

13. Shabalov, P. G., Galkin, E. F. (2005). Aviatsonnyiy elektroprivod. Samara: SGAU, 52.

14. Ozyurt, C. H. (2005). Parameter and Speed Estimation of Induction Motors from Manufacturers Data and Measurements. Middle East Technical University, 33–34.

15. Bakulin, A. S. Kudrinskaya, K. I., Kui, P. A., Mo-sin, E. T., Pronin, V. A., Fedorov, E. A. (1979). Sooruzheniya, ustroystva i podvizhnyiy sostav metropolitena. Moscow: Transport, 239.

16. Markovich, I. M. (1963). Rezhimyi energeticheskikh sistem. Moscow: Gosenergoizdat, 360.

17. Upravlenie po ogranicheniyam. Available at: <http://www.businessstuning.ru/op/219-upravlenie-po-ogranicheniyam.html>

18. Shvets, P. S., Monova, D. A., Bondarenko, V. V., Oborotova, E. A. (2016). Multi-objective optimization of the objects with coupled parameters using the sliding window method. ScienceRise, 4/2 (21), 31–36. doi: 10.15587/2313-8416.2016.67616

19. Aleksandrov, V. F., Ezerskiy, V. G., Zaharov, O. G., Malyishev, V. S. (2007). Chastotnaya razgruzka v energosistemah. Moscow: NTF «Energoprogress», 76.

20. Stanovskiy, O. L., Shvets, P. S., Toropenko, A. V., Bondarenko, V. V., Stanovskiy, A. O., Abu Shena, O., Krasnozhon, O. M. (2015). Optimizatsiya zvyaznosti el ementiv v zadachah avtomatizovanogo proektuvannya system. Visnyk NTU «HPI», 49 (1158), 170–175.

Дата надходження рукопису 18.08.2016

Становский Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: stanovsky@mail.ru

Швец Павел Степанович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электроснабжения и энергетического менеджмента, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: pshvets@mail.ru

Бондаренко Виктор Владимирович, старший преподаватель, кафедра электроснабжения и энергетического менеджмента, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: snow_dog@ukr.net

Торопенко Алексей Викторович, кафедра нефтегазового и химического машиностроения, Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: toropenko84@mail.ru

УДК 621.311.1 : 620.92

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.77950

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕГРОВАНІХ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ З ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАБАМИ

© Ю. А. Веремійчук, І. В. Притискач, О. С. Ярмолук, В. П. Опришко

Проведено аналіз особливостей функціонування інтегрованих інтелектуальних енергопостачальних систем, які передбачають інтеграцію самоорганізуючих систем електро– та теплопостачання. Розглянуто можливість використання моделі енергетичних хабів, які поєднують різномірні джерела генерації теплової та електричної енергії для забезпечення попиту споживачів на енергоресурси. Виконано оцінку доцільності впровадження енергетичних хабів в умовах взаємодії локальних енергетичних систем України на різних рівнях організаційної структури енергетики у процесі лібералізації ринку енергії

Ключові слова: інтегровані інтелектуальні енергопостачальні системи, розосереджена генерація, моніторинг, активний споживач, енергетичний хаб

The analysis of the operation properties of integrated intelligent energy supply systems that provide integration of self-organizing systems of electricity and heat consumption is conducted. Possibility of using energy hub models that combine disparate generate sources of heat and electricity energy for the consumers' demand for energy is considered. The feasibility estimation of implementing energy hubs in terms of interaction of local energy systems in Ukraine at different levels of the organizational structure of the energetics in the energy market liberalization is made

Keywords: integrated intelligent energy supply systems, dispersed generation, monitoring, active consumer, energy hub

1. Вступ

Сучасні вимоги до інтегрованих інтелектуальних енергопостачальних систем (ПЕС) визначаються засадами Smart Grid та передбачають, перш за все досягнення заданої надійності й економічності їх функціонування, що обумовлені, зокрема, станом основного обладнання енергосистем, та активної поведінки споживача [1–4]. Разом із тим при створенні та управлінні ПЕС, існує необхідність оцінювання відповідності показників процесу енергозабезпечення та вплив суб'єктів енергетики на функціонування ПЕС у процесі впровадження положень концепції Smart Grid із врахуванням активної поведінки споживача щодо керування енергоспоживанням.

