

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-2>

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОМЕРЕЖІ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ SMART GRID

Бублікоч Андрій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754
SCOPUS ID: 55998596600

Ципленков Дмитро Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електротехніки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-0378-5400
SCOPUS ID: 55998534500

Гребенюк Андрій Миколаєвич,

кандидат технічних наук, доцент,
викладач вищої категорії,
голова циклової комісії електричної інженерії та автоматизації
Дніпровського фахового коледжу енергетичних та інформаційних технологій
ORCID ID: 0000-0002-6529-683X

Ткаленко Олександр Сергійович,

аспірант кафедри електротехніки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0005-7257-7671

Нестерова Ольга Юрїївна,

кандидат педагогічних наук,
завідувач кафедри філософії і педагогіки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-5952-4664

***Метою** є аналіз запитів від підприємств на купівлю доступної в електромережі потужності та визначення найбільш оптимальної комбінації покупців електроенергії за певними критеріями.*

***Метод.** Під час створення імітаційної моделі системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі та її дослідження використано методи імітаційного моделювання, оптимізації, а також теорії ймовірності та математичної статистики.*

***Результати.** У роботі створено імітаційну модель системи, в основу якої закладено експериментальні діаграми потужностей, генерованих електростанціями, та споживаних гуртожитком та житловою будівлею. Варіювання властивостями виробників і споживачів електроенергії забезпечено через введення випадкового складника потужності з різними характеристиками, випадковим характером зміни вартості електроенергії, що формується споживачами, а також різним часовим зсувом.*

Виконано аналіз процесу розподілу потужності для невеликої кількості споживачів із використанням емпіричного алгоритму, коли процес розподілу розділяється на два етапи. Для гнучкості алгоритму введено вагові коефіцієнти.

Дослідження системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі показало недосконалість запропонованого алгоритму з погляду значної кількості надлишкової електроенергії через оптимізацію за цілочисельними змінними, кількість яких є невеликою. Для подолання цього недоліку введено запас за потужністю під час її розподілу серед звичайних споживачів та проведено дослідження залежності від цього запасу нереалізованої та надлишкової кількості електроенергії, а також прибутку. Дослі-

дження показало, що для розглянутих умов існує діапазон значень запасу за потужністю від 5 до 10%, де цей параметр є близьким до оптимального за критерієм максимального прибутку.

Практичне значення. Запропоновані рішення можуть бути використані під час побудови енергосистем відповідно до концепції «розумних мереж», що дозволить електроенергетичним компаніям зменшити попит на електроенергію в періоди пікових навантажень. Такий підхід дозволяє відмовитися від «гарячих» резервів і зменшує потребу в значних довгострокових інвестиціях у додатковій генеруючій потужності, а також знижує загальну потребу в інших інвестиціях.

Ключові слова: smart grid, електромережа, автоматичне керування розподілом електроенергії між споживачами.

Bublikov Andrii, Tsyplenkov Dmytro, Hrebeniuk Andrii, Tkalenko Oleksandr, Nesterova Olha.
Synthesis peculiarities of the system of automatic control of power distribution in the smart grid electricity network

The goal is to analyze requests from enterprises for the purchase of power available in the power grid, and to determine the most optimal combination of electricity buyers according to certain criteria.

Method. Simulation modeling, optimization, as well as probability theory and mathematical statistics methods were used to create a simulation model of the system of automatic control of power distribution in the power grid and to study it.

The results. The paper created a simulation model of the system, which is based on experimental diagrams of power generated by power plants and consumed by a dormitory and a residential building. Variation in the properties of electricity producers and consumers is provided through the introduction of a random component of power with different characteristics, the random nature of the change in the cost of electricity generated by consumers, as well as a different time shift.

The analysis of the power distribution process for a small number of consumers was performed using an empirical algorithm, when the distribution process is divided into two stages. Weighting factors are introduced for the flexibility of the algorithm.

