

A. M. ЧЕРНЮК, I. G. КИРИСОВ, Є. I. КАЧАНОВ

ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ГЕНЕРАЦІЇ ТА СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ З УРАХУВАННЯМ ФАКТОРУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПОГОДНИХ ТА КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

Проведено аналіз процесу генерації, передачі, розподілу та споживання електричної енергії в електроенергетичних системах з розподіленою генерацією. Розглянуті особливості характерних режимів роботи об'єктів розподіленої генерації та їх вплив на показники надійності електропостачання та якості електричної енергії у споживачів. Визначено, що процес генерації електричної енергії джерелами розподіленої генерації та процес споживання електричної енергії значною мірою залежить від погодних та кліматичних умов та характеризується суттєвим рівнем невизначеності, що негативно впливає на складання балансу виробленої та спожитої електричної енергії. Визначено, що можливий небаланс у процесі електропостачання споживачів суттєво погіршує показники якості електричної енергії в мережі. Вказано на актуальність даної науково-технічної проблеми та визначено можливі методи та засоби забезпечення показників надійності електропостачання та якості електричної енергії в мережах з розподіленою генерацією. Проаналізовано вплив погодних умов на процес генерації електричної енергії сонячними та вітровими електростанціями та кліматичних умов на процес генерації електричної енергії малими та мікро гідроелектростанціями та електростанціями, які працюють на основі біогазових технологій та органічного відновлювального первинного палива. Визначено особливості генерації електроенергії вказаними типами електростанцій та можливі прогнозовані показники, які впливатимуть на процес управління даними об'єктами розподіленої генерації. Визначено засоби та резерви управління генерацією та споживанням електричної енергії в електроенергетичних мережах з розподіленою генерацією. Запропоновано загальну концепцію вибору та розробки засобів управління процесом електропостачання в системах з розподіленою генерацією, яка враховує фактори значної невизначеності вхідних параметрів та заснована на теорії побудови надійних систем з ненадійних елементів.

Ключові слова: розподілена генерація, якість електричної енергії, управління, погодне та кліматичне прогнозування, невизначеність, енергетичний баланс, алгоритм, відхилення напруги.

A. M. ЧЕРНЮК, И. Г. КИРИСОВ, Е. И. КАЧАНОВ

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ С УЧЕТОМ ФАКТОРА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОГОДНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Проведен анализ процесса генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии в электроэнергетических системах с распределенной генерацией. Рассмотрены особенности характерных режимов работы объектов распределенной генерации и их влияние на показатели надежности электроснабжения и качества электрической энергии у потребителей. Определено, что процесс генерации электрической энергии источниками распределенной генерации и процесс потребления электрической энергии в значительной степени зависит от погодных и климатических условий и характеризуется существенным уровнем неопределенности, которая негативно влияет на составление баланса выработанной и потребленной электрической энергии. Определено, что возможный небаланс в процессе электроснабжения потребителей существенно ухудшает показатели качества электрической энергии в сети. Указано на актуальность данной научно-технической проблемы и определены возможные методы и средства обеспечения показателей надежности электроснабжения и качества электрической энергии в сетях с распределенной генерацией. Проанализировано влияние погодных условий на процесс генерации электрической энергии солнечными и ветровыми электростанциями и климатических условий на процесс генерации электрической энергии малыми и микро гидроэлектростанциями и электростанциями, которые работают на основе биогазовых технологий и органического возобновляемого первичного топлива. Определены особенности генерации электроэнергии указанными типами электростанции и возможные прогнозные показатели, которые будут влиять на процесс управления данными объектами распределенной генерации. Определены средства и резервы управления генерацией и потреблением электрической энергии в электроэнергетических сетях с распределенной генерацией. Предложена общая концепция выбора и разработки средств управления процессом электроснабжения в системах с распределенной генерацией, которая учитывает факторы значительной неопределенности входных параметров и основана на теории построения надежных систем из ненадежных элементов.

Ключевые слова: распределенная генерация, качество электрической энергии, управления, погодное и климатическое прогнозирование, неопределенность, энергетический баланс, алгоритм, отклонение напряжения.