Отримання вичерпної інформації, що потрібно для створення та функціонування ПЕС, яка для процесів енергопостачання дасть можливість формувати управлінські рішення й інструменти впливу, які необхідні для оптимізації параметрів енергозабезпечення споживачів, у тому числі в енергосистемах із наявними джерелами розосередженої генерації (РГ).

Широко в світі, наприклад у Сполучених Штатах Америки (США), Європейському Союзі (ЄС), Японії, Південній Кореї, здійснюються науково-дослідні роботи відповідно до зазначеної тематики. Очікувані результати дадуть змогу забезпечити методологічний перехід до нових структур у вигляді ПЕС, які передбачають інтеграцію самоорганізуючих систем електро- та теплопостачання, побудованих за мультиагентним принципом на інтелектуальній основі; виконання комплексного моніторингу інтелектуальних систем енергопостачання, що включає оцінку стану та діагностики їх елементів; формування принципів взаємодії локальних енергетичних систем України згідно Європейського співтовариства на різних рівнях організаційної структури енергетики у процесі лібералізації ринку електричної енергії.

Для енергетики України, яка знаходиться на етапі зміни своєї парадигми розвитку, актуальним є перехід до нових структур у вигляді ПЕС, які передбачають інтеграцію самоорганізуючих систем електро- та теплопостачання, побудованих за мультиагентним принципом на інтелектуальній основі. Ідеологія, створення та керування такими системами є найважливішою проблемою, яка потребує проведення активних досліджень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Протягом останнього десятиліття обговорюється проблема створення інтелектуальних електроенергетичних систем [1]. У багатьох країнах це обумовлено декількома основними чинниками: очікуваним значним поширенням відновлювальних джерел енергії, додатковим попитом на електроенергію, пов'язаних з поступовим переходом на електромобілі, розвитком інформаційних технологій, що дозволяють створити якісно нові вискоелективні системи моніторингу та управління ПЕС [2]. Як зазначено автором [3], інтелектуалізації енергетичних мереж [1–3] займає провідне місце в рішеннях і директивних документах керівних органів провідних

країн, електроенергетичних організацій, компаній і наукових виданнях.

Енергокомпанії ЄС, США, Канади, Японії й інших країн вже впровадили масштабні пілотні проекти реалізації окремих фундаментальних положень концепції Smart Grid. Політика розвинених країн світу, принципи побудови та функціонування лібералізованих енергетичних ринків спрямовані саме на стимулювання енергозбереження та підвищення ефективності енерговикористання [5]. Зокрема, на енергоринку PJM (США) здатність споживача скорочувати попит на електроенергію вважається еквівалентною до здатності виробника підвищувати виробництво електричної енергії. Правила цього ринку надають можливість кінцевим споживачам продавати ресурси з боку попиту у вигляді енергоефективних ресурсів або за допомогою керування попитом, утворюючи в такий спосіб конкуренцію компаніям–виробникам електричної енергії [6].

У порівнянні з іншими країнами в Україні дослідження знаходяться на початковій стадії [4]. При цьому слід враховувати, що концепція Smart Grid базується на ретельно скоординованому, комплексному вирішенні проблеми перебудови енергетичного сектору економіки, має враховувати особливості електроенергетичної системи нашої країни [7].

Отримані результати дослідження дають можливість переходити до формулювання основ побудови та розвитку ПЕС згідно положень концепції Smart Grid та енергетичних хабів. Проте з'являються напрацювання, такі, як «енергетичний хаб» – це фіксований набір вузлів мережі, що становить єдиний спеціалізований простір, для постачання різноманітних видів енергоресурсів із фінансовими інструментами.

В результаті інтеграції систем енергопостачання на рівнях виробництва і споживання енергоносіїв виникає необхідність спільного розгляду електричних, теплових і газових розподільних мереж для вирішення завдань оптимізації потокорозподілу в інтегрованих системах енергопостачання [8], оптимізації добових режимів при їх диспетчеризації [9], аналізу надійності енергопостачання при використанні інтегрованих систем та ін.

