

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.311

Г.В. Мельничук, магістр промислової електроніки, ORCID 0000-0002-8173-0472
Міністерство розвитку громад та територій України

ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ ТА ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ

Реферат. Метою дослідження є визначення тенденцій розвитку електромереж населених пунктів та оптимальних підходів до їх аналізу та розрахунків в умовах впровадження технологічних інновацій у сфері інформаційних та енергетичних технологій, а також децентралізації населених пунктів. У статті здійснено огляд сучасних підходів та технічних рішень, деталізовано питання формування «розумної мережі» SmartGrid шляхом поєднання запровадження інтелектуальних підходів та інтегрованих систем генерації електроенергії, її споживання та зберігання. Серед важливих аспектів формування SmartGrid у населених пунктах зазначена необхідність розвитку систем керування комунальними системами в межах окремих будинків та комплексів установ, а також формування інтегрованої транспортної системи, що включає в себе як громадський транспорт, так і індивідуальні транспортні засоби різних типів і форм власності. Загалом поєднання зусиль органів місцевого самоврядування, комерційних та некомерційних установ, домовласників та місцевих мешканців визначається як важлива передумова успішного формування SmartGrid у населених пунктах. Результатом роботи є визначення сучасних тенденцій розвитку систем електроживлення населених пунктів, зокрема, необхідність формування проміжної ланки енергетичної політики – на рівні населених пунктів та територій, що поєднують локальних учасників енергоринку (системи генерації, зберігання та споживання електроенергії) та виступають інтегрованими активними учасниками загальнонаціональної єдиної енергосистеми країни та національного енергоринку. Також наведено обґрунтування актуальності використання методів розрахунків систем електроживлення, зокрема, розширення методу окремих складових на основі перетворень Лапласа та операторних обчислень, які дозволяють отримати енергетичні характеристики і параметри електроенергії у аналітичному вигляді для використання у інтелектуальних системах керування електроживленням. У підсумку наведене дослідження підтверджує твердження про необхідність подальшого вдосконалення концепції SmartGrid шляхом інтеграції елементів енергетичних систем, інтелектуалізації процесів керування та розвитку нових підходів децентралізації енергоринку.

Ключові слова: SmartGrid, електропостачання, електричні мережі, енергоменеджмент, населені пункти, децентралізація, електротранспорт.

1. Проблематика розвитку систем електропостачання населених пунктів

Історично розвиток електропостачання розпочався саме з населених пунктів, де створювалися локальні енергосистеми для місцевого освітлення, електротранспорту (трамваїв та метрополітену), а також промисловості. Завдяки швидкому зростанню попиту будівництво невеликих міських електростанцій стає прибутковим видом інвестицій, при цьому вугільні електростанції будуються серед міських кварталів, стаючи чинником забруднення повітря в містах.

Індустріальний бум початку-середини XX століття спричинив потребу в більш потужних джерелах електроенергії: будуються великі електростанції, зокрема потужні ГЕС, локальні міські електромережі поступово поєднуються, і наразі єдина енергосистема України входить до Єдиної електроенергетичної системи, яка об'єднує пострадянський простір і інтегрована з енергосистемами Східної і Центральної Європи. Однак в умовах постіндустріальної економіки, зростання рівня життя населення та зміни технологій, зокрема, в побуті, електропостачання стикнулося з низкою нових викликів.

1.1. Зростання частки побутового споживання. Водночас наприкінці XX століття та з початком XXI століття почала суттєво змінюватися структура споживання електроенергії. Одночасно зі скороченням

© Г.В. Мельничук, 2019

споживання електроенергії промисловістю відбулося стрімке зростання споживання домогосподарствами. Якщо частка споживання електроенергії у 2002 році вона складала лише майже 19% (і 2,7% – комунально-побутові споживачі, то, у 2011 році – вже 25,5% (38,5 млрд кВт·год) [9].

За 12 місяців 2019 року, згідно з офіційними даними щодо розподілу споживачів електроенергії, споживання населенням складає близько 30% (і ще додатково майже 13% – комунально-побутові споживачі) [10]. Для порівняння: у 2017 році споживання електроенергії домогосподарствами у Євросоюзі склало 27% кінцевого споживання, тобто наразі частка споживання електроенергії населенням наближається до показників розвинених країн [17].

Така тенденція зумовлена значним зростанням використання електроенергії в побуті, зокрема для опалення, підігріву води, через збільшення кількості побутової техніки – внаслідок зростання добробуту домогосподарств. І цілком можливим є подальше зростання абсолютних показників споживання електроенергії населенням – наприклад, за рахунок все більшого використання індивідуального електричного обладнання та поширення кухонних електроплит замість газових плит. Цьому сприяє і нормативна політика та тенденції у будівництві: згідно ДБН, у будинках висотністю понад 9 поверхів заборонено використання газу у квартирах, можливі лише електроплити.

Так, у 2018 році, за даними Національної комісії з регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), споживання енергії домогосподарствами України склало в середньому 164 кВт/год, тоді як в країнах Євросоюзу – 304 кВт/год. При цьому український показник знаходиться на рівні Польщі (168 кВт/год), вищий за румунський (140 кВт/год), але помітно нижчий, ніж в Угорщині (227 кВт/год) та Словаччині (219 кВт/год) [4].

1.2. Збільшення пікового споживання домогосподарствами. Особливість енергоспоживання населенням, на відміну від промисловості, – досить стрімкі піки споживання. Для прикладу, наведено середній цілодобовий профіль використання електроенергії за результатами досліджень 250 британських домогосподарств у 2012 році [21].

В умовах України при оцінці ступеня впливу споживання домогосподарствами та формування пікових навантажень варто згадати і про регіональний розподіл виробничих потужностей, що є найбільшими споживачами електроенергії. Так, серед галузей промисловості України найбільш енергомісткою була й залишається металургійна промисловість – 23,9% у загальній структурі за 12 місяців 2019 року.