The study of the system of automatic control of power distribution in the power grid showed the imperfection of the proposed algorithm in terms of a significant amount of excess electricity due to optimization by integer variables, the number of which is small. To solve this shortcoming, a capacity reserve was introduced during its distribution among ordinary consumers, and a study of the dependence of the unrealized and excess amount of electricity, as well as profit, on this reserve was carried out. The study showed that for the considered conditions there is a range of power reserve values from 5 to 10%, where this parameter is close to the optimal one according to the criterion of maximum profit.

Practical significance. The proposed solutions can be used in the construction of energy systems according to the concept of "smart networks", which will allow electric power companies to reduce the demand for electricity during periods of peak loads. This approach allows you to abandon "hot" reserves and reduces the need for significant long-term investments in additional generating capacity, as well as reduces the overall need for other investments.

Key words: smart grid, power grid, automatic control of electricity distribution between consumers.

Вступ. Об'єднана енергетична система (ОЕС) України охоплює всі наявні електростанції, електромережі й різні інші об'єкти електроенергетики. Ці компоненти працюють колективно в спільному режимі виробництва, передачі та розподілу електроенергії, керуючи всім централізовано.

Важливим напрямом розвитку електроенергетичного сектору України є інтеграція електростанцій в енергосистеми. Така інтеграція необхідна для забезпечення ритмічного попиту на електроенергію, який зазнає не лише сезонних, але й добових коливань. Нерівномірний розподіл пікових навантажень на різних ділянках енергосистем дозволяє гнучко змінювати напрямки потоків електроенергії в разі потреби: із заходу – на схід, з півночі – на південь, або навпаки. Однак транспортування електроенергії на значні відстані призводить до неминучих втрат, які зазвичай зростають зі збільшенням відстані. Інтеграція промислових підприємств в єдину енергосистему відіграє вирішальну роль у мінімізації цих втрат.

В Україні створено Об'єднану енергетичну систему (далі – ОЕС), яка з'єднує різні

регіональні енергетичні системи в єдине ціле [1]. Ця інтегрована система складається з чотирьох категорій електростанцій: теплових, атомних, гідрравлічних, а також електростанцій на основі альтернативних джерел енергії, найбільш перспективними серед яких є вітрові та сонячні електростанції [2–4].

Структура генеруючих потужностей в ОЕС України є неоптимальною з погляду забезпечення ефективного регулювання частоти та потужності в енергосистемі. Така неефективність зумовлена кількома факторами:

1. Значна частка атомних електростанцій (АЕС) працює відповідно до технологічних регламентів, які обмежують їх роль покриттям основної частини графіка споживання, не беручи активної участі в процесах регулювання;

2. Зниження маневреності теплових електростанцій (ТЕС), що працюють на твердому паливі, через зношеність обладнання та погіршення якості палива, яке вони використовують;

3. Розвиток потужностей на основі альтернативних джерел енергії ще більше сприяє неоптимальній структурі. Ці джерела, особливо ті,

що використовують різко змінні графіки роботи, включають вітрову та сонячну енергію.

Негативний вплив на ОЕС перелічених факторів може бути зменшений завдяки впровадженню різних рішень для системи Smart Grid, що включає мережеву топологію, яка охоплює всі джерела генерації, магістральні та розподільчі мережі, а також різних споживачів електроенергії. Вона функціонує під контролем єдиної мережі інформаційно-керуючих пристроїв і систем у режимі реального часу [5].

Тому запропонований в цій роботі емпіричний алгоритм, що дозволяє автоматизувати процес розподілу електроенергії серед споживачів у межах системи Smart Grid за принципами вільних торгів на умовно названій енергетичній біржі, є актуальним [6].

Метод. Дослідження системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі на основі концепції Smart Grid відбувається на основі створеної імітаційної моделі системи, схему якої показано на рис. 1.

У розробленій моделі імітується ситуація, коли у підприємства, що закупляє та продає електроенергію, є три основні постачальники (ліва частина схеми) та дев'ять споживачів (права частина схеми).

