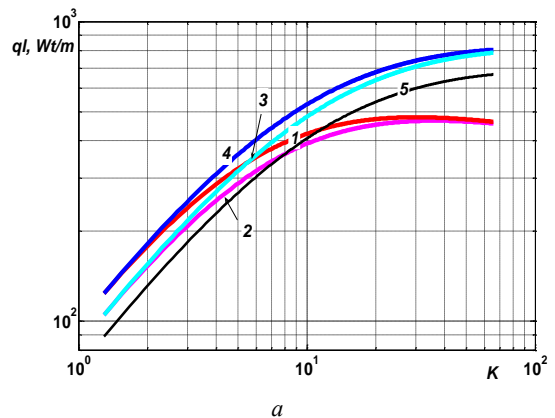


Рис. 5 – Влияние теплофизических характеристик материала защитной оболочки и условий эксплуатации на рассеиваемую тепловую мощность силового судового кабеля с медной токопроводящей жилой сечением 150 мм^2 и полиэтиленовой изоляцией толщиной 2 мм

При минимальной толщине полимерной защитной оболочки увеличение в 4 раза ее коэффициента теплопроводности приводит к росту рассеиваемой кабелем тепловой мощности на 30% (сравни кривые 4 и 5 рис. 5,б).

Выводы. Особенностью современных судовых силовых кабелей является обеспечение допустимой рабочей температуры токопроводящей жилы до 85 °С, что позволяет повысить на 25–30% допустимую токовую нагрузку при оптимальных массогабаритных размерах. Увеличенные токовые нагрузки обуславливают повышение эффективности рассеивания тепловой мощности в окружающую среду, что существенным образом зависит как от теплофизических свойств материалов изоляции и полимерной защитной оболочки, их толщины, так и температуры окружающего воздуха, условий охлаждения.

Сформулирована задача оптимизации конструкции силового судового кабеля для обеспечения максимальной плотности теплового потока при фиксированной толщине (массе) полимерной изоляции.

Приведены результаты оптимизации при варьировании толщины защитной полимерной оболочки. Показано, что для рекомендуемой стандартами минимальной толщины защитной полимерной оболочки силовых кабелей напряжением 1,8/3 кВ линейная плотность теплового потока существенно уменьшается, но остается больше на 30% в сравнении с изолированным проводом при условии одинакового сечения жилы.

Представленная методика расчета оптимальной толщины защитной полимерной оболочки силового судового кабеля по условиям обеспечения максимального рассеивания мощности теплового потока в окружающую среду может быть применена для оптимизации конструкции и других кабелей бортовых систем, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

Показана эффективность применения полимерных материалов с более высокими значениями коэффициента теплопроводности для защитной оболочки кабелей специального назначения.

Список литературы:

1. Мирчук И.А., Беспрозванных А.В. Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей / Вісник НТУ ХПІ. Енергетика: надійність та енергоефективність. - 2017. - № 31. - с. 52 – 58.
2. Беспрозванных А.В., Мирчук И.А. Оценка возможности нормальной эксплуатации кабелей на основе витых пар в поливинилхлоридной защитной оболочке в условиях повышенной влажности и температуры. // Електротехніка і Електромеханіка. - 2017. - № 5. - с.51 – 56. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.08>.
3. ТУ У 31.3–00217099–009–2003 Кабели судовые. Технические условия.
4. IEC 60092 – 351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. – 20 p.

5. IEC 60092-353: Electrical installation in ships – Part: 353. Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4,0. 2016 – 09. - 46 p.

6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0, 2014. – 54 p.

7. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учебн. заведений / В.М.Леонов, И.Б.Пешков, И.Б.Рязанов, С.Д.Холодный. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.

8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.

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

10. IEC 60287-2-1:1994 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance.

11. Беспрозванных А.В., Золотарев В.М., Антопец Ю.А. Влияние толщины изоляции защищенных проводов высоковольтных ЛЭП на их пропускную способность по току. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. - № 2. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.07>.

12. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2011. – 416 стр.

13. Maziyar Sabet, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, Chantara Theyy Ratnam Thermal characterization of alumina trihydrate (ATH) and flammability studies of ATH filled low density polyethylene. Journal of industrial technology. Vol. 18(1), 2009, p. 83-93.

14. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Influence of technological dose of radiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires / Problems of atomic science and technology. – 2018. - №5. – Pp. 40-44. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/147697>.