Однак враховуючи, що в більшості регіонів підприємств цієї галузі взагалі не представлено, можна говорити про те, що у багатьох містах та навіть окремих регіонах частка домогосподарств у споживанні може сягати 50% і більше. Що, відповідно, підвищує актуальність проблеми пікових навантажень.

1.3. Поява і збільшення частки критичних споживачів. Розвиток технологій зумовив і появу споживачів, що відносяться до об'єктів критичної інфраструктури та від надійності енергопостачання яких залежить не лише забезпечення інших комунальних послуг, окрім освітлення та роботи побутових приладів, а й безпека та життя людей.

Так, в умовах сучасного великого міста до категорії критичних споживачів відносяться медичні заклади (обладнання підтримання життєдіяльності, безперерйна робота обладнання операційних), об'єкти транспортної інфраструктури (світлофорні об'єкти, метрополітен), зв'язку (базові станції мобільного зв'язку), системи громадської безпеки (відеоспостереження, сигналізації), і чим більше і щільніше місто – тим більше таких споживачів.

Разом з тим, не варто недооцінювати проблему стійкості і в умовах окремого будинку чи невеликого населеного пункту. Від електроенергії залежить робота життєво важливих приладів та систем – опалення, водопостачання, зв'язку, сигналізації. Навіть газові індивідуальні опалювальні котли наразі потребують електроенергії для роботи системи керування та аварійного захисту [22].

Як наслідок, останніми роками все частіше за мету розвитку систем електропостачання ставиться підвищення «стійкості» енергетичних інфраструктур до впливу як поточних, періодичних впливів пікових навантажень, так і малоймовірних подій зі значними впливами, таких як екстремальні погодні явища, техногенні аварії, терористичні акти та диверсії, інші зовнішні впливи.

За визначенням поняття «стійкість» (від латинського слова «resilio», яке буквально означає здатність об'єкта чи системи повернутися до свого первісного стану після навантаження), запровадженого у 1973 р. С.С.Холлінгом, воно визначає стійкість взаємозв'язків всередині системи і є мірою здатності цих систем поглинати зміни змінних стану, рушійних змінних та параметрів і зберігати працездатність.

2. Технологічні новації: можливості та нові виклики для систем енергопостачання

Питання піків споживання наразі є одним з ключових для Єдиної електроенергетичної системи, що вирішується як використанням маневрових потужностей теплоелектростанцій (атомні станції працюють у стабільному режимі, теплові ж можуть швидко змінювати режим роботи), так і шляхом збереження енергії за допомогою гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС) у непікові години і повернення у мережу під час найбільших навантажень.

Останні працюють як гравітаційний акумулятор, схожий на водонапірну вежу: у непікові години електронасоси використовують надлишкову енергію, аби закачати воду у верхній резервуар, у пікові години вода тече вниз, обертаючи турбіни генераторів. Також як маневрові потужності електрогенерації використовують теплові електростанції – на відміну від атомних, вони здатні швидко змінювати режим роботи протягом доби.

Втім, наразі ключові рішення у вирішенні проблем згладжування пікових навантажень, а також стійкості до зовнішніх впливів та енергоефективності у секторі побутового енергоспоживання знаходяться переважно на рівні кінцевих споживачів – власне, домогосподарств. Це стосується як керування споживання, так і застосування резервних джерел електропостачання, а віднедавна – навіть генерації та зберігання електроенергії. Однак нові можливості приносять і нові виклики.

2.1. Керування споживанням. Ще у 1980-х провідні енергокомпанії світу почали запроваджувати так звані «інтелектуальні лічильники», які постійно передавали дані в енергокомпанії. Це – моніторинг, а наступний рівень – управління споживанням, і найвідоміший спосіб – різні тарифи за часом, коли вночі електроенергія дешевше. Лічильники з такою функцією наразі називають багатозонними або багатотарифними, і для них не обов'язковим є наявність постійного зв'язку з обліковим центром енергокомпанії. Найпростіші – двозонні, і саме відповідно до постанови НКРЕ від 23.04.2012 № 498 (зі змінами) енергопостачальні компанії надають знижку 50% тарифу з 23:00 до 07:00 [11].

Однак далеко не всіх споживачів можна спокусити перемикає електроприлади вночі, тому повноцінно «інтелектуальні лічильники» працюють у поєднанні з відповідним обладнанням у споживачів – наприклад, «розумні» розетки та системи, які включають і вимикають пристрої в залежності від часу, потреби, рівня навантаження. Наразі на ринку доступні різні типи подібних приладів: розетки з таймерами, обмежувачі напруги, аварійні джерела енергії, що підключаються у разі відключень основного мережевого електроживлення.

Поєднання таких приладів і управління єдиним контролером отримало назву «розумний будинок» (smart home, digital house) [20]. Така система складається з власне контролера, датчиків та актуаторів – виконавчих пристроїв (ті самі «розумні розетки», різноманітні вимикачі, клімат-контролери тощо). Технології безпроводного зв'язку, так званий «інтернет речей» дозволяють обійтися без проводів і забезпечити віддалене керування «розумним будинком».

Разом з тим у низці випадків робота систем «розумний будинок» може мати різні наслідки для загальної енергомережі. З одного боку, у разі орієнтації на енергозбереження з урахуванням «нічного» тарифу можна отримати згладжування провалів споживання вночі, з іншого – можливе збільшення споживання саме у пікові години, наприклад, коли електроопалення вимикається вдень за відсутності мешканців вдома і вмикається перед їх поверненням з роботи ввечері.

2.2. Автономні джерела енергії. Розвиток технологій «зеленої» енергетики та запровадження Україною стимулюючого високого «зеленого» тарифу на закупівлю електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій (утричі вищий за традиційні електростанції) спричинило справжній бум у цій галузі. Потужність об'єктів відновлювальної енергетики в Україні за 2017 рік зросла на 30% до 290 МВт, за 2018 рік – на 66% до 849 МВт, а за три квартали 2019 року – утричі до 2,6 ГВт [7].