Першим постачальником електроенергії є АЕС, яка продає підприємству стабільно протягом доби 150 кВт. Другим та третім постачальниками електроенергії для підприємства є сонячні електростанції, моделі яких реалізовані в підсистемах, відповідно, «Виробник електроенергії 2» та «Виробник електроенергії 3» на рис. 1. У ці підсистеми інтегровано

експериментальні діаграми зміни потужності, що виробляють реальні сонячні електростанції.

Першим типом споживача (він повторюється для споживачів номер один, чотири та сім на рис. 1 з варіацією характеристик споживання) є промислове підприємство, для якого характерний денний режим роботи. Тому присутні два явно виражені та різні характери споживання електроенергії – денний (суттєво вище) та нічний (суттєво нижчий). У моделях споживачів генерується випадковий складник, який властивий споживанню електроенергії через постійні вмикання та вимкання складників елементів споживача (для промислового підприємства це різні промислові прилади, обладнання тощо).

Другим типом споживача є гуртожиток (він повторюється для споживачів номер два, п'ять та вісім на рис. 1 з варіацією характеристик споживання). В основу моделі цього споживача закладено експериментальну діаграму споживання потужності одним із гуртожитків НТУ «Дніпровська політехніка».

Третім типом споживача електроенергії для підприємства є житловий будинок (споживачі три, шість та дев'ять на рис. 1). В основу моделей цих споживачів закладено експериментальну діаграму споживання потужності житловим будинком із варіацією характеристик споживання.

Результати. Для синтезу системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі потрібно обґрунтування й вибір алгоритму керування серед наявних або запропонованого нового алгоритму. Фактично алгоритмом керування може бути один з алгоритмів

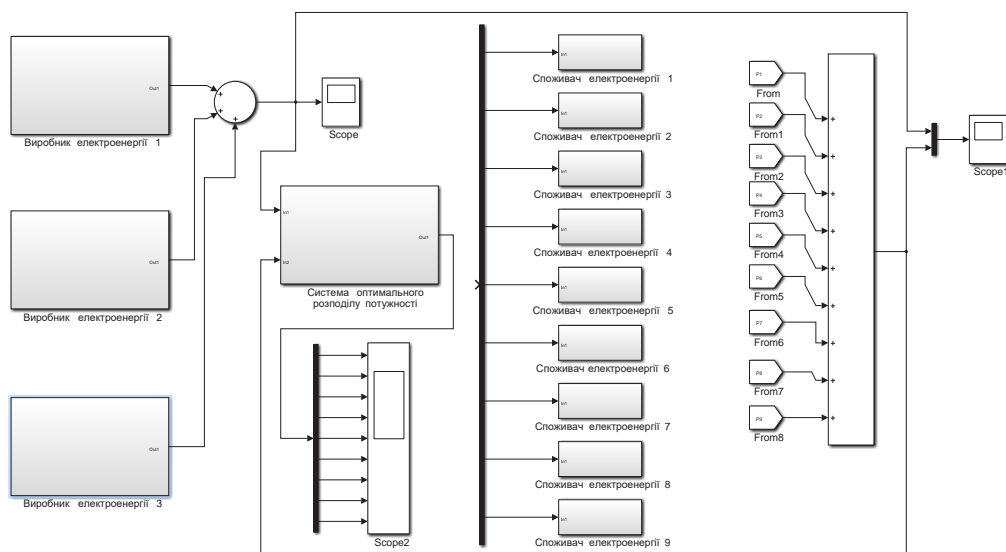


Рис. 1. Схема моделі системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі

оптимізації, але є певні особливості, через які використання класичних алгоритмів оптимізації є ускладненим:

- існує обмеження за доступною потужністю, яке постійно змінюється (у певні моменти його взагалі може не бути);

- оптимізація відбувається за цілочисельними змінними, тобто якщо споживач отримує потужність, то всю, яку він запросив;

- можуть існувати споживачі з більшим пріоритетом як постійні клієнти, що на тривалому інтервалі часу закупають більше електроенергії за ціну вище середньої, навіть якщо разова пропозиція від них тільки за таким критерієм оптимізації, як максимальний прибуток, є не найвигіднішою.