Концепція енергетичних хабів розвивається у роботах [1, 10, 11]. У них представлено математичні моделі для визначення оптимальної потужності споживання та генерації енергоресурсів.

Прикладна проблема полягає у підвищенні безпеки, надійності й економічності функціонування ПЕС, в умовах інтеграції джерел РГ, подальшому розвитку методологічних засад щодо забезпечення ефективного керування електро- та теплопостачанням з активною участю споживачів енергії.

Функціонування інтегрованих енергопостачальних систем згідно положень енергетичних хабів поки для умов України практично не досліджувалось. Необхідно виконати глибокий аналіз та адаптацію до вітчизняних умов світовий досвід, на основі цього можуть бути сформульовані актуальні задачі досліджень.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є аналіз процесу створення, розвитку та функціонування інтегрованих енергопостачальних систем згідно положень Smart Grid та енергетичних хабів для підвищення їх безпеки, надійності й економічності функціонування, а також забезпечення ефективного управління електро- та теплопостачанням із активною участю споживачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– аналіз й адаптація нормативно-технічних та нормативно-правових документів для сприяння взаємодії суб'єктів енергетики щодо підвищення ефективності функціонування інтегрованих енергетичних систем;

– розроблення методів використання комунікативних прийомів у керуванні електроспоживанням для підвищення самоенергозабезпечення, надійності й економічності функціонування інтегрованих енергетичних систем та принципів комплексної системи оцінювання на різних рівнях організаційної структури енергетики;

– виконання комплексного аналізу задач створення, розвитку та функціонування інтегрованих енергопостачальних систем в умовах України;

– розроблення теоретичних основ і формування практичних прийомів до визначення потужності, яка генерується нетрадиційними та відновлюваними джерелами енергії (НВДЕ) різних типів і РГ в умовах експлуатації з урахуванням характеру наявної інформації та фактичного рівня її невизначеності для оцінки енергопотенціалу;

– дослідження можливостей взаємозаміни та суміщення джерел РГ згідно положень енергетичних хабів;

– розробка науково-методологічних засад і практичних алгоритмів поетапного впровадження засобів моніторингу в існуючі та перспективні інтегровані енергопостачальні системи;

– розроблення методів комплексного оцінювання стану обладнання енергетичних систем на основі результатів постійного моніторингу діагностичних параметрів у робочих режимах для експлуатаційних організацій.

4. Концепція енергетичних хабів як напрям енергетики майбутнього

Створення енергетичного хаба на території нашої країни – проект, реалізація якого може зробити з України активного гравця на енергетичному ринку Європи. Становлення енергетичних хабів – перспективний процес згідно впровадження положень концепції Smart Grid та залучення активного споживача, що вимагає перегляд побудови та розвитку енергетичних систем в українських реаліях згідно світових тенденцій до зниження енергозалежності, пошуку альтернативних джерел і постачальників енергетичних ресурсів. Зазначені поняття потребують продовження, доповнення та вдосконалення напрацювань, що у свою чергу стимулюють країни до реалізації таких ініціатив в енергетиці й економіці в цілому.

Для досягнення мети та вирішення задач досліджень передбачається комплексне використання можливостей математичного та технічного забезпечення сучасних інформаційно-обчислювальних комплексів, нових теорій, що адекватно враховують побудову ПЕС, автоматизованих систем обліку та керування, напрацьованих методів, алгоритмів та програмного забезпечення для оцінки та підвищення ефективності функціонування сучасних ПЕС (рис. 1).