A. M. CHERNIUK, I. G. KIRISOV, I. I. KACHANOV

MANAGEMENT FACILITIES BY GENERATION AND CONSUMPTION OF ELECTRIC ENERGY IN ELECTROENERGY SYSTEMS WITH THE UP-DIFFUSED GENERATION TAKING INTO ACCOUNT FACTOR OF VAGUENESS OF WEATHER AND CLIMATIC TERMS

The analysis of process of generation, transmission, distribution and consumption of electric energy is conducted in the electroenergy systems with the up-diffused generation. The features of the characteristic modes of operations of objects of the up-diffused generation and their influence are considered on reliability of power supply and quality of electric energy indexes for consumers. Certainly, that the process of generation of electric energy the sources of the up-diffused generation and process of consumption of electric energy largely depend on weather and climatic terms and is characterized the substantial level of vagueness that negatively influences on drafting of balance of mine-out and consumed electric energy. It is certain that possible not-balance in the process of power supply of consumers substantially worsens the indexes of quality of electric energy in a network. It is indicated on actuality of this scientific and technical problem and possible methods and backer-ups of reliability of power supply and quality of electric energy indexes are certain in networks with the up-diffused generation. Influence of weather terms is analysed on the process of generation of electric energy and

© A. M. Чернюк, I. G. Кирисов, Є. I. Качанов, 2020

climatic terms sunny and wind power-stations on the process of generation of electric energy small and the hydroelectric power and power-stations that work as on the basis of biogas technologies and organic proceeded in primary fuel. The features of generation of electric power the indicated types of power station and possible prognosis indexes that will influence on the process of management these objects of the up-diffused generation are certain. Facilities and management backlogs are certain by a generation and consumption of electric energy in electroenergy networks with the up-diffused generation. General conception of choice and development of management facilities offers by the process of power supply in the systems with the up-diffused generation that takes into account the factors of considerable vagueness of entry parameters and based on the theory of construction of the reliable systems from unreliable elements.

Keywords: the up-diffused generation, quality of electric energy, management, weather and climatic prognostication, vagueness, power balance, algorithm, rejection of tension.

Вступ. Сучасний стан вітчизняної енергетики говорить про значну потребу у новітніх технологіях генерації, передачі, розподілу та споживання електричної енергії. На даний час енергетична галузь України знаходиться в стані перехідних трансформацій, які обумовлені переходом країни від енергоємного індустріального виробництва до децентралізованої системи господарювання зі значною долею сільськогосподарського виробництва та розвинутими системами малого та середнього бізнесу, економіки сфери послуг, інтелектуальних технологій, тощо [1–3]. У зв'язку з цим в українській енергетиці намітилися наступні тенденції до децентралізації ринку енергетичних послуг.

1. У зв'язку з втратою контролю над окремими регіонами Донецької та Луганської областей та недружнім становищем з боку Росії, поставки звичних первинних енергетичних ресурсів (вугілля та природного газу) стали ненадійними та значно подорожчали. Як наслідок на теплових електростанціях присутній профіцит генеруючих потужностей, які не можуть бути завантажені первинним енергоресурсом, а структура генерації електричної енергії змінилася у частині збільшення долі атомних і гідроелектростанцій (ГЕС) [4]. Однак, на даний час Україна не має достатніх енергетичних резервів, щоб остаточно відмовитись від викопних енергоресурсів, а це призводить до постійного підвищення вартості одиниці генерованої електроенергії.

2. Постійне підвищення тарифів та водночас здешевлення комплектуючих на сонячні та вітрові електростанції призвело до розвитку технологій генерації електроенергії за допомогою альтернативних джерел живлення (насамперед сонячні та вітрові електростанції). В цьому сегменті слід виділити два основних типи електростанцій – це потужні промислові електростанції, метою яких є генерація електричної енергії до єдиної енергосистеми, та електростанції під власне споживання задля забезпечення енергією об'єктів малого та середнього бізнесу і комунально-побутових потреб населення з можливістю продажу її надлишків через мережі єдиної енергосистеми.