Однак такі позитивні показники отримали і зворотній ефект. У 2019 році оператор об'єднаної енергосистеми країни НЕК «Укренерго» заявив про брак резервів енергосистеми для підтримки її сталості, і одна з причин – великі об'єми виробництва сонячної та вітрової генерації і відсутність достатньої кількості високоманеврових потужностей [6]. На відміну від відносно прогнозованих піків споживання, сонячні та вітряні електростанції хоч і намагаються розмішувати у найбільш природно вдалих для цього місцях, однак фактична їх робота суттєво залежить від погоди. Як наслідок – до стрибків споживання додаються ще менші прогнозовані піки генерації.

Втім, це не привід відмовлятися від «зеленої» енергетики – питання лише в тому, хто більше зацікавлений у вдосконаленні електромереж для забезпечення стійкості енергосистеми. У світі «локомотивами» відновлювальної енергетики все більше стають міста – як невеликі (у США, наприклад, невеликі міста Аспен, Колорадо та Берлінгтон, Вермонт та інші вже працюють повністю на відновлюваних джерелах енергії), так і мегаполіси. Копенгаген ставить за мету з 2025 року використовувати виключно електроенергію, вироблену без спалювання викопного палива, Сан-Дієго, штат Каліфорнія, має на меті забезпечити 100% живлення відновлюваними джерелами до 2035 року, а канадський Ванкувер – до 2050 року [15].

2.3. Розподілене збереження енергії. Збалансувати споживання енергії на локальному рівні могли б накопичувачі енергії (energy storage) – однак, звісно, мова йде не про гідроакumuлюючі електростанції, як у об'єднаній енергосистемі. Поки такі технології є занадто дорогими і загальний обсяг таких «сховищ» у світі оцінюється у 9 ГВт. Однак за прогнозом Bloomberg New Energy Finance до 2040 року по всьому світу буде встановлено 1095 ГВт акумуляторів, а інвестиції в сферу зберігання енергії складуть \$ 622 млрд [26].

Наразі вже можна спостерігати здешевшання технологій збереження енергії. Таку 2010 році вартість зберігання 1 кВтг дорівнювала 1200 доларів США, а у 2019 році вона менше 200 доларів США і буде

знижуватися далі. Основні технології – електрохімічні акумулятори, механічні маховики, системи накопичення енергії на основі стисненого повітря, зберігання теплової енергії, використання гравітації, до останніх відносяться і ГЕС.

Втім, більшість з них наразі не отримали значного поширення, окрім ГЕС у промисловому масштабі. Втім, наразі виробники електромобілів та акумуляторів до них вже пропонують рішення для індивідуальних будинків – настінні акумулятори з програмним забезпеченням системи «розумний будинок», заряджаючись вночі за дешевшим тарифом [19]. Однак не варто недооцінювати і вплив самих електромобілів на електромережу – як негативний так і позитивний.

Справді, поки електромобілів було небагато, їх вплив на енергомережу був майже непомітний, однак поширення «швидких» зарядок з великим енергоспоживанням може призвести до перевантажень і аварійних відключень. Разом з тим, все більше нових моделей електромобілів можуть віддавати енергію в мережу, тобто бути мережевими акумуляторами. Наразі технологію Vehicle to Grid (V2G) тестують виробники електромобілів, і вона надає змогу власникам електромобілів заробляти на збереженні енергії (за оцінками фахівців компанії Nissan, навіть до 1300 євро на місяць).

Справді, в середньому приватний автомобіль використовується 4% часу, весь інший час він стоїть. Тож електромобілі з можливістю віддавати енергію в мережу за технологією Vehicle to Grid (V2G) можуть бути «міськими акумуляторами», приносячи дохід власникам, надаючи енергію на енергоринок міста під час пікових навантажень. Це, до речі, додатковий стимул у годину пік скористатися громадським транспортом, а не власним електромобілем, що знижує затори. Якщо вважати, що енергоспоживання відбувається там, де знаходиться людина, то таке рішення видається цілком перспективним. Щоправда, не варто забувати про ресурс акумуляторів – однак чим далі, тим вони витримують більше перезаряджень.

3. Енергетичний аналіз розподілених систем електроживлення

Створення складних систем електропостачання з кількома джерелами живлення та споживачами різних типів потребує вирішення проблем електромагнітної сумісності елементів систем (усунення їх взаємного впливу), і, відповідно, використання оптимізаційних процедур та системних підходів для моделювання процесів у таких системах. Для узгодження параметрів електричної енергії джерел живлення (генераторів) та споживачів (навантажень) використовуються перетворювачі електричної енергії (ПЕЕ).

При оптимізації режимів і параметрів елементів систем з ПЕЕ виникає необхідність здійснення комплексу досліджень щодо адекватного моделювання електромагнітних процесів. Тому при їх аналізі в системах з ПЕЕ необхідно враховувати не лише ключові моделі вентилів, а й параметричні залежності елементів моделей навантаження, що зумовлює необхідність розрахунку електромагнітних процесів на інтервалі технологічного періоду, що перевищує періоди діючих генераторів та/чи періоди повторюваності комутацій ключових елементів.

Трапляються випадки, коли необхідно забезпечити спеціальну форму напруги генератора, при цьому відбувається також циклічна зміна параметрів навантаження. Такий клас перетворювачів називається перетворювачами з циклічно змінюваними параметрами. Основним у виборі методів розрахунку таких перетворювачів є врахування співвідношень між періодами функції напруги генератора T_G та функції зміни параметрів навантаження T_H . Найпростішим є випадок співпадіння цих періодів, більш складними – коли один з періодів містить декілька інших, або існує найменше спільне кратне для періодів роботи генератора та навантаження, коли $n_G T_G = n_H T_H = T_T$, де T_T – період роботи системи, n_G, n_H – цілі числа.

Одним з найбільш перспективних методів розрахунку електричних кіл на основі перетворень Лапласа є метод окремих складових, який дозволяє отримати розв'язок рівнянь для знаходження значень струму в електричних колах при квазіусталених процесах у замкненій формі. Враховуючи дедалі більше поширення імпульсних перетворювачів та використання нестаціонарних навантажень, саме розрахунок квазіусталених процесів є однією з основних задач при їх розрахунку та аналізі. Нижче детально розглянуто використання методу окремих складових для розрахунку систем з ПЕЕ зі ступінчастими та синусоїдальними сигналами, а також з модуляцією параметрів сигналів.