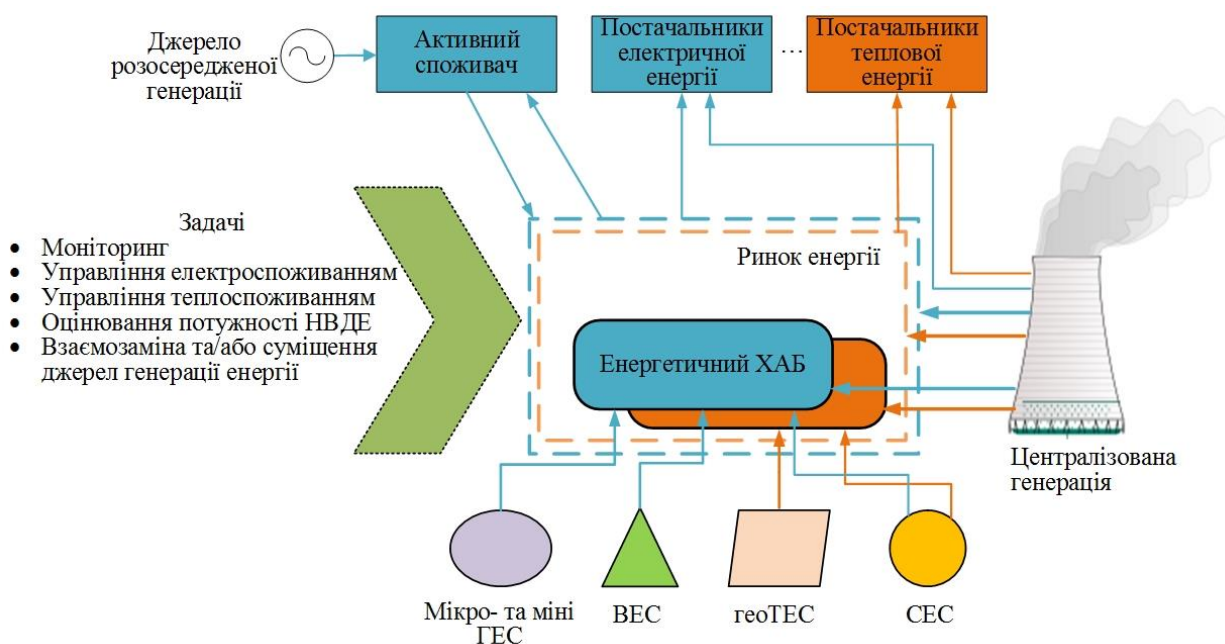


Рис. 1. Структура інтегрованих інтелектуальних енергопостачальних систем

Трансформація існуючих енергетичних систем в ПЕС пов'язана з питаннями забезпечення ефективності розподілу та споживання енергії, високої на-

дійності енергопостачання та якості енергії, освоєння альтернативних джерел енергії у вигляді РГ, що базується на різноманітних технологіях, формування аде-

кватного інформаційного середовища, широкого обґрунтованого впровадження сучасного обладнання, стимулювання активної поведінки споживачів.

Важлива особливість енергетичних систем України полягає у неможливості навіть у найближчій перспективі охопити усю сукупність їх чисельних елементів засобами телевимірювань та каналами передачі даних, що дало б змогу здійснювати моделювання режимів у реальному часі.

Джерела РГ можуть як інтегруватися в енергетичні системи, так і використовуватися автономно для певного виділеного навантаження. Як свідчить світовий досвід в останньому випадку часто використовуються мікромережі. У роботі передбачається розробка евристичного алгоритму багатокритеріального розподілу ресурсів із метою визначення оптимальних умов роботи компонентів мікромереж [12].

Однією із головних задач систем моніторингу та діагностування обладнання енергетичних систем є визначення поточного стану за всіма доступними діагностичними параметрами [13]. Актуальним є застосування методів постійного контролю на обладнанні в робочих режимах із метою найбільш точного та швидкого виявлення дефектів й аномальних режимів роботи. Необхідною є розробка методів аналізу масивів значень діагностичних параметрів, які враховують вплив на зміну параметрів сукупності зовнішніх факторів та беруть до уваги історію конкретної одиниці обладнання.

Структура виконання досліджень являє собою комплекс взаємопов'язаних елементів системи оцінювання, діагностики, моніторингу стану та функціонування ПЕС з активним споживачем.

5. Концептуальні положення

Концепція використання енергетичних хабів впливає на процес оптимального планування розвитку системи енергопостачання, змінюючи витрати на нове будівництво, реконструкцію й експлуатацію елементів мереж, а також показники надійності. Виділення окремих енергетичних хабів в мережі дає змогу сформулювати процедуру оптимізації, яка мінімізує загальні витрати енергопостачальної організації та визначає оптимальні значення потокорозподілу енергій, потужності основних і резервних генерувальних та накопичувальних пристроїв.

