

СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

С.П. Денисюк*, докт.техн.наук, Д.Г. Дерев'янюк**, канд.техн.наук, Г.С. Белоха***, канд.техн.наук
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: dereviankodenys@gmail.com

Досліджено проблему взаємної інтеграції локальних електроенергетичних систем Microgrid з джерелами РГ та НВДЕ з централізованими електроенергетичними системами, котра полягає в узгодженні цілей та параметрів режимів функціонування означених систем. Проаналізовано основні етапи та завдання синтезу моделей зазначених систем. Запропоновано моделі систем, що синтезуються, будувати на основі теорії ігор з урахуванням інтересів (цільових функцій) моделей кожної з систем. Такий спосіб дає можливість відображення різносторонньої взаємодії систем з джерелами РГ і НВДЕ та централізованими електроенергетичними системами. На основі запропонованого способу формалізовано постановку задачі багатокритеріальної оптимізації для моделей зазначених систем у рамках теорії ігор. Запропоновано процедуру оптимізації моделі синтезованої системи у вигляді формалізованої гри, котра ґрунтується на механізмах динамічної тарифікації та дає змогу знайти найоптимальніше рішення поставленої ігрової задачі. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: Microgrid, джерела розосередженої генерації, оптимізація моделей синтезованих систем, синтез моделей систем з джерелами розосередженої генерації, теорія ігор.

Вступ. Реорганізація енергетичної галузі призвела до появи та розвитку нових низьковольтних джерел енергії, відомих як нетрадиційні та відновлювані джерела енергії (НВДЕ) [1, 2], а також технологій розосередженої генерації (РГ) [2-4]. Широке впровадження технологій РГ має ряд переваг та недоліків. Перевагами НВДЕ порівняно з традиційними джерелами енергії є [1-3, 5]: практична невичерпність первинного палива; низький рівень забруднення навколишнього середовища; відсутність потреби у видобуванні, переробці та доставці первинного палива; відсутність необхідності використання додаткових систем охолодження, видалення відходів або продуктів розпаду палива; немає потреби в дефіцитних високотемпературних матеріалах, за винятком сонячних теплоконцентраторів; джерела РГ можуть працювати без обслуговування; відсутність необхідності транспортування первинного палива до джерела енергії.

Основним недоліком більшості відновлюваних джерел енергії є нестабільність їхнього енергетичного потенціалу, що може призвести до відхилень частоти систем, відхилень напруги і, як наслідок, до додаткових відключень, що впливають на надійність електроенергетичних систем [2, 5-7]. Зазначені параметри якості електричної енергії (ПЯЕ) та вимоги надійності у нормальних умовах експлуатації електричних мереж (ЕМ) України мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ:EN 50160-2014.

Впровадження технологій РГ та НВДЕ впливає на розподільні ЕМ і перетворює їх на активні елементи Microgrid систем. А відтак, зі зростанням частки генерованої електроенергії від джерел РГ збільшується їхній вплив на параметри режимів ЕМ Microgrid систем. Це призводить до необхідності розробки методології синтезу Microgrid систем з джерелами РГ та НВДЕ з централізованою енергосистемою [2, 6, 8], котра створить умови задля забезпечення відповідних параметрів якості електропостачання та надійності.

Методологія синтезу складних електроенергетичних систем з розосередженою генерацією. Головним завданням синтезу Microgrid систем з централізованою енергосистемою можна вважати створення умов, за яких синтезована система матиме задані властивості. Причому мова може йти як про технічні параметри (якість електричної енергії, надійність, рівень втрат) [2, 4, 6], так і про економічні параметри функціонування такої системи.

© Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Белоха Г.С., 2022
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-6299-3680>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4877-5601>;
*** <https://orcid.org/0000-0003-4277-367X>

Вирішення задачі апроксимації як складової задачі синтезу полягає у побудові такої моделі синтезованої системи, котра, з одного боку, задовольняє поставленим вимогам, а з іншого – умовам фізичної реалізованості заданих характеристик системи, що утвориться. Подальше розв'язання задачі реалізації полягає у технічній реалізації моделі синтезованої (об'єднаної) системи на заданому технологічному базисі.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації шляхом впровадження теоретико-ігрової моделі, що дає змогу знайти оптимальний профіль стратегій взаємодії елементів системи у вигляді формалізованої гри.