3.1. Моделювання еквівалентних генераторів та навантажень постійної та змінної структури. Питання адекватного опису процесів у силових колах перетворювачів у разі використання кусочно-лінійних моделей елементів – одне з основних при побудові алгоритмів та програм автоматизованого розрахунку і проектування перетворювачів. У виборі моделей необхідно враховувати, що ефективність їх використання залежить від типу задачі, що розв'язується, та виду процесів, які досліджуються, в перетворювальних пристроях [5].

Вид схемної моделі ПЕЕ залежить від його структури та використаних моделей напівпровідникових вентилів. Коли у випадку використання нелінійних фізичних моделей вентилів схема перетворювача має незмінну структуру і містить нелінійні елементи, то при використанні ключових моделей вона може мати як постійну, так і змінну структуру та містити лінійні елементи з постійними чи змінними параметрами. У таблиці 1 наведено приклади використання S- та R-моделей для представлення ПЕЕ.

Таблиця 1

Схема системи з ПЕЕ	Еквівалентна схема	Форма сигналу генератора
Використання S-моделі ПЕЕ		
Використання R-моделі ПЕЕ		

При цьому ПЕЕ основних простих класів – випрямлячі, автономні інвертори, широтно-імпульсні перетворювачі – при застосуванні простих ключових моделей вентилів можна представити у вигляді «еквівалентний генератор» – «навантаження». Виходячи з цих міркувань, оптимальними є методи та алгоритми розрахунку електромагнітних процесів у силових колах перетворювачів, орієнтовані на використання лінійних чи кусочно-лінійних моделей пасивних елементів і ключових моделей силових напівпровідникових пристроїв (діодів, транзисторів, тиристорів тощо) і призначені для розрахунку процесів в перетворювачах із змінною структурою. Аналогічним чином може бути здійснене моделювання складних функцій сигналів еквівалентних генераторів з функціями модуляції (широтно-імпульсна, частотно-імпульсна, фазо-імпульсна модуляції).

3.2. *Моделювання періодичних процесів та завдань у системах з ПЕЕ.* Загальний підхід до розрахунків систем з ПЕЕ методом окремих складових з використанням перетворення Лапласа полягає у побудові моделі «генератор» – «перетворювач» – «навантаження» (система $\{Г\}-\{ПЕЕ\}-\{Н\}$), де періоди роботи елементів множин генераторів $\{Г\}$, власне перетворювачів $\{ПЕЕ\}$ та навантажень $\{Н\}$ дорівнюють відповідно $T_Г$, $T_{ПР}$ та $T_Н$. В подальшому така модель спрощується до системи «еквівалентний генератор» – «еквівалентне навантаження» $\{екв.Г\}-\{екв.Н\}$, відповідно до побудованих моделей [2].

Таблиця 2

Тип	Назва	Базова функція $f_{Б,i}(t)$	Зображення $F_{Б,i}(t)$
1	Функція рівня	$f_{Б,1}(t) = A$	$F_{Б,1}(t) = \frac{A}{p}$
2	Синусоїдальна функція	$f_{Б,2}(t) = \sin \omega t$	$F_{Б,2}(t) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
3	Експоненційна функція	$f_{Б,3}(t) = e^{-\sigma t}$	$F_{Б,3}(t) = \frac{1}{p + \sigma}$
4	Функція прямої пропорційності	$f_{Б,4}(t) = At$	$F_{Б,4}(t) = \frac{A}{p^2}$

Вихідні напруги генератора $u_Г(t)$ та навантаження $u_Н(t)$ на періоді роботи системи з ПЕЕ $T_Г$ у загальному випадку розглядаються як промодульовані відповідною функцією модуляції $f_{Г,М}(t, П_{Г,М}, \omega_{Г,М})$ та $f_{Н,М}(t, П_{Н,М}, \omega_{Н,М})$, де $\omega_{Г,М}$ та $\omega_{Н,М}$ – частота модуляції для генератора та навантаження; $П_{Г,М}$ та $П_{Н,М}$ – множина параметрів модуляції для генератора та навантаження. Функції модуляції $f_{Г,М}(t, П_{Г,М}, \omega_{Г,М})$ і $f_{Н,М}(t, П_{Н,М}, \omega_{Н,М})$ можуть бути як заздалегідь відомі, так і задаватися в реальному масштабі часу системою управління чи визначатися характером протікання енерготехнологічних чи/та технологічних процесів, що детально розглянуто у [3].

Наступним етапом є побудова зображень функції сигналу еквівалентного генератора $F_Г(p)$ функції сигналу $u(t)$. Наприклад, для випадку прямокутних імпульсів амплітудою U_i така функція має вигляд:

$$F_{II}(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} \quad (1)$$

У таблиці 2 наведено зображення для різних типів простих функцій, що дозволяють змодельовати практично будь-який сигнал еквівалентного генератора.

Зображення струмів на інтервалах знаходиться відповідно до закону Ома, що діє і в області зображень, розраховується за формулою:

$$I_i(p) = U_i / Z_i, \quad (2)$$

відповідно, попередньо визначається зображення навантаження, яке на різних інтервалах може мати різні значення.

Оригінал струму на інтервалі знаходиться як різниця перехідного $i_{p,i}(t)$ (що є результатом роботи генератора на інтервалі, який розраховується) та вільного (що є результатом роботи генераторів на всіх інших інтервалах, крім того, який розраховується) $i_{v,i}(t)$ струмів за формулою:

$$i_i(t) = i_{p,i}(t) - i_{v,i}(t). \quad (3)$$

При визначенні перехідного струму враховуються складові функції генератора, що діють лише на інтервалі, що розраховується, в свою чергу при розрахунку вільного струму використовуються лише корені, що визначаються навантаженням.