Розглядають два види енергетичних хабів: хаби, які знаходяться у власності споживачів енергії та можуть постачати енергію в основну енергосистему, і хаби, які знаходяться у власності енергопостачальних організацій та використовують різноманітні енергоносії для вироблення енергії в межах розподільних мереж [14].

Виконання зазначених задач дослідження передбачає виконання їх на декілька етапах:

1) аналіз особливостей і можливостей розвитку та функціонування ПЕС;

2) впровадження засобів моніторингу в існуючі та перспективні інтегровані енергопостачальні системи;

3) оцінювання управління енергоспоживанням із залученням активного споживача згідно положень концепції Smart Grid та енергетичних хабів.

Приведемо перелік задач дослідження, які ставитиме перед собою автор, які потребують виконання.

Перший етап включає наступні задачі дослідження:

– виконання комплексного аналізу можливостей та особливостей інформаційного забезпечення задач побудови, розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем в умовах України;

– розробка проектів нормативно-технічних та нормативно-правових документів для сприяння взаємодії суб'єктів і підвищення ефективності функціонування інтегрованих енергетичних систем;

– проведення аналізу нормативної бази щодо забезпечення організації ринкових взаємовідносин в енергетичній сфері у Європейському співтоваристві та використання відомих методів та підходів, що дасть змогу створити підґрунтя для ефективного впровадження 3-го Енергетичного пакету.

Другий етап включає такі задачі дослідження:

– розробка науково-методологічних засад та практичних алгоритмів поетапного впровадження засобів моніторингу в існуючі та перспективні інтегровані енергопостачальні системи;

– визначення раціонального складу та структури систем моніторингу окремо для кожного з основних видів обладнання енергопостачальних систем, з урахуванням технічних та економічних факторів;

– розроблення методів комплексного оцінювання стану обладнання енергетичних систем на основі результатів постійного моніторингу діагностичних параметрів в робочих режимах.

Третій етап включає наступні задачі дослідження:

– розроблення методів використання комунікативних підходів в системі управління енергоспоживанням й інтегрованими енергетичними системами та принципів комплексної системи оцінювання на різних рівнях організаційної структури енергетики;

– розроблення теоретичних основ і формування практичних підходів до визначення потужності, яка генерується НВДЕ різних типів і РГ в умовах експлуатації з урахуванням характеру наявної інформації та фактичного рівня її невизначеності;

– формування наборів діагностичних параметрів, які будуть оптимальними за критеріями виявлення кількості дефектів обладнання та вартістю системи моніторингу та діагностування, для кожного з типу задач, що вирішуються системами моніторингу;

– розроблення методів і методик вибору складу та місць розміщення засобів вимірювання діагностичних параметрів, що забезпечать отримання інформації про ефективність функціонування енергетичних систем із мінімальними витратами матеріальних і фінансових ресурсів.

Отримані результати проведених досліджень дадуть змогу реалізувати об'єктивне оцінювання стану та керування режимами роботи ПЕС із метою забезпечення ефективного використання первинних

ресурсів, потенціалу енергетичного обладнання, підвищення надійності енергопостачання, мінімізації використання органічного палива й емісії CO₂, сприяння сталому розвитку окремих територіальних громад країни.

6. Перспективні результати досліджень щодо функціонування інтегрованих інтелектуальних енергопостачальних систем

Поетапне впровадження таких рішень у енергопостачальні системи дасть змогу підвищити ефективність їх режиму за рахунок раціоналізації енергоспоживання, мінімізації втрат енергії, забезпечення високого рівня надійності й якості. При цьому максимально враховуються особливості вітчизняних електричних і теплових мереж, суб'єктів енергетики, що забезпечують безконфліктне впровадження рекомендованих рішень та гарантує їх ефективність.

Для ефективної роботи алгоритмів оптимального функціонування енергетичного хабу необхідна якомога точніша інформація про рівні потокорозподілів енергії, можливі рівні генерації джерел енергії та потреби споживачів. Частина необхідної інформації можна отримувати з систем моніторингу, які будуть впроваджуватися в енергосистемах. Разом з тим, широке застосування систем моніторингу дасть змогу вирішити інші задачі, які стоять перед енергопостачальними компаніями.