References:

1. Mirchuk I.A., Bezprozvannykh G.V. Obosnovanie optimalnoy dlitelno dopustimoy rabochey temperatury sovremennykh polimernykh izolyatsionnykh kompozitsiy sudovykh kabelej [The rationale for the optimal long-term operating temperature of modern polymeric insulating compositions of ship cables] / Bulletin of NTU “KPI”: Energetics: nadinst and energy efficiency, 2017, no 31, pp. 52 – 58.
2. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Ocenka vozmozhnosti normalnoy ekspluatatsii kabelej na osnove vitykh par v polivinilhloridnoy zashitnoj obolochke v usloviyah povyshennoj vlazhnosti i temperatury [The evolution of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs in a PVC sheath in conditions of high humidity and temperature.] / Electrical engineering and Electromechanics. , 2018, no 5, pp. 51 – 56.
3. ТУ У 31.3–00217099–009–2003 Кабели судовые. Технические условия [Ship cables. Technical requirements].
4. IEC 60092 – 351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. – 20 p.
5. IEC 60092-353: Electrical installation in ships – Part: 353. Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4,0. 2016 – 09. - 46 p.
6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0, 2014. – 54 p.
7. Osnovy kabelnoy tekhniki: uchebnik dlya stud. yissh. uchebn. zavedeniy [Fundamentals of cable technology: a textbook for students from higher training institutions] / V.M.Leonov, I.B.Peshkov, I.B. Ryazanov, S.D.Holodnyiy. – М.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. – 432 p.
8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.
9. Bezprozvannykh G.V. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyatsionnykh konstruksiy [Mathematical models and methods for calculating electrical insulating structures] / G.V.Bezprozvannykh, B.G.Naboka // Navchal'niy posibnik. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2012. – 108 p.
10. IEC 60287-2-1:1994 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance.

11. Bezprozvannykh G.V., Zolotaryov V.M., Antonets Yu..A. Vliyaniye tolshiny izolyatsii zashishennykh provodov vysokovoltnykh LEP na ih propusknyuyu sposobnost po toku. [Effect of thickness of insulation of protected wires of high-voltage overhead transmission lines to their current carrying capacity.] / Electrical engineering and Electromechanics, 2018, no 2, pp. 41 – 46.

12. Mihajlin Ju. A. *Тепло-, термо- i ognestojkost' polimernykh materialov* [Heat, thermal and flame resistance of polymeric materials]. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tehnologii Publ., 2011. 416 p.

13. *Mazyiar Sabet, Azman Hassan, Mat Uzir Wahit, Chantara Theyy Ratnam* Thermal characterization of alumina trihydrate (ATH) and flammability studies of ATH filled low density polyethylene. Journal of industrial technology. Vol. 18(1), 2009, p. 83-93.

14. Bezprozvannykh G.V., Mirchuk I.A. Influence of technological dose of radiation on mechanical and electrical characteristics of polymeric insulation of wires / Problems of atomic science and technology, 2018, no 5, pp. 40 – 44.

Поступила (received) 12.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Мірчук Ігор Анатолійович (Мирчук Игорь Анатольевич, Mirchuk Ihor Anatoliyovych)– науковий співробітник приватного акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості»; м. Бердянськ; тел.: (066) 828-85-54; e-mail: garik710@ukr.net.

М. Й. БУРБЕЛО, О. В. СТЕПУРА

ЗАСТОСУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У статті проаналізовані методи виявлення впливу нелінійних несиметричних споживачів на електричні мережі. Недоліком відомих методів виявлення джерел спотворень є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Обґрунтовано доцільність застосування системи узагальнених миттєвих симетричних складових та визначених на їх основі умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії. Показано, що в симетричному режимі узагальнений миттєвий струм зворотної послідовності містить п'яту гармоніку, а в несиметричному – додатково першу гармоніку, що зумовлена несиметрією навантажень. В симетричному режимі струм нульової послідовності містить третю гармоніку, а в несиметричному – першу і третю. Для оцінювання внеску споживачів в погіршення якості електроенергії доцільно використати умовні потужності зворотної та нульової послідовностей. Проаналізована можливість виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) на якість електроенергії трифазних мереж з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності p_{i2}, q_{i2} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм зворотної послідовності, а також миттєвих умовних потужностей нульової послідовності p_{i0}, q_{i0} , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм нульової послідовності. Показано, що за наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей зростають. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин. **Ключові слова:** електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, миттєві струми зворотної та нульової послідовностей, умовні миттєві потужності зворотної та нульової послідовностей, середньоквадратичні та середні значення.