З урахуванням цих особливостей запропоновано новий емпіричний алгоритм автоматичного керування розподілом потужності, який базується на таких принципах:

- спочатку за інтегральним сумарним показником визначаємо кількість (приймаємо 50% закупленої потужності) пріоритетних споживачів за відношенням кількості потужності та ціни за електроенергію = кількість затребуваної електроенергії (запит/макс. запит) * ваговий коефіцієнт 1, та запропонована ціна (запропонована ціна/макс. ціна) * ваговий коефіцієнт 2;

- далі серед інших споживачів, об'єднуючи їх у групи різної кількості, розігруємо залишок потужності за критерієм максимального прибутку.

За допомогою створеної імітаційної моделі системи автоматичного керування розподілом потужності (рис. 1) проведено дослідження ефективності запропонованого алгоритму розподілу потужності.

З результату моделювання (рис. 2) можна зробити висновок, що за умови використання запропонованого алгоритму автоматичного керування розподілом потужності на певних часових інтервалах між 15.00 та 20.00 виникають суттєві перевищення проданої потужності над доступною. Це не є проблемою, коли підприємство може швидко докупити необхідну кількість потужності, але, по-перше, в час-пік може бути нестача електроенергії в регіоні, а по-друге – ціна буде набагато більшою, ніж за якою електроенергія була законтрактована заздалегідь. Таким чином, таке небажане явище відбувається через оптимізацію за цілочисельними змінними, сума яких завжди буде або більшою, або меншою за допустимий рівень. Незначні перевищення проданої потужності над доступною, в принципі, є припустимими, оскільки невелику кількість електроенергії легше докупити, крім того, можна робити невеликий запас електроенергії. Але на

рис. 2 видно, що це перевищення може сягати 50 кВт, що є неприпустимим.

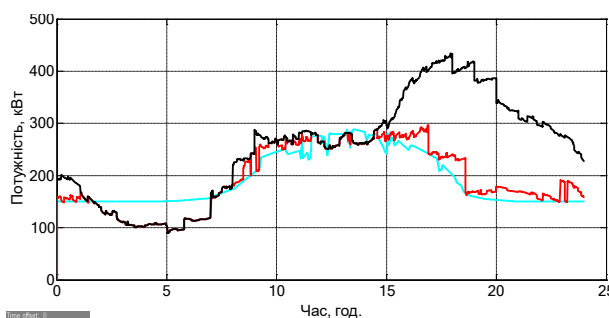


Рис. 2. Зміна в часі потужності, що є в доступі (бірюзова лінія), яка затребувана всіма споживачами (чорна лінія) та яка надається споживачам після розподілу за запропонованим алгоритмом (червона лінія); без запасу потужності для звичайних споживачів

Щоб запобігти цьому, в алгоритм введено так званий запас за потужністю в разі визначення переліку звичайних споживачів під час розподілу потужності. Тобто звичайним споживачам продається не вся потужність, що залишилась, а певний її відсоток. При цьому залишається запас для ситуації, коли під час розподілу виникне перевищення допустимої потужності. У нашому випадку запас береться у відсотках від допустимої потужності. Запас 15%, наприклад, означає, що звичайним споживачам продається не 50% допустимої потужності, що залишилась для звичайних споживачів після розподілу серед пріоритетних, а 35%. Саме для цього випадку отримано результати моделювання процесу розподілу потужності серед споживачів за запропонованим алгоритмом, що показані на рис. 3.