Сучасні підходи до побудови ПЕС передбачають широке використання мікропроцесорної техніки для реалізації інтелектуальних алгоритмів роботи обладнання. Розробка та впровадження методів та алгоритмів моніторингу стану, що базуються та використанні сучасних протоколів передачі та засобів обробки інформації, дасть змогу перейти від обміну традиційними аналоговими та дискретними сигналами на уніфікований обмін цифровими повідомленнями, які забезпечують можливість розподіленої реалізації функцій систем моніторингу та повну функціональну сумісність інтелектуальних електронних пристроїв різних виробників.

Створення нових і вдосконалення існуючих методів моніторингу та діагностування обладнання, які на відміну від існуючих передбачають комплексне використання результатів параметричної ідентифікації моделей фізичних процесів в обладнанні, динамічне оцінювання вимірюваних параметрів та формування багатофакторної оцінки стану обладнання, дасть змогу підвищити точність виявлення дефектів і рівень технічного обслуговування основного обладнання інтегрованих енергопостачальних систем. Впровадження точних й ефективних систем безперервного моніторингу та діагностування обладнання інтегрованих енергетичних систем дасть змогу значно знизити періодичність міжремонтного контролю такого типу обладнання, забезпечити перехід до технічного обслуговування за фактичним станом і зменшити витрати енергопостачальних компаній на точні експлуатацію та ремонт обладнання.

Модель енергетичних хабів дає змогу перейти до розробки алгоритмічного та програмного забезпечення для систем моніторингу та діагностування об-

ладнання енергетичних мереж, у тому числі з наявними джерелами РГ; оцінювання потужностей альтернативних джерел генерації та параметрів режимів ПЕС; оперативного керування роботою комплексних джерел енергії з можливістю залучення при необхідності експертних оцінок, які надаються у різноманітних формах.

Поєднання активного споживача та джерел РГ в одну структуру дасть можливість сформувати ПЕС, із метою підвищення якості надання послуг з енергопостачання, для яких досягається узгоджене функціонування всіх елементів системи, що сприяє зменшенню технологічних втрат енергії за рахунок оптимізації енергетичних потоків.

Використання результатів роботи забезпечить створення науково-технічних основ для розробки і реалізації заходів з регулювання локальної енергетичної системи України кінцевим споживачем, що дасть змогу залучати зовнішні інвестиції у проекти з енергозбереження, в яких відчувається гостра потреба в Україні, розширити сферу й обсяги взаємовигідного співробітництва України з країнами ЄС.

Наступним етапом роботи планується створення програмного комплексу для аналізу й оптимізації процесів в інтелектуальних комбінованих енергопостачальних системах, з інтегрованими джерелами РГ малої та середньої потужності, активними споживачами та мультиагентними системами керування енергетичними об'єктами. Передбачається створення алгоритмічного та відповідного програмного забезпечення усіх принципово нових методів вирішення задач: алгоритми формування нечітких оцінок навантажень, потужностей альтернативних джерел генерації та параметрів режимів ПЕС; програми вибору складу та місць розташування пристроїв силової електроніки, комутаційних апаратів, у тому числі при використанні засобів РГ; алгоритми оперативного керування роботою комплексних джерел енергії з можливістю залучення при необхідності експертних оцінок, які надаються у різноманітних формах.

Передбачається розробка нормативно-методичного забезпечення щодо управління режимами енергоспоживання сумісно працюючих систем електро- та теплопостачання; моделей оцінювання характеристик кінцевих споживачів електричної енергії; системи оцінювання методів керування енергоспоживанням із використанням можливостей аналізу енергетичного ринку.

Дослідження не має аналогів щодо комплексного вирішення поставлених задач. Сформульовано наукові аспекти побудови та функціонування ПЕС, ключові положення концепції енергетичних хабів, принципи побудови адаптивних систем керування попитом на енергію на основі мультиагентного керування, визначено потенціал їх впровадження, розроблені рекомендації щодо методів заохочення до активної поведінки споживача.

7. Висновки

1. Вітчизняна енергетика знаходиться на етапі зміни своєї парадигми розвитку. Нові виклики часу ставлять нові завдання, вирішити які на базі існую-

чої структури енергетичної системи не представляється можливим. Необхідно здійснити «перехід» до нових структур у вигляді ПЕС. Ідеологія, створення та керування такими системами є найважливішою проблемою, яка потребує проведення активних досліджень.