М. И. БУРБЕЛО, А. В. СТЕПУРА

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ИСКАЖАЮЩИХ КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье проанализированы методы выявления влияния нелинейных несимметричных потребителей на электрические сети. Недостатком известных методов выявления источников искажений является то, что они не позволяют различить гармоничные составляющие, которые обуславливают токи обратной и нулевой последовательностей, а также выявить несимметрию нагрузок по обратной и нулевой последовательностям. Обоснована целесообразность применения системы обобщенных мгновенных симметричных составляющих и определенных на их основе условных мощностей обратной и нулевой последовательностей для выявления потребителей, искажающие качество электроэнергии. Показано, что в симметричном режиме обобщенный мгновенный ток обратной последовательности содержит пятую гармонику, а в несимметричной - дополнительно первую гармонику, обусловленную несимметрией нагрузок. В симметричном режиме ток нулевой последовательности содержит третью гармонику, а в несимметричной - первую и третью. Для оценки вклада потребителей в ухудшение качества электроэнергии целесообразно использовать условные мощности обратной и нулевой последовательности. Проанализирована возможность выявления и оценки влияния источников искажений (несимметрии и высших гармоник) на качество электроэнергии трехфазных сетей с использованием мгновенных условных мощностей обратной последовательности p_{i2}, q_{i2} , которые являются произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток обратной последовательности, а также мгновенных условных мощностей нулевой последовательности p_{i0}, q_{i0} , которые являются произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток нулевой последовательности. Показано, что при наличии гармонических искажений среднеквадратичные значения условных мощностей растут. В случае несимметрии нагрузок увеличиваются средние значения этих величин.

Ключевые слова: электрические сети, несимметричные несинусоидальных режимы, мгновенные токи обратной и нулевой последовательностей, условные мгновенные мощности обратной и нулевой последовательностей, среднеквадратичные и средние значения.

M. Y. BURBELO, O. V. STEPURA

APPLICATION OF GENERALIZED SYMMETRIC COMPONENTS FOR THE IDENTIFICATION OF CONSUMERS WHICH MAKE THE QUALITY OF ELECTRICITY

The article analyzes the methods of detecting the influence of nonlinear asymmetric consumers on electrical networks. A disadvantage of known methods for detecting sources of distortion is that they do not distinguish between the harmonic components that cause the currents of reverse and zero sequences, as well as detect the asymmetry of loads on the reverse and zero sequences. The expediency of using the system of generalized instant symmetric components and the based on the conditional capacities of reverse and zero sequences for the detection of consumers that distort electricity quality is substantiated. It is shown that in the symmetric mode the generalized instantaneous reverse current contains the fifth harmonic, and in the asymmetric mode, the first harmonic due to the load asymmetry. In the symmetric mode, the zero sequence current contains the third harmonic, and in the asymmetric mode, the first and third harmonics. To estimate the contribution of consumers to the deterioration of the quality of electricity, it is advisable to use conditional reverse and zero sequencing capacities. The possibility of detecting and evaluating the influence of distortion sources (asymmetry and higher harmonics) on the electric power quality of three-phase networks using instantaneous inverse sequence capacities p_{i2}, q_{i2} , which are the product of instantaneous sequences of direct sequences in reverse sequences, is also p_{i0}, q_{i0} , which are the product of instantaneous direct-sequence voltage to zero-sequence current. It is shown that, in the presence of harmonic distortions, the rms values of the conditional capacities increase. In the case of load asymmetries, the average values of these values increase.

Keywords: electrical networks, asymmetric non-sinusoidal modes, instantaneous currents of reverse and zero sequences, conditional instantaneous capacities of reverse and zero sequences, root mean square and average values.

Вступ. Для експериментального визначення відповідальності споживачів за погіршення якості електроенергії (ЯЕ) без їх вимкнення одним з перших був запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для s -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та n -ї гармонічної складової (ГС) на межі балансової належності, згідно з яким вважають, що окрім основного потоку енергії з мережі до навантаження, що визначається симетричною складовою прямої послідовності основної гармоніки, для несиметричних та нелінійних навантажень існує вторинний потік енергії, який направлений в електричну мережу, що зумовлений симетричними складовими зворотної та нульової послідовностей промислової частоти та вищими гармоніками [1, 2].

Якщо складники активної та реактивної потужностей s -ї послідовності n -ї гармоніки від'ємні, то вони направлені від споживача в мережу (від джерела спотворення) і споживачі повинні нести відповідальність за зниження показників ЯЕ.

В [3, 4] доведено, що активну потужність n -ї ГС не можна використовувати для виявлення джерела спотворення. Це пояснюється тим, що напруга ГС визначається струмами спотворення як системи, так і навантаження в рівній мірі і значення активної потужності не характеризують однозначно внесок споживача в зниження ЯЕ.

Недоліком використання реактивної потужності n -ї гармоніки є неможливість виявлення споживача, що спотворює якість електроенергії у разі, якщо струм спотворення контрольованого споживача менший від сумарного струму спотворення решти споживачів.