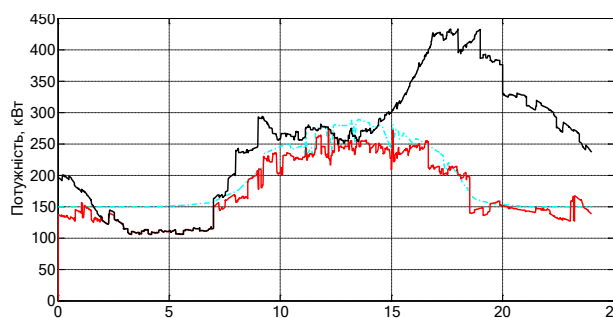


Рис. 3. Зміна в часі потужності, що є в доступі (бірюзова лінія), яка затребувана всіма споживачами (чорна лінія) та яка надається споживачам після розподілу за запропонованим алгоритмом (червона лінія); запас потужності для звичайних споживачів становить 15%

З рис. 3 ми бачимо, що тепер продана споживачам потужність набагато менше перевищує допустиму потужність, але при цьому збільшилась кількість часових інтервалів, де продана потужність є меншою за допустиму.

Для більш точного оцінювання ефективності роботи системи автоматичного керування розподілом потужності серед споживачів у процесі моделювання проведено аналіз кількості непроданої та надлишкової електроенергії, який показав, що особливо інтенсивний приріст кількості непроданої електроенергії має місце з 10.00 до 12.00 та з 15.00 до 17.00. Саме на цих часових інтервалах виникають найбільш несприятливі комбінації затребуваної потужності та її вартості для задачі цілочисельної оптимізації. Якщо говорити про надлишкову електроенергію (рис. 2), її різке збільшення приходиться на часові інтервали між 9.00 та 10.00 та між 18.00 й 19.00.

Таким чином, можна зробити висновок, що введення запасу за потужністю під час її розподілу між звичайними споживачами дійсно призвело до суттєвого скорочення кількості надлишкової електроенергії, але при цьому досить значно збільшилася кількість непроданої електроенергії. Отже, можна спрогнозувати, що існує певний баланс між цими параметрами, який буде відповідати максимальному екстремуму за таким критерієм, як прибуток від продажу електроенергії. Для цього проведено дослідження цих параметрів залежно від різних запасів за потужністю, результати яких показано на рис. 4–7.

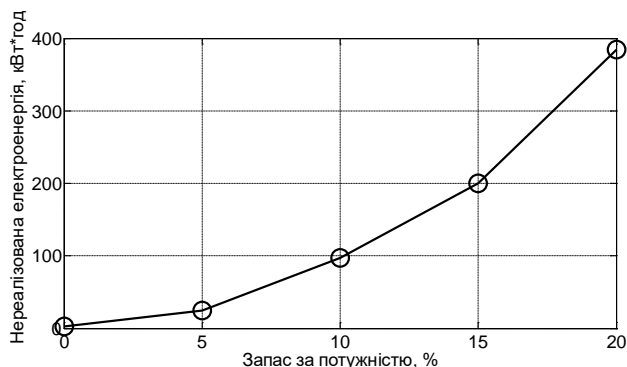


Рис. 4. Залежність кількості нереалізованої енергії під час її перерозподілу серед споживачів від запасу за потужністю, введеного для запобігання перевищенню доступної потужності

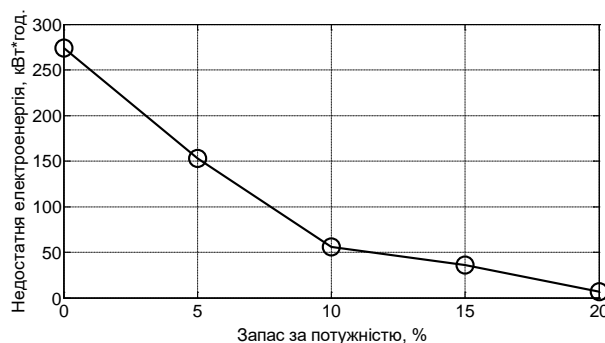


Рис. 5. Залежність кількості дефіцитної енергії в разі перевищення допустимої потужності від запасу за потужністю, введеного для запобігання перевищенню доступної потужності