Формалізація задачі багатокритеріальної оптимізації. Задля вирішення задачі апроксимації моделі синтезованої системи серед численних методів оптимізації можуть бути застосовані елементи теорії ігор. Оптимальним вирішенням у такому разі буде знаходження рівноважного стану системи [6]. Як і у загальній теорії синтезу, система може мати кілька рівноважних станів, а отже й кілька оптимальних розв'язків задачі [6]. Задля знаходження найоптимальнішого вирішення задачі доцільно використовувати різні теоретико-ігрові методи, у т.ч. і пошук рівноваги за Нешем.

Обидві складові моделі системи, що синтезується, слід представити двома наборами гравців: оператори системи розподілу електричної енергії (*Distribution System Operator* – DSO) та оператори Microgrid системи або окремих джерел РГ. Кожна з груп характеризується окремим набором електро-вартісних моделей [3], котрі характеризують різні групи оптимізаційних задач для кожної зі складових систем, що синтезуються. Для групи гравців DSO основними завданнями у межах вирішення задачі синтезу можна вважати [2-6]: забезпечення належного рівня ПЯЕ; підвищення надійності системи; мінімізація втрат електричної енергії. Для оператора Microgrid системи основними завданнями є: мінімізація витрат або LCOE та максимізація прибутку від продажу генерованої електричної енергії. Як видно з рис. 1, зазначені задачі є абсолютно різні за змістом (рис. 1 – формалізація функції виграшу: *a* – для групи гравців DSO; *б* – для оператора Microgrid).

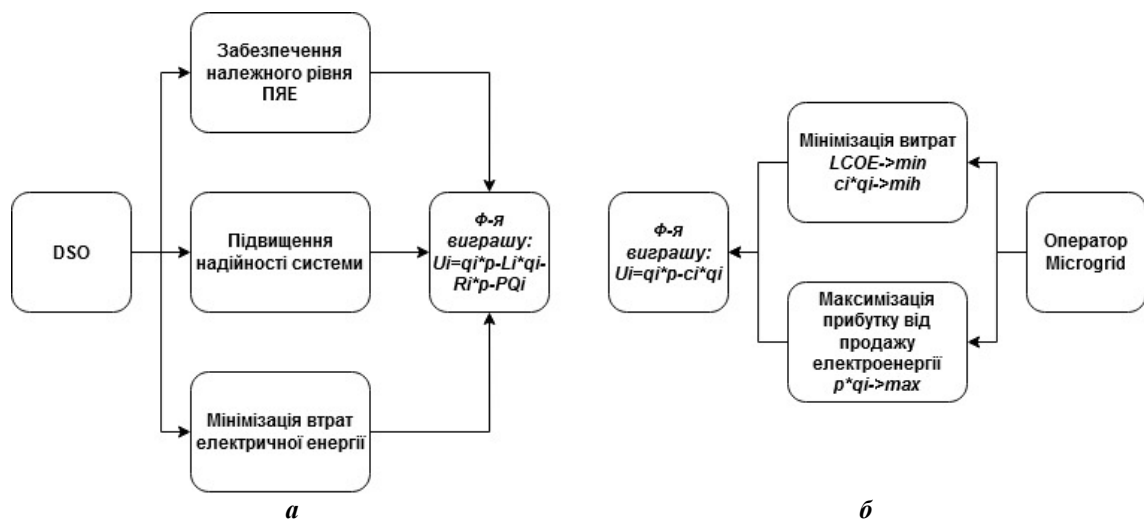


Рис. 1

Задля вирішення задачі синтезу у такій постановці формалізуємо гру. У таку гру $G = \langle I, S, u \rangle$ грають дві різні групи гравців, а саме: оператори RES – *Renewable Energy Sources* (оператори Microgrid) та оператори системи розподілу (DSO). Набір гравців представлений наступним чином:

$$I = \{RES_1, RES_2, \dots, RES_N, DSO_1, DSO_2, \dots, DSO_M\}.$$

У відповідності до своїх завдань у цій грі кожен набір гравців матиме різні стратегії. Стратегії DSO будуть

$$S_{DSO_i} = \{ "NR", "RES", "CHP", "BAU" \},$$

де *NR* – реконфігурація мережі (*network reconfiguration*) із застосуванням різних типів секціонуючих пристроїв задля зниження втрат та забезпечення надійного функціонування системи; *RES* – залучення джерел РГ, у т.ч. НВДЕ задля зниження втрат та забезпечення надійного функціонування системи (як резервів потужності); *CHP* – залучення ТЕЦ для покриття пікових навантажень і забезпечення

надійного функціонування системи; *BAU* – звичайна робота без залучення додаткових джерел генерації.