Ще одним недоліком використання реактивної потужності n -ї гармоніки є їх відносна малість (десяти, соті частки відсотка від потужності основної гармоніки прямої послідовності). У разі якщо опір мережі малий (жорстка мережа), то спади напруг незначні. Розрахунок реактивної потужності ускладнений через неможливість точно виміряти амплітуди і початкові фази напруг вищих гармонік.

Авторами [5] пропонується для виявлення нелінійних споживачів використати порівняння реактивної потужності на основній гармоніці $Q_1 = U_{(1)} I_{(1)} \sin \varphi_{(1)}$, реактивної потужності за С. Фрізе $Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$ та реактивної потужності за Д. Шароном $Q_S = U \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 \sin^2 \varphi_{(n)}}$, де S, P, U – повна і активна

потужності та середньоквадратична напруга. Метод базується на тому, що для випадку синусоїдних струму та напруги всі три значення Q_1 , Q_F та Q_S будуть рівні, а для нелінійного навантаження – різними. Причому, Q_1 буде мінімальною, а Q_F буде мати максимальне значення. Реактивна потужність Q_S буде знаходитися між Q_1 та Q_F . Причому, у випадку несинусоїдної напруги та лінійного навантаження, Q_S має значення, яке близьке до Q_1 . В протилежному випадку, коли напруга синусоїдна і навантаження нелінійне, Q_S має значення, близьке до Q_F , через більші спотворення

струму, споживаного нелінійним навантаженням. У випадку несинусоїдної напруги та нелінійного навантаження значення Q_S буде мати середнє значення між Q_1 та Q_F .

В [6, 7] запропоновано метод, що заснований на потужностей спотворення $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$, $D_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2}$ та $D_e = \sqrt{S^2 - P_e^2 - Q_e^2}$, де P_e, Q_e – ефективні активна та реактивна потужності: $P_e = \sqrt{P_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}$; $Q_e = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}$.

В [8] запропоновано використовувати напрямки і значення потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм n -ї ГС. Обґрунтування такого підходу основане на тому, що струм n -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача.

Недоліком усіх методів є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

Мета роботи полягає у використанні миттєвих симетричних складових напруг і струмів та миттєвих потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, та у використанні нових методів визначення участі суб'єктів у відповідальності за порушення вимог до ЯЕ в автоматизованих системах контролю й обліку електроспоживання [9, 10].

Обґрунтування результатів. В теорії електричних машин використовуються лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів [11]:

$$f_p(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t + T/3) + \tilde{f}_C(t + 2T/3)); \quad (1)$$

$$f_n(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t - T/3) + \tilde{f}_C(t - 2T/3)); \quad (2)$$

$$f_0(t) = \frac{1}{3}(f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)), \quad (3)$$

де $f_p(t)$, $f_n(t)$, $f_0(t)$ – миттєві напруга або струм прямої, зворотної та нульової послідовностей; $\tilde{f}_k(t) = f_k(t) - f_0(t)$, $k = \{A, B, C\}$ – миттєві фазні напруги або струми за виключенням напруги або струму нульової послідовності; T – період напруги живлення основної частоти.

Перетворення (1),..., (3) в [12] названі узагальненими симетричними складовими, де також розглянуто їх особливості. Зокрема, в [12] показано, що в періодичних несинусоїдних режимах $\begin{bmatrix} f_A(t) \\ f_B(t) \\ f_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_p(t) + f_n(t) + f_0(t) + f_{rA}(t) \\ f_p(t - T/3) + f_n(t + T/3) + f_0(t) + f_{rB}(t) \\ f_p(t - 2T/3) + f_n(t + 2T/3) + f_0(t) + f_{rC}(t) \end{bmatrix}$, (4) де $f_{rk}(t)$, $k = \{A, B, C\}$ – залишкові складові напруг і струмів, для визначення яких використовують формулу [2]:

$$\begin{bmatrix} f_{rA}(t) \\ f_{rB}(t) \\ f_{rC}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_A(t + T/3) + \tilde{f}_A(t + 2T/3) \\ \tilde{f}_B(t) + \tilde{f}_B(t + T/3) + \tilde{f}_B(t + 2T/3) \\ \tilde{f}_C(t) + \tilde{f}_C(t + T/3) + \tilde{f}_C(t + 2T/3) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В [13-15] використано такі лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) - f'_\beta(t)), \quad (6)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) + f'_\beta(t)), \quad (7)$$

де $f_1(t)$, $f_2(t)$ – миттєві напруга або струм прямої та зворотної послідовності; $f_\alpha(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(2f_A(t) - f_B(t) - f_C(t))$, $f'_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(f'_B(t) - f'_C(t))$ – миттєві напруга або струм в системі $\alpha\beta$ -координат; штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув усіх гармонік миттєвих величин на -90 ел. градусів.