3.3. Можливості розрахунків характеристик роботи систем з ПЕЕ. Аналітичний вигляд функцій напруги та струму дозволяє здійснити розрахунки у аналітичному вигляді характеристик електричної енергії. Відповідно до ДСТУ якості електроенергії, основними є діючий та середній струми, амплітудні максимуми та мінімуми, коефіцієнти форми, пульсацій за амплітудним значенням, пульсацій за діючим значенням, пульсацій за середнім значенням, амплітуди. При гармонічному аналізі функцію досліджуються також коефіцієнти гармонік, амплітуди гармонік тощо. Отримання функцій струмів на інтервалах у аналітичному вигляді дає змогу здійснити точні розрахунки цих коефіцієнтів та уникнути застосування чисельних методів з похибками [14].

Наприклад, розрахунок середнього струму здійснюється за формулою:

$$i_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (4)$$

а розрахунок діючого струму – за формулою:

$$i_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (5)$$

де вигляд функцій струмів отримано з розрахунків за методом окремих складових.

Також однією з ключових проблем роботи систем роззосередженої генерації з ПЕЕ є стабільна робота системи під дією імпульсних періодичних завад, адже при роботі системи електроживлення використовуються різноманітні перетворювачі електроенергії, які є джерелом завад в мережі.

Одним з найбільш оптимальних шляхів розв'язання подібних задач у моделях «генератор» – «навантаження» (здійснення інженерних розрахунків при проектуванні, вибір оптимальних параметрів елементів систем з перетворювачами електроенергії, оптимізація процедур у системах керування, кількісний та якісний аналіз вихідних характеристик та проведення енергоаудиту систем з перетворювачами електроенергії тощо) є розширення використання аналізу на основі методу окремих складових, який дозволяє отримати функції струму та напруги у аналітичному вигляді.

Такі розрахунки дозволяють не лише визначати аналітичний розклад сигналів струму навантаження у гармонічний спектр, аналітичні вирази активної потужності P , реактивної потужності Q , потужності Фризе Q_Φ , а також створює можливості для здійснення параметричного аналізу роботи системи з ПЕЕ при зміні початкових параметрів генератора та навантаження, зміні закону керування тощо. І, окрім того, дозволяє здійснити розрахунки параметрів та режимів роботи компенсатора реактивної потужності (C_k).

4. Інтелектуальні системи керування системами енергоживлення.

Ключовим питанням для розуміння моделей споживання енергії у локальних енергосистемах населених пунктів і належних відповідей на виклики, пов'язані із стабільністю їх роботи та енергетичною безпекою необхідно є здійснення відповідного збору та аналізу даних і впровадження сучасних підходів до вдосконалення локальних енергосистем [24].

Наразі ці питання переважно відносяться до елементів загальної концепції «Розумного міста», одним з напрямків якої є управління генерацією та споживанням електроенергії – Smart Grid («розумні» мережі), що передбачає використання цифрових технологій для ефективного розподілу і споживання енергії [1].

4.1. Підходи SmartGrid та MicroGrid у загальній концепції «Розумне місто». Система «SmartGrid» або «MicroGrid», коли мова йде про більш локальний рівень з невеликою кількістю учасників і вищою автономізацією, є проміжним рівнем між сукупністю всіх кінцевих виробників, споживачів та зберігачів енергії та загальною Єдиною енергетичною системою на рівні країни та міждержавного регіону [8].

Місією таких систем є оптимізація енергопостачання на певному рівні спільноти – віддаленого поселення, промислового комплексу, мікрорайону, населеного пункту, регіону. Відповідно, і складність таких систем є досить різною – за загальним підходом: керування генерацією, збереженням та споживанням електроенергії на основі потоків даних у реальному часі, математичного прогнозування, забезпечення необхідних параметрів електроенергії та максимально стійкої роботи систем критичної інфраструктури [13].

Для прикладу, під MicroGrid можна розуміти мережу поєднаних між собою у мережу «розумних будинків», що є не лише споживачами електроенергії, а й мають власні альтернативні джерела генерації електроенергії (сонячні батареї, вітряки, дизель-генератори), а часом і системи збереження енергії. Сучасні можливості інформаційних технологій забезпечують якісно новий рівень управління такою локальною енергосистемою, що разом з тим залишається відкритою – тобто має підключення до Єдиної енергосистеми країни, як для споживання, так і для генерації електроенергії [16].

4.2. Досвід та тенденції запровадження SmartGrid у сучасних містах. Наразі ключовими ініціаторами впровадження підходів SmartGrid є великі міста – з одного боку, через значні коливання споживання, наявність великої кількості об'єктів критичної інфраструктури, з іншого – через потребу динамічного розвитку, технічні можливості для якого не завжди здатні забезпечити енергопостачальні компанії або ж такі заходи за традиційними технологіями є занадто витратними. Разом з тим муніципалітети виступають і як інвестори та оператори альтернативних генеруючих потужностей.

Наприклад, у другому за величиною японському місті Йокогама (населення 3,7 млн жителів) у 2010 році започатковано проект Yokohama Smart City, що забезпечив впровадження систем SmartGrid для управління енергетичними потребами домогосподарств, будівель та місцевих громад. Наразі містом встановлено понад 260 блоків сонячних батарей, які забезпечують близько 37 МВт генерації, розгорнуто систему прокату понад 2000 електромобілів та створено єдиний обчислювальний центр керування SmartGrid [18].

Відповідно до загальної концепції Yokohama Smart City, до SmartGrid передбачається інтегрувати зовнішню електрогенерацію, локальні джерела генерації енергії (сонячні та вітряні станції), системи збереження енергії, «розумні будинки», систему громадського транспорту (електробуси) з можливістю швидкої заміни батарей та інфраструктуру для електромобілів з швидкими зарядними станціями у місті та нічними зарядними пристроями у гаражах.

У січні 2018 року британська компанія Juniper Research опублікувала результати дослідження, назвавши п'ять міст світу, які активно розвивають Smart Grid-технології. Аналітики відзначають, що до 2022 року впровадження Smart Grid дозволить жителям економити близько \$ 14 млрд на рік [12].