3. Поступово відбувається зміна свідомості громадян країни в частині позитивного сприйняття ідей екологічно-чистої енергії та промисловості максимально дружньої до навколишнього середовища, що обумовлює подальший розвиток систем генерації електричної енергії на основі відновлювальних джерел живлення.

4. Трансформації українського суспільства мають тенденцію до децентралізації влади, що також дає

поштовх до розвитку систем розподіленої генерації, завдяки яким місцеві громади мають змогу забезпечити собі власну енергетичну незалежність.

Таким чином, шлях розвитку енергосистем України в напрямку децентралізації є очевидним, а питання побудови надійних систем розподіленої генерації є науково-актуальними.

Аналіз стану питання. Системи з розподіленою генерацією електричної енергії в українських реаліях базуються переважно на сонячних та вітрових електростанціях малої встановленої потужності (від 5 до 30 кВт), що обумовлено умовами підключення до «зеленого тарифу». На даний час їх внесок в сумарну генерацію є мізерним та не має значного впливу на роботу єдиної енергосистеми. Однак вже зараз встановлення кількох сонячних електростанцій на одній сільській магістралі може значною мірою змінювати показники якості електроенергії у інших суміжних споживачів, під'єднаних до вказаної магістральної лінії. Окрім цього масове спорудження альтернативних електростанцій навіть під власне енергоспоживання без видачі електроенергії в мережу може вносити свої корективи в режим роботи окремих ділянок мережі. Наприклад, розвантажена ділянка мережі стає економічно не рентабельною, оскільки витрати на її експлуатацію будуть перевищувати дохід від послуг електропостачання споживачів, які на ній ще залишилися. Запорукою надійної роботи електричних мереж із заданими показниками якості електричної енергії є дотримання відповідного балансу виробленої та спожитої електроенергії. Саме задля цього в мережі відбувається оперативне її управління.

Умовою дотримання енергетичного балансу в електричній мережі є узгодження усіх його складових – від попиту споживача до втрат в мережах та генерації зарядної потужності самою лінією електропередачі. Таким чином вихідними даними для складання вказаних балансів є параметри мережі, параметри системи, значення споживаних потужностей всіх споживачів, які задаються відповідними графіками електроспоживання. Узгодження усіх цих параметрів можливе за умови якщо їхні значення відомі заздалегідь з припустимою похибкою. Однак сучасні системи альтернативної генерації мають незадовільні прогнозні показники генерації електроенергії, бо вони напряму залежать від мінливих погодних умов. Таким чином маємо стохастичну систему зі значним рівнем невизначеності її параметрів, оскільки на відміну від класичних централізованих систем електропостачання вони мають значну варіативність не лише в частині споживання, а й в частині генерації електричної енергії [5].

Актуальною науково-технічною проблемою є розробка нових та вибір існуючих засобів управління процесом генерації, розподілення та споживання електричної енергії в стохастичних системах розподіленої генерації з метою побудови надійної системи електропостачання із заданими показниками якості електричної енергії.

Існуючі методи розв'язання задачі. Питанням управління в системах з розподіленою генерацією присвячено досить багато робіт, на підставі аналізу яких можна класифікувати основні існуючі напрямки вирішення даної проблеми.

В роботах [6, 7] запропоновано вирішення цієї проблеми на засадах концепції так званих віртуальних електростанцій, яка передбачає побудову системи управління на технічній базі інтелектуальних мереж Smart Grid із використанням можливостей управління генерацією джерелами живлення та використання можливих накопичувачів електричної енергії.

Деякі суттєві аспекти управління об'єктами розподіленої генерації, які приєднані до єдиної енергосистеми через глобальну мережу, розглянуті в роботах [8, 9]. Зазначено, що оперативними потужностями єдиної енергосистеми можливо забезпечити коректне управління процесом генерації об'єктів розподіленої генерації.

В роботі [10] авторами запропоновано використання відповідного програмного забезпечення задля автоматизації та інтелектуальної підтримки прийняття рішення диспетчерами районних розподільчих мереж при роботі з джерелами розподіленої генерації.