Оскільки перетворення (6), (7) є достатньо складними в реалізації, то їх можна замінити наближеними виразами:

$$f_1(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) - f_\beta(t - T/4)); \quad (8)$$

$$f_2(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) + f_\beta(t - T/4)), \quad (9)$$

$$\text{де } f_\beta(t - T/4) = \frac{1}{\sqrt{2}}(f_B(t - T/4) - f_C(t - T/4)).$$

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки струмів фаз: $i_k = \sqrt{2}I_k(\sin \omega t + 0,01 \sin 3\omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$, ($k = A, B, C$), що характерно для розподільних мереж за наявності випрямлячів. Потужність навантаження на основній гармоніці становить: $P_1 = 111,4 \text{ кВт}$, $Q_1 = 63,3 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$. В несиметричному режимі струм фази C на 10% менший від струму інших фаз.

На рис. 1 зображено залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, а також залишкової складової за симетричного навантаження, а на рис. 2 – за несиметричного навантаження.

В обох режимах струми $i_1(t)$ та $i_p(t)$ відрізняються незначно. Струм $i_1(t)$ містить першу та сьому гармоніки, а $i_p(t)$ – першу, п'яту та сьому гармоніки.

В симетричному режимі узагальнений миттєвий струм зворотної послідовності $i_2(t)$ містить п'яту гармоніку, а струм $i_n(t)$ – відсутній. За несиметричного режиму узагальнені миттєві струми $i_2(t)$, $i_n(t)$ містять додатково струми першої гармоніки, що зумовлені несиметрією навантажень.

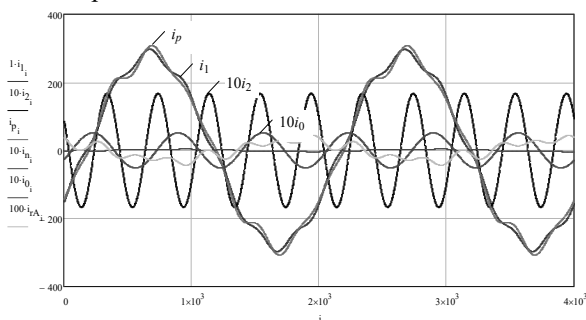


Рис. 1 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за симетричних струмів фаз

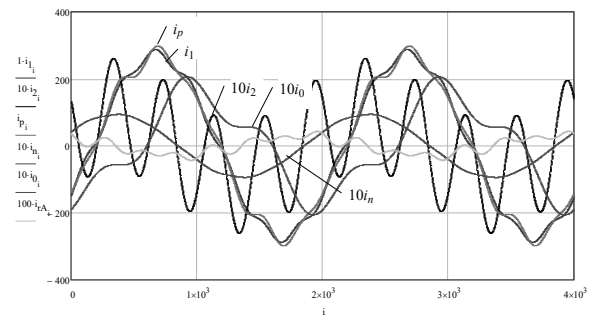


Рис. 2 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за несиметричних струмів фаз

В симетричному режимі струм нульової послідовності $i_0(t)$ містить третю гармоніку, а в несиметричному – першу і третю.

З теоретичної електротехніки відомо, що струми першої, четвертої, сьомої, ... гармонік утворюють пряму послідовність, струми другої, п'ятої, восьмої, ... гармонік – зворотну послідовність, третьої, шостої, дев'ятої, ... гармонік – нульову послідовність. З цієї точки зору перетворення (6), (7) краще відповідають терміну «узагальнені симетричні складові» ніж перетворення (1), (2).

Для оцінювання внеску споживачів в погіршення якості електроенергії доцільно використати умовні потужності зворотної та нульової послідовностей [5]. Розглянемо залежності миттєвих потужностей зворотної послідовності $p_{i_2} = 3u_1 i_2$, $q_{i_2} = 3u_1' i_2$ за симетричного навантаження (рис. 3). Середньоквадратичні значення цих потужностей: $P_{ски_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{ски_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

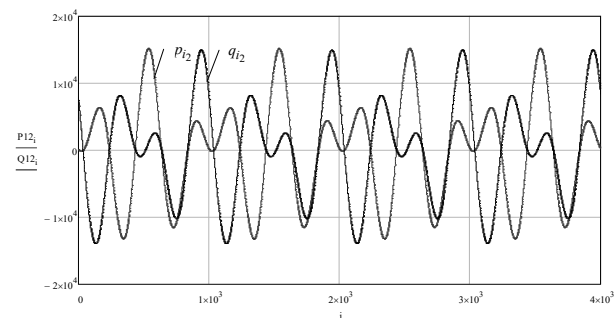


Рис. 3 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за симетричних струмів фаз