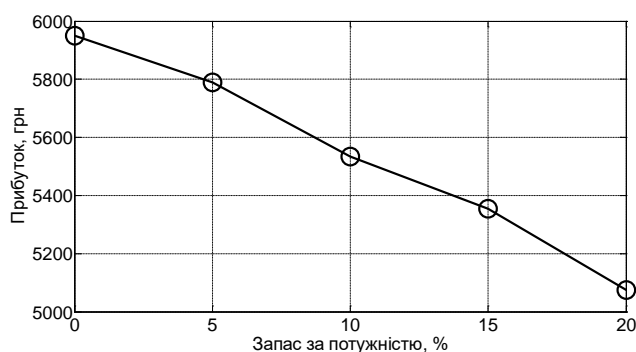


Рис. 6. Залежність прибутку від реалізованої електроенергії від запасу за потужністю, введеного для запобігання перевищенню доступної потужності

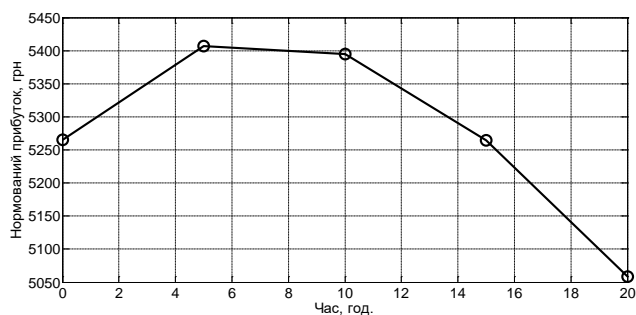


Рис. 7. Залежність прибутку від реалізованої електроенергії від запасу за потужністю, з урахуванням витрат на надлишкову електроенергію

З рис. 4 видно, що залежність нереалізованої кількості електроенергії від запасу потужності під час її розподілу між звичайними споживачами є прямою та має експоненціальний характер. Більш різке збільшення кількості

нереалізованої електроенергії маємо після рівня 10% запасу потужності.

Аналогічний експоненціальний характер має залежність надлишкової кількості електроенергії від запасу потужності, але зворотний (рис. 5). Суттєве зменшення надлишкової електроенергії має місце після рівня 10% запасу за потужністю.

Прибуток, як і прогнозувалось, зменшується за лінійною залежністю зі збільшенням запасу за потужністю (рис. 6), але якщо прибуток розраховувати з урахуванням витрат на надлишкову потужність, то залежно від прибутку за продану електроенергію від рівня запасу потужності з'являється максимальний екстремум (рис. 7), що відповідає рівню запасу потужності 5%, хоча з огляду на незначне зменшення прибутку за збільшення запасу потужності до 10% саме діапазон від 5 до 10% можна рекомендувати для вибору запасу потужності під час її розподілу між звичайними споживачами.

Висновки. З метою синтезу й дослідження системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі створено імітаційну модель системи, в основу якої закладено експериментальні діаграми потужностей, генерованих електростанціями та споживаних гуртожитком та житловою будівлею. Варіювання властивостями виробників і споживачів електроенергії забезпечено через введення випадкового складника потужності з різними характеристиками, випадковим характером зміни вартості електроенергії, що формується споживачами, а також різним часовим зсувом.

Аналіз процесу розподілу потужності для невеликої кількості споживачів показав доцільність використання емпіричного алгоритму, коли процес розподілу розділяється на два етапи. На першому етапі визначається перелік пріоритетних споживачів на основі інтегрального критерію, що орієнтований не на максимальний прибуток, а на оптимальне відношення кількості затребуваної електроенергії та її вартості. Для гнучкості алгоритму введено вагові коефіцієнти. На другому етапі розподіляється потужність, що залишилась, серед звичайних споживачів за критерієм максимального прибутку методом повного перебору комбінацій споживачів. Завдяки попередньому зменшенню кількості споживачів на першому етапі ємність процедури повного перебору значно скорочується.