2. Реалізація комунікативних прийомів в процесі керування електроспоживанням при функціонуванні інтегрованих енергетичних систем дасть можливість переглянути конфігурації в добових графіках електричних навантажень та дозволить створити передумови для формування нових варіантів тарифів на електроенергію.

3. Проведений аналіз світових тенденцій та досвіду розвитку енергетики показує доцільність створення ПЕС із комплексним застосуванням засобів РГ з урахуванням можливостей їх впровадження в умовах України.

4. У подальшому отримані результати планується використовувати при розв'язанні широкого кола різноманітних задач, пов'язаних із оптимізацією режимів інтегрованих ЕПС, визначенні найбільш ефективних умов паралельної роботи енергосистем, джерел РГ і мікромереж, появи енергетичних хабів у процесі лібералізації ринку електроенергії.

Література

1. Воропай, Н. И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы [Текст] / Н. И. Воропай, В. А. Стенников // Известия Академии наук. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 64–73.
2. Ahcin, P. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems [Text] / P. Ahcin, M. Sivic // 2010 International Conference on Power System Technology. – 2010. doi: 10.1109/powercon.2010.5666564
3. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных исследований СЭИ–ИСЭМ [Текст] / ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
4. Стогній, Б. С. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. Г. Баталов, С. П. Денисюк // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. – С. 5–20.
5. Arajalahti, E.-L. From demand side management (DSM) to energy efficiency services: A Finnish case study [Text] / E.-L. Arajalahti, R. Lovio, E. Heiskanen // Energy Policy. – 2015. – Vol. 81. – P. 76–85. doi: 10.1016/j.enpol.2015.02.013
6. Haghifam, M. R. Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems [Text] / M. R. Haghifam, M. Manbachi // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2011. – Vol. 33, Issue 3. – P. 385–393. doi: 10.1016/j.ijepes.2010.08.035
7. Стогній, Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – № 5. – С. 52–67.
8. Стогній, Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2010. – № 6. – С. 44–50.
9. Zamulko, A. Methods of controlling power consumption in terms of reforming market conditions [Text] / A. Zamulko, Y. Veremiichuk // Power and Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 32. – P. 41. doi: 10.7250/pee.2014.007

10. Almassalkhi, M. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs [Text] / M. Almassalkhi, I. Hiskens // 17-th Power System Computation Conference. – Stockholm, Sweden, 2011. – 7 p.

11. Carvalho, M. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints [Text] / M. Carvalho, L. M. Serra, M. A. Lozano // Energy. – 2011. – Vol. 36, Issue 6. – P. 3779–3790. doi: 10.1016/j.energy.2010.09.023

12. Ярмолук, О. С. Моделювання параметрів джерел розподіленої генерації в інтегрованих електропостачальних системах із урахуванням невизначеності інформації [Текст] / О. С. Ярмолук // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2012. – № 3. – С. 57–58.

13. Denysiuk, S. Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System [Text] / S. Denysiuk, I. Prytyskach // International Journal of Computing and Technology. – 2014. – Vol. 1, Issue 5. – P. 191–195.

14. Geidl, M. The energy hub – a powerful concept for future energy systems [Text] / M. Geidl, G. Koppel, P. Favre-Perrod et. al. // Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry. – 2007. – 10 p.