За несиметричного навантаження (рис. 4) з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями: $P_{i_2} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{i_2} = -2,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за зворотною послідовністю основної гармоніки. Середньоквадратичні значення потужностей дещо збільшилися: $P_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{ски_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

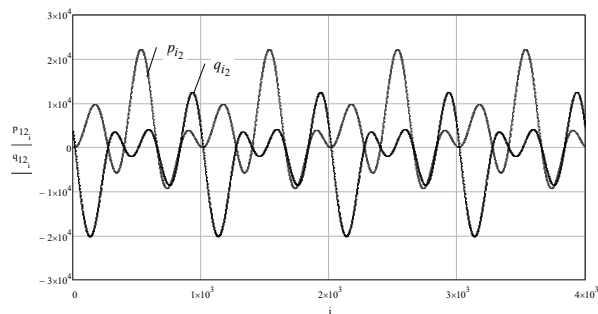


Рис. 4 – Залежності p_{i_2} та q_{i_2} за несиметричних струмів фаз

Розглянемо залежності миттєвих потужностей нульової послідовності $p_{i_0} = 3u_1 i_0$, $q_{i_0} = 3u_1' i_0$ за симетричного навантаження (рис. 5). Середньоквадратичні значення цих потужностей: $P_{скі_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{скі_0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

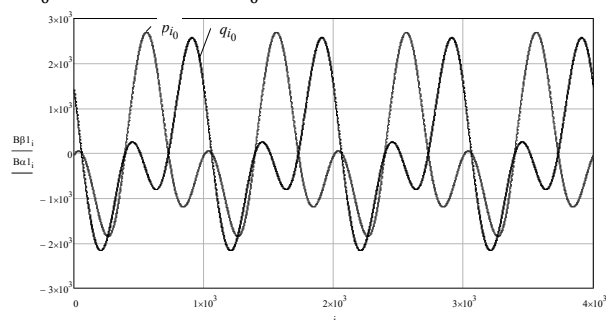


Рис. 5 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за симетричних струмів фаз

За несиметричного навантаження (рис. 6) з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями: $P_{i_0} = 0 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{i_0} = -4,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за нульовою послідовністю.

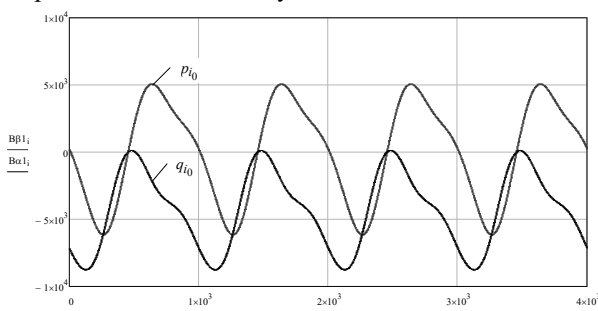


Рис. 6 – Залежності p_{i_0} та q_{i_0} за несиметричних струмів фаз

Середньоквадратичні значення значно збільшилися: $P_{скі_0} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $Q_{скі_0} = 2,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Змінився також характер коливань. Якщо раніше переважали коливання з чотирикратною частотою, то тепер – з подвійною частотою відносно промислової частоти мережі. Це пояснюється тим, що в несиметричному режимі в струмі нульової послідовності переважає основна гармоніка (див. рис. 2).

Висновки.

1. Для виявлення нелінійних несиметричних споживачів доцільно використовувати струм $i_2(t)$, який характеризує несиметрію навантажень за основною гармонікою та несинусоїдність, що зумовлена наявністю гармонік, які утворюють зворотну послідовність.

2. Для оцінювання несиметричності споживачів доцільно використовувати середні значення умовних потужностей P_{i_2} , Q_{i_2} , P_{i_0} , Q_{i_0} , які однозначно характеризують несиметрію струмів фаз за основною гармонікою.

3. Для оцінювання внеску споживачів в спотворення синусоїдної форми напруги доцільно використовувати середньоквадратичні значення умовних потужностей: $P_{скі_2}$, $Q_{скі_2}$, $P_{скі_0}$, $Q_{скі_0}$.