Дослідження системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі показало недосконалість запропонованого алгоритму з огляду на значну кількість надлишкової електроенергії через оптимізацію за цілочисельними змінними, кількість яких є невеликою. Для подолання цього недоліку введено запас за потужністю під час її розподілу серед звичайних споживачів та проведено дослідження залежності від цього запасу неререалізованої та надлишкової кількості електроенергії, а також прибутку. Дослідження показало, що для розглянутих умов існує діапазон значень запасу за потужністю від 5 до 10%, де цей параметр є близьким до оптимального за критерієм максимального прибутку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Малінівський А. Основи електроенергетики та електропостачання. 2-ге вид. Львів : Вид-во Львів. Політехніки, 2009, 436 с.
2. План розвитку розподільних електричних мереж на 2016 – 2025 роки *Офіційний сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України*. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=24_4972812 (дата звернення: 06.10.2024).
3. ДП «НАЕК «Енергоатом». Головна Національна атомна енергогенеруюча компанія. *ДП «НАЕК «Енергоатом». Головна Національна атомна енергогенеруюча компанія*. URL: <https://www.energoatom.com.ua/> (дата звернення: 06.10.2024).
4. Укргідроенерго – провідна гідроенеруюча компанія в Україні. *Укргідроенерго*. URL: <https://uhe.gov.ua/> (дата звернення: 06.10.2024).
5. SMART GRIDS. Виробництво електроніки, електронні компоненти, електротехніка. *Компанія SEA*. URL: <https://www.sea.com.ua/ua/oborudovanie-dlya-energetiki/smart-grids/> (дата звернення: 06.10.2024).
6. Ципленков Д.В. Синтез та дослідження системи автоматичного керування розподілом потужності в енергомережі на основі концепції Smart Grid. Дніпро, 2023. 101 с.

REFERENCES:

1. Malynovs'kyu, A. (2009). *Osnovy elektroenerhetyky ta elektropostachannya* [Basics of electric power engineering and power supply]. Vydannya 2 L'viv: Vyd na L'viv. politekhnik 436 s. [in Ukrainian].
2. Plan rozvytku rozpodil'nykh elektrychnykh merezh na 2016–2025 roky [The plan for the development of distribution electric networks for 2016–2025] *Ofitsiynyy sayt Ministerstva enerhetyky ta vuhil'noyi promyslovosti*

Ukrayiny. – Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=244972812 (Data zvernennya: 06.10.2024) [in Ukrainian].

3. DP “NAEK “Enerhoatom”. Holovna natsional'na atomna enerhoheneruyucha kompaniya. DP NAEK “Enerhoatom” [Main National Atomic Energy Generating Company. SE NAEK “Energoatom”] *Holovna natsional'na atomna enerhoheneruyucha kompaniya*. Retrieved from <https://www.energoatom.com.ua/> (data zvernennya: 06.10.2024) [in Ukrainian].

4. Ukrhidroenerho – providna vodneva heneruyucha kompaniya v Ukrayini Ukhidroenerho [Ukrhydroenergo is the leading hydrogen generating company in Ukraine]. *Ukhidroenerho*. Retrieved from <https://uhe.gov.ua/> (data zvernennya: 06.10.2024) [in Ukrainian].

5. SMART GRIDS. Vyrobnystvo elektroniky, elektronnykh komponentiv, elektrotekhniky [Production of electronics, electronic components, electrical engineering] *Kompaniya CEA*. Retrieved from <https://www.sea.com.ua/ua/oborudovanie-dlya-energetiki/smart-grids/> (data zvernennya: 06.10.2024) [in Ukrainian].

6. Tsyplenkov, D.V. (2023). Syntez ta doslidzhennia systemy avtomatychnoho keruvannia rozpodilom potuzhnosti v enerhomerezhi na osnovi kontseptsii Smart Grid [Synthesis and research of the system of automatic control of power distribution in the power grid based on the Smart Grid concept]. *Dyplom mahistra*. Dnipro, 101 s.