Таким чином впровадження систем розподіленої генерації технічно можливе, про що свідчить досвід розвинених країн.

Однак усі вказані автори пропонують адаптувати альтернативні джерела електроенергії до єдиної енергосистеми та здійснювати управління за рахунок її можливостей та з використанням маневрових потужностей, притаманних класичним електроенергетичним системам. При цьому практично не звертається увага на те, що в Україні навіть при долі генерації електроенергії альтернативними джерелами не більше 2 % від загальної її кількості вже відчутно дефіцит маневрових потужностей. Так нещодавно вже стала звичайною картина, коли в пік генерації сонячних електростанцій практично вся потужність українських гідроакумуляуючих електричних станцій (ГАЕС) спрямовується на споживання цієї виробленої електроенергії, бо цей пік не співпадає з графіком навантаження і потребами споживачів [11]. Так останнім часом у зв'язку із дефіцитом маневрових потужностей пропонується переводити в маневровий режим роботи окремі блоки теплових електростанцій та задля цього виводити їхні агрегати в гарячий резерв. В цьому випадку теплові електростанції будуть нести збитки внаслідок непродуктивної витрати пального без генерації електричної енергії, а це ще більше підніме тарифи на електричну енергію.

Виходячи з усього вищесказаного, актуальною науково-технічною проблемою розвитку

альтернативних джерел живлення та систем розподіленої генерації є розроблення методів та засобів управління об'єктами і системами розподіленої генерації, які були б самодостатніми та мінімально впливали би своїм режимом роботи на процеси в єдиній енергетичній системі.

Основний матеріал дослідження. Як показав попередній аналіз у альтернативної енергетики є значні перспективи зростання в Україні, але суттєвою проблемою на цьому шляху стає проблема адаптації альтернативних джерел живлення до єдиної енергетичної системи. Ця проблема обумовлена вкрай нестабільною та слабо прогнозованою генерацією вітровими та сонячними електростанціями (які становлять переважну більшість «зеленої» енергетики України). В результаті чого інші суб'єкти господарювання в енергетичній галузі вимушені нести збитки внаслідок зміни свого режиму роботи на маневровий та менш економічно вигідний.

Іншим шляхом розвитку систем розподіленої генерації є побудова альтернативних локальних енергетичних мереж місцевого рівня. На даний час такий досвід в Україні зустрічається майже як виключення з правил, бо локальні електричні мережі значно програють єдиній енергосистемі або в надійності електропостачання, або в якості електричної енергії. Проте розвиток інтелектуальних систем управління та здешевлення елементної бази таких систем щодня відкривають нові перспективи побудови і впровадження саме локальних енергосистем з подальшим їх об'єднанням. В табл. 1 наведено спрощену характеристику характерних джерел живлення, які можуть бути пристосовані для потреб електропостачання локальних електричних мереж.

Таблиця 1 – Характеристика джерел живлення

Назви джерел живлення	Собівартість електричної енергії	Прогнозованість генерації / надійність електропостачання	Маневреність
Вітрові електростанції	низька	низька	висока
Сонячні електростанції	низька	низька	висока
Біогазові електростанції	середня	висока	середня
Міні та мікро ГЕС	низька	середня	висока
Дизель генератори	висока	висока	висока

На жаль жодне з вказаних в таблиці джерело живлення окремо не може повноцінно виконувати функції надійного, економічного та якісного джерела енергії для загально-промислових та навіть побутових споживачів. Тому, єдиним варіантом досягнення поставленої мети буде побудова комплексної системи, на основі синергетичного підходу в процесі об'єднання наявних ресурсів.

При такому підході методами дослідження, окрім класичних теорій електротехніки, електричних мереж і систем та теорій управління, мають бути основи теорії вірогідності та побудови надійних систем з ненадійних елементів. Відповідно основам теорій вірогідності надійність роботи системи, яка складається з послідовно з'єднаних елементів дорівнює добутку вірогідностей кожного з них, а якщо елементи резервують один одного (тобто з'єднані паралельно) загальна вірогідність надійної роботи зростає.