Лідером рейтингу став Сеул, де наразі вже понад 160 тисяч домашніх сонячних електростанцій, а у 2022 році місто планує обладнати сонячними панелями всі громадські будівлі та понад 1 млн приватних будинків. У Південній Кореї передбачається вже у 2020 році встановити «розумні лічильники» у всіх домогосподарствах країни, а до 2030 року – обладнати системами SmartGrid всі електромережі та залучити близько 30% громадян як активних учасників енергоринку країни [23].

Серед системних можливостей для міст – і використання електромобілів для зберігання енергії. Застосування технології Vehicle to Grid та будівництво містами енергопаркінгів з відповідними мережами та підключеннями створює можливість залучати власників електромобілів до міського енергоринку. Також перспективним є застосування такого підходу при створенні мереж прокату електромобілів – коли користувачі їх отримують та залишають на спеціальних станціях, обладнаних зарядним обладнанням [25].

Для побудови таких систем доречно також використовувати існуючі міські електромережі освітлення, а особливо громадського електротранспорту. Підстанції метрополітену, трамвайних та тролейбусних мереж розташовані в різних районах міста, до того ж вночі вони практично не використовуються. Актуальним є і поширення електробусів – не лише як виду транспорту, а й як мобільних резервних джерел електроенергії для об'єктів критичної інфраструктури.

4.3. Енергоринок громади: запит на нові економіко-правові моделі. Головними інтересантами запровадження SmartGrid є громад населених пунктів – міст, селищ, сіл, адже далеко не всі виклики здатні опрацювати великі енергокомпанії, які, наприклад, не надто зацікавлені у енергозбереженні кінцевими споживачами. Поки поняття «енергетична політика міста» наразі стає більш ширшим поняттям ніж просто запровадження енергоефективних технічних рішень, особливо коли мова йде про забезпечення динамічного розвитку громади.

Енергосистеми міст пройшли історичний шлях від локального формування до інтеграції у Єдину енергосистему країни – однак наразі, як і в багатьох інших сферах життя, актуальною є децентралізація, в тому числі енергоринку, як генерації, так і передачі електроенергії, адже запровадження нових технічних рішень, у яких не надто зацікавлені енергетичні компанії і вкрай зацікавлені муніципалітети, потребують відповідних повноважень та ресурсів.

У кращому положенні знаходяться міста, що мають системи електротранспорту: їх енергетичні мережі та підстанції знаходяться у власності комунальних підприємств, тобто міської громади – як і сто років тому. Запровадження енергозберігаючих технологій у електротранспорті та нові виклики, пов'язані із забезпеченням роботи систем альтернативної розподіленої генерації у містах (сонячні батареї на дахах, сміттєпереробні заводи, вітряки), систем зберігання енергії, мережі електромобілів, електросамокатів та громадського електротранспорту дозволяють сформувати нові цілі і завдання з розвитку інтегрованих міських електромереж, що знаходяться у власності муніципалітетів.

Таким чином, дерегуляція енергоринку в частині генерації, збереження, керування споживанням та передачі електроенергії, з передачею відповідних ресурсів енергокомпаній-постачальників та регуляторних повноважень органам місцевого самоврядування надасть великий стимул розвитку сучасних технологій SmartGrid у населених пунктах, залучення інвестицій та підвищення свідомості споживачів електроенергії у загальній справі скорочення споживання електроенергії та скорочення викидів, що впливають на зміни клімату у локальному та глобальному контекстах.

Висновки

Нові технології у сферах енергетики та інформатизації надають нові можливості для вдосконалення енергосистем населених пунктів, що значно впливає і на якість життя мешканців, і на можливості для ділової активності, і на поліпшення екологічної ситуації. У поєднанні з концепцією децентралізації влади та підвищення значення населених пунктів і їх об'єднань це створює передумови для децентралізації енергосистем, підвищення енергоефективності та стійкості інфраструктур до природних та техногенних ризиків.

Ключовими напрямками розвитку енергосистем населених пунктів є подальша інформатизація та застосування технологій «великих даних», зокрема запровадження інтелектуальних лічильників, систем керування споживанням з диференціацією тарифів та визначенням критичних споживачів, застосування гнучких інтелектуальних алгоритмів координації роботи споживачів та систем розподіленої генерації та збереження електроенергії.

При цьому актуальним є використання методів розрахунків систем з ПЕЕ, що дозволяють отримати енергетичні характеристики і параметри електроенергії у аналітичному вигляді, зокрема, метод окремих складових, адаптованих для розрахунку систем зі складними формами еквівалентних генераторів та навантажень.

Разом з тим зростає роль домогосподарств та інших кінцевих споживачів електроенергії (офісні та торговельні центри, громадські заклади, невеликі підприємства) – завдяки новим технологіям вони мають змогу не лише здійснювати заходи з енергозбереження, а й долучитися до локального енергоринку, встановлюючи власні системи генерації, в тому числі резервної, зберігання електроенергії, і вносячи свій внесок до інформаційної системи SmartGrid шляхом запровадження інтелектуальних технологій керування власними енергосистемами.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика. – 2014. – № 1. – С. 7-21.
2. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // Пр.Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб.наук.пр. – 2003. – №3(6). – С. 102-108.
3. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у колах з циклічно змінюваними параметрами // Електроніка і зв'язок. – 2005. – №26. – С.29-36.
4. Загальноукраїнська та статистична інформація європейських інституцій для надання споживачам ключової інформації про споживання ними енергоресурсів та надані комунальні послуги у 2018 році. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. 08.04.2019. URL: <https://www.facebook.com/nerc.gov.ua/posts/1058327981043141> (дата звернення 20 березня 2020 р.)
5. Кириленко О. В. Денисюк С. П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // Енергосбережение. Енергетика. Енергоаудит. Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т. 2 : Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 82-94.