Список використаних джерел

1. Зыкин Ф. А. Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии / Ф. А. Зыкин // *Электричество*, 1987. № 12, с. 5–9.
2. Зыкин Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ф. А. Зыкин // *Электричество*, 1992. № 11, с. 13–19.
3. Крайчик Ю. С. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ю. С. Крайчик, В. Н. Никифорова // *Электричество*, 1993. № 11, с. 72–74.
4. Сендерович, Г. А. Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії / Г. А. Сендерович, автореферат дис. докт. техн. наук, Донецьк, 2012.
5. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. vol. 22, July. – pp. 1782–1789.
6. Stevanović D. A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system / D. Stevanović, P. Petković // *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 3–14. Index 330930, ISSN 0860-8229
7. Stevanović D. A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters / D. Stevanović, P. Petković // *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165–174.
8. Смирнов С. С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С. С. Смирнов. - Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
9. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії / Гриб О. Г., Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркін А. Ф., Новський В. О., Калінік В. П., Красінський О. Л., Довгалою О. М., Светелік О. Д.; під ред. Гриба О. Г. – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.
10. 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
11. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
12. Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals / P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – pp. 9–15
13. Бурбело М. Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // *Технічна електродинаміка* – 2015. – № 4. – С. 71–75.
14. Бурбело М. Й. Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, О. В. Степура // *Технічна електродинаміка*. – 2019. – № 1. – С. 42–49.
15. Бурбело М. Й. Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі / М. Й. Бурбело, О. В. Степура // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2019. – № 1. – С. 24–30.

References (transliterated)

1. Zykin F.A. Energeticheskiye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya s nagruzkami, ukhudshayushchimi kachestvo elektroenergii / F. A. Zykin // *Elektrichestvo*, 1987. № 12, s. 5-9.
2. Zykin F.A. Opredeleniye stepeni uchastiya nagruzkov v snizheniye kachestva elektroenergii / F. A. Zykin // *Elektrichestvo*, 1992. № 11, s. 13-19.
3. Kraychik YU. S. Opredeleniye stepeni uchastiya nagruzkov v snizheniye kachestva elektroenergii / YU.S. Kraychik, V. N. Nikiforova // *Elektrichestvo*, № 11, s. 72-74. 1993.
4. Senderovych, H. A. Vyznachennya chastkovoyi uchastyia sub'yektiv u porushenni yakosti elektrychnoyi enerhiyi / H. A. Senderovych, avtoreferat dys. dokt. tekhn. nauk, Donets'k, 2012.
5. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. vol. 22, July. – pp. 1782-1789.
6. Stevanović D. A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system / D. Stevanović, P. Petković // *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 3–14. Index 330930, ISSN 0860-8229
7. Stevanović D. A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters / D. Stevanović, P. Petković // *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165-174.
8. Smimov S. S. Vysshieye garmoniki v setyakh vysokogo napryazheniya / S. S. Smimov. - Novosibirsk: Nauka, 2010. - 327 s.
9. Avtomatyzovani systemy obliku ta yakostielektrychnoienerhi i/ Hryb O. H., Prakhovnyk A. V., TesykYu. F., Zharkin A. F., Novskiy V. O., Kalintsyk V. P., Krasinskyi O. L., Dovhaliuk O. M., Svetelik O. D.; pid red. Hryba O. H. – Kharkiv: PP «Ranok-NT», 2012. – 516 s.
10. 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
11. Vazhnov, A. I. Perekhodny'e protsessy` v mashinakh peremennogo toka / A. I. Vazhnov. – L.: E`nergiia, 1980. – 256 s.
12. Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals / P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – pp. 9–15
13. Burbelo M. G. Vyznachennia potuzhnosti` za nesimetrichnikh rezhimiv trifaznykh merezh iz zazemlenoiu nei`tralliu / M. G. Burbelo, S. M. Mel`nichuk // *Tekhnichna elektrodinamika* – 2015. – № 4. – S. 71–75.
14. Burbelo M. G. Vyznachennia pul`suiuchoi potuzhnosti v nesimetrichnikh nesinusoidnykh rezhimakh elektrichnykh merezh / M. G. Burbelo, A. V. Gadai`, O. V. Stepura // *Tekhnichna elektrodinamika*. – 2019. – № 1. – S. 42-49.
15. Burbelo M. G. Otciniuvannia vplivu nelinii`nykh nesimetrichnykh navantazhen` na niz`kovol`tni elektrichni merezhi / M. G. Burbelo, O. V. Stepura // *VisnikVinnitc`kogo politekhnichnogo institutu*. – 2019. – № 1. – S. 24-30.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Бурбело Михайло Йосипович¹ (*Бурбело Михаил Иосифович, Burbelo Mikael*) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, 21021, Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

Степура Олександр Васильович² (*Степура Александр Васильевич, Stepura Oleksandr Vasylovich*), ТОВ ІТЦ "Енергооблік", Вінниця, вул. Пирогова, 151А, офіс 23-29