На даному етапі розвитку техніки можна вважати вірогідність надійної роботи агрегатів альтернативних джерел живлення достатньо надійними, проте цього не можна сказати про кінцевий результат – про виробіток електричної енергії, бо вона напряму залежить від погодних та кліматичних умов, а вони здебільшого мають слабкі прогностичні показники, однак саме вітрові та сонячні електростанції мають найнижчу собівартість виробленої електроенергії (після завершення строку окупності). Тому пропонується побудова локальної системи комплексної генерації електроенергії з пріоритетним споживанням слабопрогнозованих джерел живлення та відповідним резервуванням за рахунок накопичення енергії та роботи більш прогнозованих джерел живлення. На рис. 1 представлена узагальнена структурна схема такої системи.

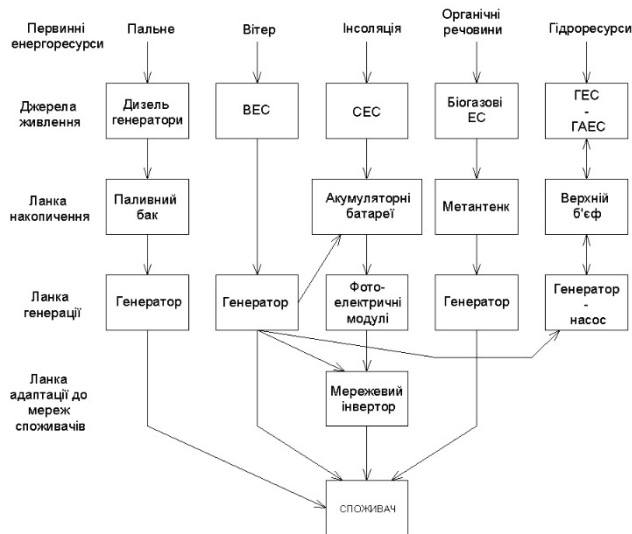


Рисунок 1 – Структурна схема комбінованої генерації

Відповідно до схеми система комплексної генерації має досить високу варіативність процесу електропостачання споживача за рахунок багатократного резервування та наявності в деяких технологічних ланцюгах елементів ланки накопичення енергії або енергоресурсів. Перевагою в електропостачанні споживача користуються найдешевші електростанції, такі як сонячні та вітрові. За прогностичними показниками зміни погоди і клімату вмикатимуться біогазові електростанції, які в звичайному режимі працюють на накопичення біогазу в метантенках. Ці електростанції не досить маневрові, тому їх слід вводити в дію на значний проміжок часу та за умови достовірних прогнозів по суттєвому

зниженню генерації вітовими чи сонячними електростанціями. Функцію маневрової генерації в даній системі виконують каскади ГЕС–ГАЕС, а дизель-генератори забезпечують останню ланку резервування живлення відповідальних споживачів в разі повної відмови усіх інших технологічних ланцюгів.

Таким чином за природно-кліматичних умов України можливо буде значною мірою забезпечити електропостачання місцеві сільські громади, електроспоживання яких відносно території, на якій вони функціонують, має незначну щільність електричних навантажень, а природні ресурси дозволяють повною мірою використовувати український енергетичний потенціал. Відповідно до наявних енергетичних ресурсів можливе утворення характерних кластерів локального енергозабезпечення, які, окрім власного енергозабезпечення, можуть слугувати джерелом резервного електропостачання для суміжних локальних енергокластерів. Таким чином на фрактально-кластерних засадах буде утворюватися нова модель розподіленої електричної мережі структурна схема якої представлена на рис. 2.

На схемі представлено схему видачі надлишкової електричної енергії до сторонніх споживачів. Під енерговузлами мається на увазі точки видачі надлишкової енергії та можливого її тримання у разі енергетичного дефіциту. Вочевидь чим більшу кількість енергії та на більшу відстань слід передати, тим більшу величину номінальної напруги слід застосовувати як енерговузлів, так і ліній електропередачі.