6. Лукомський Д.В. Облачное будущее для солнечных электростанций в Украине. Економічна правда. 31.10.2019. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/10/31/653184/> (дата звернення 20 лютого 2020 р.)
7. Мазур М. В. Статистичний аналіз постачання та споживання енергії з відновлюваних джерел в Україні // Ефективна економіка – № 12. – 2014. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3618> (дата звернення 03 березня 2020 р.)
8. Мороз О.М. Використання технологій SmartGrid для підвищення ефективності електропостачання споживачів. Мороз О.М., Черемісін М.М., Савченко О.А., С.А. Попадченко, Дюбко С.В.// Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. № 3
9. Підсумки роботи електроенергетики у 2003 році. Міністерство енергетики та захисту довкілля України. 20.02.2004. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=93994 (дата звернення 22 березня 2020 р.)
10. Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України за 2019 рік. Інформаційно-аналітичне дослідження стану паливно-енергетичного комплексу України. «Енергоінформ – Інформенерго». – № 577. URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf> (дата звернення 12 березня 2020 р.)
11. Рівні цін на універсальні послуги для побутових та малих непобутових споживачів, у тому числі для побутових та малих непобутових споживачів, які є користувачами малої системи розподілу, що вводяться в дію з 01 квітня 2020 року. ТОВ «Київська обласна енергопостачальна компанія». 10.03.2020 URL: <https://koec.com.ua/page?root=23> (дата звернення 11 березня 2020 р.)
12. «Розумним» містам потрібні «розумні» мережі. Новое время. 20.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/so-skorostyu-sveta/rozumnim-mistam-potribni-rozumni-merezhi-50060324.html> (дата звернення 18 лютого 2020 р.)
13. Типс Б., Тафт Дж. Концепция Cisco Smart Grid: Решения по автоматизации подстанций для диспетчерских служб. – Корпорация Cisco. – 2010. URL: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf (дата звернення 10 березня 2020 р.)
14. Чашко М.В. Передача электроэнергии импульсами // – Техн. Електродинаміка. Темат. випуск 2003. – С. 124-127.
15. Cities are at the frontline of the energy transition. 07.09.2016. URL: <https://www.iea.org/news/cities-are-at-the-frontline-of-the-energy-transition> (дата звернення 02 березня 2020 р.)
16. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4(46). – С.7–17. (дата звернення 14 лютого 2020 р.)
17. Energy consumption in households. May 2019. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households (дата звернення 01 березня 2020 р.)
18. Energy Management System. Yokohama Smart City Project (YSCP) Shinba H., Hirashima T., Hori Y., Uyama T. // Meiden Review Series. – №.169. – 2017. URL: https://www.meidensha.co.jp/rd/rd_02/rd_02_02/rd_02_02_06/rd_02_02_05_01/_icsFiles/fieldfile/2017/02/20/Review_169_01_web_170201.pdf (дата звернення 20 березня 2020 р.)
19. Energy storage systems: industrial and domestic. 09.04.2019. URL: https://avenston.com/en/articles/energy_storage_systems/ (дата звернення 24 березня 2020 р.)
20. Gerhard J. Home Automation & Wiring. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics. 1999-03-31. URL: <https://archive.org/details/homeautomationwi0000gerh> (дата звернення 20 березня 2020 р.)
21. How much electricity does a home use? OVO Foundation. URL: <https://www.ovoenergy.com/guides/energy-guides/how-much-electricity-does-a-home-use.html> (дата звернення 10 березня 2020 р.)
22. How to Secure Reliable Power. Supply to Mega Cities. Final Report. October 30. – 2015. URL: http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes_CME/How_to_Secure_Reliable_Power_Supply_to_Mega_Cities.pdf (дата звернення 22 лютого 2020 р.)
23. National Energy Technology Laboratory. NETL Modern Grid Initiative – Powering Our 21st-Century Economy journal. – United States Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2007. – August. – P. 17. (дата звернення 11 березня 2020 р.)
24. Pranab K.R., Weaver J.E., Weber E.M., Dalton L., LeDoux T.M., Rose A.N.. Electricity consumption patterns within cities: application of a data-driven settlement characterization method. International Journal of Digital Earth. № 13, 2020 – Issue 1: Patterns and Processes of Global Human Settlement Development and Dynamics. P.119-135. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2018.1556355> (дата звернення 16 лютого 2020 р.)

25. Ross, J.W.; Sebastian, I. M.; Beath, C.M. (2017). «How to Develop a Great Digital Strategy» (PDF). MITSloan Management Review. Vol. 58 (2). URL: http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2017/58204.pdf (дата звернення 17 березня 2020 р.)

26. Smart Grid: попасть в сеть. Новое время. 24.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukraine/so-skorostyusveta/smart-grid-popast-v-set-50057381.html> (дата звернення 24 березня 2020 р.)

Н. Melnychuk, master of industrial electronics, ORCID 0000-0002-8173-0472
Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine

ENERGY MANAGEMENT OF SETTLEMENTS AND TERRITORIES BASED ON INTELLECTUAL SYSTEMS OF POWER SUPPLY CONTROL

The purpose of the research is to determine the tendencies of development of power grids of settlements and optimal approaches to their analysis and calculations in the conditions of introduction of technological innovations in the field of information and energy technologies, as well as decentralization of settlements. The article reviews modern approaches and technical solutions, details the issues of SmartGrid formation by combining the introduction of smart approaches and integrated electricity generation, consumption and storage systems. Important aspects of SmartGrid formation in settlements include the need to develop municipal management systems within individual homes and complexes, as well as the formation of an integrated transportation system that includes both public transport and individual vehicles of various types and forms of ownership. In general, the combination of the efforts of local governments, commercial and non-profit institutions, homeowners and local residents is identified as an important prerequisite for successful SmartGrid formation in settlements. The result of the work is to identify current trends in the development of power systems of settlements, in particular, the need to form an intermediate link of energy policy - at the level of settlements and territories that connect local participants in the energy market (generation, storage and consumption of electricity) and act as integrated active participants of the national energy country and national energy market. There is also justification of the relevance of the methods of calculation of power systems, in particular, the extension of the method of individual components based on Laplace transformations and operator calculations, which allow to obtain energy characteristics and parameters of electricity in analytical form for use in intelligent power management systems. As a result, the study confirms the need to further refine the SmartGrid concept by integrating elements of energy systems, intellectualizing management processes and developing new approaches to energy market decentralization.