ЗМІСТ

<i>Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Рудевич Н. В.</i> Контекстний підхід до єдиного цифрового середовища енергосистем	3
<i>Саєнко Ю. Л., Молчан А. В.</i> Дослідження впливу параметрів вітрового потоку на несинусоїдальність напруги в мережах з розподіленою генерацією	8
<i>Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К.</i> Вибір виду кореляційної функції для моделювання випадкового процесу зміни струму різкозмінного нелінійного навантаження	15
<i>Аргун Ш. В., Гнагов А. В., Дзюбенко О. А., Понікаровська С. В.</i> Енергогенеруюча плитка з електромашинним вузлом на базі крокових двигунів	20
<i>Барбашов І. В., Обухов В. Р., Риморев Д. С.</i> Розрахунок Електричних мереж з урахуванням нелінійності характеристик елементів мережі і статичних характеристик потужностей споживачів	26
<i>Барбашов І. В., Обухов В. Р., Риморев Д. С.</i> Складання схем заміщення й визначення їх параметрів для протяжних повітряних ліній надвисоких номінальних напруг	33
<i>Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. М.</i> Порівняльний аналіз методів ідентифікації та оцінки впливу джерел несиметрії напруг у точці загального приєднання	42
<i>Шевченко С. Ю., Данильченко Д. О., Борзенков І. І., Лебединський І. Л.</i> Визначення струмів витоку в ізоляції повітряних ліній електропередавання	49
<i>Довгалюк О. М., Саїдов Ш. Н., Яковенко І. С.</i> Дослідження особливостей використання систем накопичення енергії при роботі трейдерів на енергоринку України	54
<i>Кулапін О. В., Махотіло К. В.</i> Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами	61
<i>Чулєєва О. В., Золотарьов В. М.</i> Регулювання процесів просторового структурування пожежобезпечних композиційних поліолефінів системами біфункціональних кремнійорганічних сполук	67
<i>Безпрозваних А. В., Мирчук І. А.</i> Оптимізація конструкцій суднових силових кабелів за умовами охолодження в експлуатації	71
<i>Бурбело М. Й., Степура, О. В.</i> Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії	78

CONTENT

<i>Gryb O. G., Karpaliuk I. T., Shvets S. V., Rudevich N. V.</i> Context approach to the uniform digital environment of energy systems	3
<i>Sayenko Y. L., Molchan A. V.</i> Research of the influence of wind flow parameters on nonsinusoidal voltage in a network with distributed generation	8
<i>Sayenko Y. L., Baranenko T. K.</i> Choice of the correlation functions for random process simulation of rapid changing nonlinear load current	15
<i>Arhun Shch. V., Hvatov A. V., Dzyubenko O. A., Ponikarovska S. V.</i> Energy generating plate with electric machine unit on the basis of step engines	20
<i>Barbashov I. V., Obukhov V. R., Rymoriev D. S.</i> The calculation of the electric networks taking into account the nonlinearity characteristics of network and the static characteristics of capacity consumers	26
<i>Barbashov I. V., Obukhov V. R., Rymoriev D. S.</i> Composition of the scheme of substitution and determination of their parameters for extended air lines of ultra high nominal voltages	33
<i>Sayenko Y. L., Kalyuzhniy D. N.</i> Comparative analysis of methods of identification and assessment of disturbance sources of unbalanced voltage in the point of common coupling	42
<i>Shevchenko S. U., Danylchenko D. O., Borzenkov I. I., Lebedinsky I. L.</i> Determination of leakage currents in the insulation of overhead electrical transmission lines	49
<i>Dovgalyuk O. M., Saidov SH. N., Yakovenko I. S.</i> Peculiarities investigation of the using energy accumulatuion systems at the traders work on the energy market of Ukraine	54
<i>Kulapin O. V., Makhotilo K. V.</i> modelling smart grid of prosumers with photovoltaic systems	61
<i>Chulieieva O. V., Zolotaryov V. M.</i> Regulation of spatial structuring processes of firefighting compositions of polyolefins by biffunctional silicon organic systems	67
<i>Bezprozvannykh G. V., Mirchuk I. A.</i> Optimization of design of ship power cables wth conditions of cooling in operation	71
<i>Burbelo M. Y., Stepura O. V.</i> Application of generalized symmetric components for the identification of consumers which make the quality of electricity	78

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».
СЕРІЯ: ЕНЕРГЕТИКА: НАДІЙНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

Збірник наукових праць

№ 14 (1339) 2019

Відповідальний редактор: Гурин А. Г., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна
Відповідальний секретар: Федорчук С. О., аспірант, 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 10.05.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.