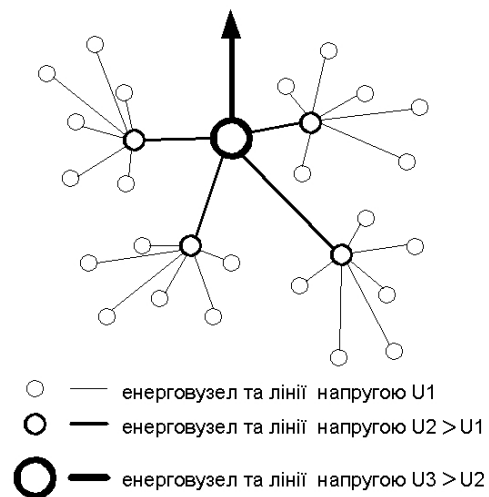


Рисунок 2 – Структурна схема розподіленої мережі, побудованої на фрактально-кластерних засадах

Таким чином, кластером першої ітерації буде слугувати первинна локальна енергетична система з загальною точкою зв'язку з мережею більш високої напруги. Сукупність декількох кластерів першої ітерації сформують кластер другої ітерації на більш високому рівні напруги, який об'єднає декілька первинних локальних енергосистем з можливістю обміну енергетичними потоками між собою. Подібним чином буде сформований кластер наступної ітерації і

так далі. Така структура має самоподібні фрактальні властивості та фрактальну розмірність [12].

Висновки. Аналіз стану проблеми показав недосконалість науково-технічного та організаційного забезпечення процесу впровадження альтернативних джерел живлення та систем розподіленої генерації в умовах української енергетики. В роботі запропоновано концепцію побудови надійних систем енергопостачання на основі альтернативних джерел живлення та використання наявних енергетичних резервів України, яка буде реалізована на принципах децентралізації енергетичної системи. Висунуті вимоги до показників надійності та критеріїв якості електричної енергії, яка буде генеруватися у вказаних системах. Запропоновано фрактально-кластерний підхід до побудови таких систем.

Список літератури

1. Іскаков А. А., Кобушко І. М. Енергоефективність національної економіки в контексті її еколого-економічної безпеки. *Механізм регулювання економіки*. 2016. № 3. С. 88–96.
2. *Комплексна державна програма енергозбереження України*. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 лютого 1997 р. N 148. URL: http://search.ligazakon.ua/1_doc2.nsf/link1/FIN41650.html
3. Багрий П. В. *Енергетична децентралізація – чи можлива вона в Україні?* URL: <http://business.ua/uk/energetichna-detsentralizatsiya-chi-mozhliva-vona-v-ukrajini>
4. *Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей – 2019 р.* Сертифікат 20B4E4ED0D30998C0400000042 E9230085E46E00 Підписувач Зайченко Віталій Борисович Дійсний з 22.01.2019 14:26:24 по 22.01.2021 14:26:24
5. Самойленко В. О. *Обеспечение балансов мощности и энергии электроэнергетических систем с распределенной генерацией: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02*. Екатеринбург, 2017. 207 с.
6. Селяхова О., Тарновская О., Фатеева Е., Юрчук О. Виртуальная электростанция. *Энергорынок*. 2016. № 2 (137). С. 43–50.
7. Федорчук С. О. *Забезпечення заявлених графіків генерації відновлюваних джерел енергії на основі концепції віртуальних електричних станцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02*. Харків, 2019. 179 с.
8. Khan R. H., Khan J.Y. Wide area PMU communication over a WiMAX network in the smart grid. *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Tainan, 2012. P. 187–192.
9. *Офіційний сайт науково-учбового центру «Smart Grid–ДонНТУ»*. URL: <http://smartgrid.donntu.edu.ua>
10. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О., Гунько І. О. Керування режимами секціонованих розподільних електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 2(149). С. 42–49. doi: 10.31649/1997-9266-2020-149-2-42-49
11. *Офіційний сайт НЕК «Укренерго»*. URL: <https://ua.energy/>

12. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы*. Москва: Книжный Дом, 2001. 656 с.