Key words: SmartGrid, power supply, power grids, energy management, settlements, decentralization, electric transport.

References

1. Denysiuk S. Technological landmarks for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Power engineering. – 2014. – № 1. – P. 7-21. (in Ukrainian)
2. Denysiuk S., Melnychuk H. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // ПІН-ту електродинаміки НАН України. Зб.наук.п – 2003. – №3(6). – С. 102-108. (in Ukrainian)
3. Denysiuk S., Melnychuk H. Constructing Laplace transform in the analysis of electromagnetic processes in circles with cyclically changing parameters // Electronics and communication. – 2005. – №26. – P.29-36. (in Ukrainian)
4. National and statistical information from European institutions to provide consumers with key information on their energy consumption and utilities in 2018. National Commission for the State Regulation of Energy and Utilities. 08.04.2019. URL: <https://www.facebook.com/nerc.gov.ua/posts/1058327981043141> (accessed 20 March 2020). (in Ukrainian)
5. Kyrylenko O., Denysiuk S. Current tendencies of construction and management of modes of power grids // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – P. 82-94. (in Ukrainian)
6. Lukomsky D. Cloud future for solar power plants in Ukraine. Economic truth. 31.10.2019. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/10/31/653184/> (accessed 20 February 2020) (in Ukrainian)
7. Mazur M. Statistical analysis of energy supply and consumption from renewable sources in Ukraine // Effective Economy – № 12. – 2014. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3618> (accessed 03 March 2020) (in Ukrainian)
8. Moroz O. Use of SmartGrid technologies to improve the efficiency of electricity supply to consumers. Moroz O., Cheremisin M., Savchenko O., Popadchenko S., Dubko S. // Energy: Economics, Technologies, Ecology. – 2017. № 3 (in Ukrainian)

9. Results of the work of the electric power industry in 2003. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine. 20.02.2004. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=93994 (accessed 22 March 2020) (in Ukrainian)
10. About the main performance indicators of the fuel and energy complex of Ukraine for 2019. Information-analytical study of the state of the fuel and energy complex of Ukraine. Energoinform - Informenergo. – № 577. URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf> (accessed 12 March 2020) (in Ukrainian)
11. Price levels for universal services for residential and small non-residential customers, including for residential and small non-residential customers who are users of a small distribution system, effective from 1 April 2020. LLC «Kyiv Regional Energy Supply Company». 10.03.2020 URL: <https://koec.com.ua/page?root=23> (accessed 11 March 2020). (in Ukrainian)
12. «Smart» cities need «smart» networks. New time. 20.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/so-skorostyu-sveta/rozumnim-mistam-potribni-rozumni-merezhi-50060324.html> (accessed 18 February 2020). (in Ukrainian)
13. Tipes B., Taft J. Cisco Smart Grid Concept: Substation Automation Solutions for Dispatching Services. –Corporation Cisco. – 2010. URL: (in Ukrainian) https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf (accessed 10 March 2020) (in Ukrainian)
14. Chashko MV Transmission of electricity by pulses // - Tech. Electrodynamics. Subject Issue 2003. – P. 124-127. (in Russian)
15. Cities are at the frontline of the energy transition. 07.09.2016. URL: <https://www.iea.org/news/cities-are-at-the-frontline-of-the-energy-transition> (accessed 02 March 2020)
16. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Energy: Economics, Technologies, Ecology. – 2016. – №4(46). – C.7–17. (accessed 14 February 2020)
17. Energy consumption in households. May 2019. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households (accessed 01 March 2020)
18. Energy Management System. Yokohama Smart City Project (YSCP) Shinba H., Hirashima T., Hori Y., Uyama T. // Meiden Review Series. – №.169. – 2017. URL: https://www.meidensha.co.jp/rd/rd_02/rd_02_02/rd_02_02_06/rd_02_02_05_01/_icsFiles/afieldfile/2017/02/20/Review_169_01_web_170201.pdf (accessed 20 March 2020)
19. Energy storage systems: industrial and domestic. 09.04.2019. URL: https://avenston.com/en/articles/energy_storage_systems/ (accessed 24 March 2020)
20. Gerhard J. Home Automation & Wiring. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics. 1999-03-31. URL: <https://archive.org/details/homeautomationwi0000gerh> (accessed 20 March 2020)
21. How much electricity does a home use? OVO Foundation. URL: <https://www.ovoenergy.com/guides/energy-guides/how-much-electricity-does-a-home-use.html> (accessed 10 March 2020)
22. How to Secure Reliable Power. Supply to Mega Cities. Final Report. October 30. – 2015. URL: http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes_CME/How_to_Secure_Reliable_Power_Supply_to_Mega_Cities.pdf (accessed 22 February 2020)
23. National Energy Technology Laboratory. NETL Modern Grid Initiative – Powering Our 21st-Century Economy journal. – United States Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2007. – August. – P. 17. (accessed 11 March 2020)
24. Pranab K.R., Weaver J.E., Weber E.M., Dalton L., LeDoux T.M., Rose A.N.. Electricity consumption patterns within cities: application of a data-driven settlement characterization method. International Journal of Digital Earth. № 13, 2020 – Issue 1: Patterns and Processes of Global Human Settlement Development and Dynamics. P.119-135. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2018.1556355> (accessed 16 February 2020)
25. Ross, J.W.; Sebastian, I. M.; Beath, C.M. (2017). «How to Develop a Great Digital Strategy» (PDF). MITSloan Management Review. Vol. 58 (2). URL: http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2017/58204.pdf (accessed 17 March 2020)
26. Smart Grid: Get online. New time. 24.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukraine/so-skorostyu-sveta/smart-grid-popast-v-set-50057381.html> (accessed 24 March 2020). (in Ukrainian)

Надійшла 08.11.2019
Received 08.11.2019