References

1. Voropay, N. I., Stennykov, V. A. (2014). Yntehryrovannyye yntellektual'nye enerhetycheskiye systemy. Yzvestyya Akademyyi nauk. Enerhetyka, 1, 64–73.
2. Ahcin, P., Sivic, M. (2010). Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems. 2010 International Conference on Power System Technology. doi: 10.1109/powercon.2010.5666564
3. Voropay, N. I. (Ed.) (2010). Sistemnyye issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnykh issledovaniy SEI–ISEM. Novosibirsk: Nauka, 686.
4. Stohniy, B. S., Kyrylenko, O. V., Batalov, A. H., Denysyuk, S. P. (2011). Intelektual'ni elektrychni merezhi: svitovyv dosvid i perspektyvy Ukrainy. Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 5–20.
5. Arajalahti, E.-L., Lovio, R., Heiskanen, E. (2015). From demand side management (DSM) to energy efficiency services: A Finnish case study. Energy Policy, 81, 76–85. doi: 10.1016/j.enpol.2015.02.013
6. Haghifam, M. R., Manbachi, M. (2011). Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 33 (3), 385–393. doi: 10.1016/j.ijepes.2010.08.035
7. Stohniy, B. S., Kyrylenko, O. V., Prakhovnyk, A. V., Denysyuk, S. P. (2012). Evolyutsiya intelektual'nykh elektrychnykh merezh ta yikhni perspektyvy v Ukraini. Tekhnichna elektrodynamika. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 5, 52–67.
8. Stohniy, B. S., Kyrylenko, O. V., Denysyuk, S. P. (2010). Intelektual'ni elektrychni merezhi elektroenerhetychnykh system ta yikhnye tekhnologichne zabezpechennya. Tekhnichna elektrodynamika. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 6, 44–50.
9. Zamulko, A., Veremiichuk, Y. (2014). Methods of Controlling Power Consumption in Terms of Reforming Market Conditions. Power and Electrical Engineering, 32, 41. doi: 10.7250/pee.2014.007
10. Almassalkhi, M., Hiskens, I. (2011). Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs. 17-th Power System Computation Conference. Stockholm, Sweden, 7.
11. Carvalho, M., Serra, L. M., Lozano, M. A. (2011). Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. Energy, 36 (6), 3779–3790. doi: 10.1016/j.energy.2010.09.023

12. Yarmoliuk, O. S. (2012). Modelyuvannya parametriv dzherel rozpodilenoї heneratsiyi v intehrovanykh elektropostachal'nykh systemakh iz urakhuvannyam nevyznachenoї informatsiyi. Tekhnichna elektrodynamika. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 3, 57–58.

13. Denysiuk, S., Prytyskach, I. (2014). Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System.

International Journal of Computing and Technology, 1 (5), 191–195.

14. Geidl, M., Koppel, G., Favre-Perrod, P. et. al. (2007). The energy hub – a powerful concept for future energy systems. Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry, 10.

*Рекомендовано до публікації член-кор. НАН України, д-р техн. наук Басок Б. І.
Дата надходження рукопису 09.08.2016*

Веремійчук Юрій Андрійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: abonne@i.ua

Притисках Іван Васильович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: prytyskach.ivan@gmail.com

Ярмолук Олена Сергіївна, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: yarmolyuk.lena@gmail.com

Опришко Віталій Павлович, аспірант, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: livstrongtm@gmail.com

УДК 004.942

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.76921

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© А. В. Садовой, Р. С. Волянский, Н. В. Волянская

Выполнен анализ методов построения математических моделей цепи Чуа, и обоснованы преимущества метода контурных токов. Построена интервальная математическая модель цепи Чуа, и определены ее предельные аттракторы. Показано, что использование интервальных моделей позволяет одновременно исследовать все возможные траектории движения динамического объекта в наперед выбранном интервале. Приведены результаты математического моделирования

Ключевые слова: интервальная модель, хаотическая динамика, цепь Чуа, траектории движения, контурный ток

The analysis of development methods of Chua's circuit mathematical models is done and benefits of loop currents method are substantiated. The interval mathematical model of Chua's circuit is built and its limiting attractors are defined. It is shown that the interval models usage can simultaneously examine whole possible dynamic object's paths in a previously chosen range. The results of mathematical modeling are given

Keywords: interval model, chaotic dynamics, Chua's circuit, paths, loop current

1. Введение

Со времени открытия в конце 19 века явления динамического хаоса, математическое описание систем с хаотической динамикой прошло длинный путь от чисто математических абстракций до моделей реальных физических, экономических, метеорологических и других систем. Поэтому в настоящее время хаотические системы находят все

большее применение в различных отраслях науки и техники [1].

Одной из простейших систем с хаотической динамикой является нелинейная электрическая цепь, предложенная Л. Чуа (рис. 1) [2] как упрощение известной динамической системы Э. Лоренца [3]. Область использования цепи Чуа предусматривает возможность создания защищенных каналов связи и