References (transliterated)

1. Iskakov A. A., Kobushko I. M. Enerhoefektyvnist' natsional'noyi ekonomiky v konteksti yiyi ekoloho-ekonomichnoyi bezpeky [Energy efficiency of the national economy in the context of its environmental and economic security]. *Mekhanizm rehulyuvannyi ekonomiky*. 2016, no. 3, pp. 88–96.
2. *Kompleksna derzhavna prohrama enerhozberezhennya Ukrayiny* [A comprehensive state programme for energy conservation in Ukraine]. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated February 5 1997. N 148. Available at: http://search.ligazakon.ua/1_doc2.nsf/link1/FIN41650.html
3. Bahriy P. V. *Enerhetychna detsentralizatsiya – chy mozhliva vona v Ukrayini?* [Energy decentralisation - is it possible in Ukraine?] Available at: <http://business.ua/uk/energetichna-detsentralizatsiya-chi-mozhliva-vona-v-ukrajini>
4. *Zvit z otsinki vidpovidnosti (достатності) heneruyuchykh potuzhnostey – 2019 r.* [Generating capacity conformity (adequacy) assessment report – 2019]. Certificate 20B4E4ED0D30998C0400000042E9230085E46E00 Підписувач Zaychenko Vitalij Borisovich Valid from 22.01.2019 14:26:24 to 22.01.2021 14:26:24.
5. Samoylenko V. O. *Obespechenie balansov moshchnosti i energii elektroenergeticheskikh sistem s raspredelennoy generatsiyey: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.14.02* [Ensuring power and energy balances of electricity systems with distributed generation. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Ekaterinburg, 2017. 207 p.
6. Selyakhova O., Tarnovskaya O., Fateeva E., Yurchuk O. Virtual'naya elektrostantsiya [Virtual power plant]. *Energorynok*. 2016, no. 2 (137), pp. 43–50.
7. Fedorchuk S. O. *Zabezpechennya zavavlenykh hrafivik heneratsiyi vidnovlyuvannykh dzhherel enerhiyi na osnovi kontseptsiyi virtual'nykh elektrychnykh stantsiy: dys. ... kand. tekhn. nauk 05.14.02* [Ensuring stated renewable energy generation schedules based on the virtual power plants concept. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2019. 179 p.
8. Khan R. H., Khan J.Y. Wide area PMU communication over a WiMAX network in the smart grid. *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Tainan, 2012, pp. 187–192.
9. *Ofitsiyyny sayt naukovo uchbovoho tsentru "Smart Grid–DonNTU"* [Official website of the scientific training centre "Smart Grid–DonNTU"]. Available at: <http://smartgrid.donntu.edu.ua>
10. Lezhnyuk P. D., Rubanenko O. O., Hun'ko I. O. Keruvannya rehymamy sektionovanykh rozpodil'nykh elektrychnykh merezh z vidnovlyuval'nymy dzhherelamy enerhiyi [Control of Sectioning Distributed Power Grids with Renewable Energy Sources]. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*. 2020, no. 2 (149), pp. 42–49. doi: 10.31649/1997-9266-2020-149-2-42-49
11. *Ofitsiyyny sayt NEK "Ukrenergo"* [Official website NEK "Ukrenergo"]. Available at: <https://ua.energy/>
12. Mandel'brot B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [The fractal geometry of nature]. Moscow, Knizhnyy Dom Publ., 2001. 656 p.

Надійшла (received) 14.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чернюк Артем Михайлович (Чернюк Артём Михайлович, Cherniuk Artem) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2046-8754>; e-mail: archer.uipa@gmail.com.

Кирисов Ігор Геннадійович (Кирисов Игорь Геннадьевич, Kirisov Ihor) – старший викладач кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-9936>; e-mail: kirisovuipa1980@gmail.com.

Качанов Євген Ігорович (Качанов Евгений Игоревич, Kachanov Ievgen) – аспірант кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6149>; e-mail: kachanov.ua@gmail.com.