Стратегіями операторів Microgrid будуть

$$S_{RESi} = \{ "BAU", "DSM" \},$$

де *BAU* – генерування електричної енергії у мережу без участі в програмах керування попитом (*DSM*), *DSM* – залучення до різноманітних програм *DSM*.

Прибуток кожного комплекту гравців можна записати наступним чином:

$$u_{RESi} = \{ 0, 1, 2 \},$$

де 0 – самопостачання; 1 – прибуток від електричної енергії, проданої на локальному ринку електроенергії; 2 – додатковий прибуток від участі в різних програмах *DSM*;

$$u_{DSOi} = \{ 0, 1, 2 \},$$

де 0 – робота у звичайному режимі енергосистеми (Business As Usual (*BAU*)); 1 – зменшення втрат електричної енергії та підвищення надійності; 2 – зменшення втрат електричної енергії та підвищення надійності з меншими витратами за рахунок різних програм *DSM*.

Причому слід зазначити, що у формалізованому вигляді функції виграшу матимуть різний вигляд (рис. 1). Оскільки основним товаром (продуктом), котрий виробляє оператор Microgrid, є електрична енергія, то максимальним виграшем для нього буде прибуток (рис. 2 – оптимізаційні моделі DSO, оператора Microgrid та синтезованої системи з РГ [6]). Якщо вважати, що витрати на виробництво електричної енергії за *LCOE* будуть рівними $c_i \cdot q_i$, де $0 \leq c_i < 1$ – витрати на генерування 1 кВт·год електричної енергії, функцію виграшу для оператора Microgrid слід записати з урахуванням прибутку, який буде рівний $u_i = p \cdot q_i - c_i \cdot q_i$.

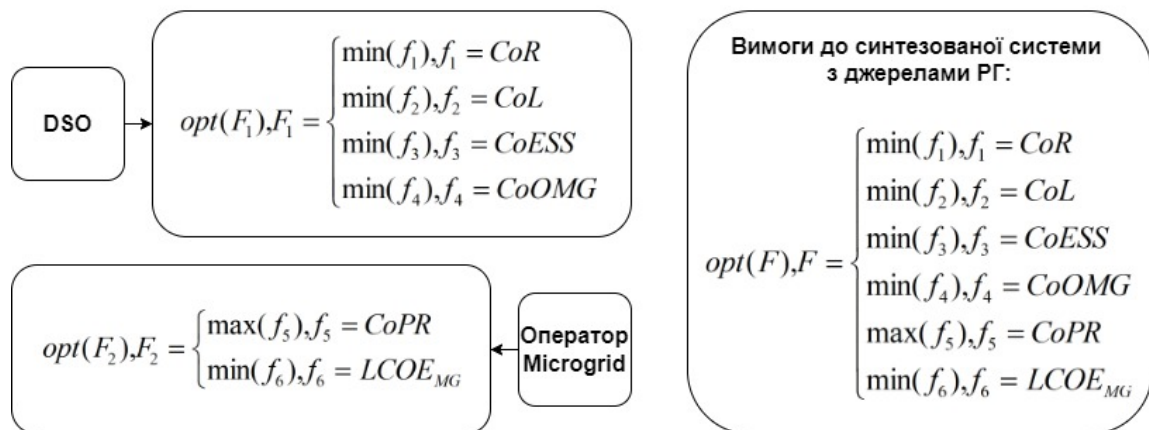


Рис. 2

Слід зазначити, що оператор DSO може сприяти зменшенню навантаження виробникам, які здійснюють виробництво електричної енергії на об'єктах електроенергетики, що використовують альтернативні джерела енергії на локальних ринках. Таким чином прибуток оператора Microgrid може напряму залежати від стратегії DSO.

Оптимізація моделі синтезованої системи. З урахуванням задач DSO, функцію виграшу можна записати з урахуванням прибутку від реалізованої електроенергії $p \cdot q_i$, витрат на забезпечення надійності системи (або плата за недовідпуск електроенергії *ENS* [3]) R_i , втрат електричної енергії L_i , %, та витрат, пов'язаних із забезпеченням якості електричної енергії PQ_i . Функція виграшу для DSO матиме вигляд: $u_i = p \cdot q_i - L_i \cdot q_i - R_i \cdot p - PQ_i$.

У такому випадку матриця гри буде мати вигляд

		DSO			
		NR	RES	CHP	BAU
RES	BAU	(1;1)	(1;0)	(1;1)	(1;0)
	DSM	(1;0)	(1;2)	(1;0)	(1;0)

На рис. 3 показано геометричне представлення оптимізаційної задачі: *a* – виграші для групи гравців DSO; *b* – виграші для оператора Microgrid.

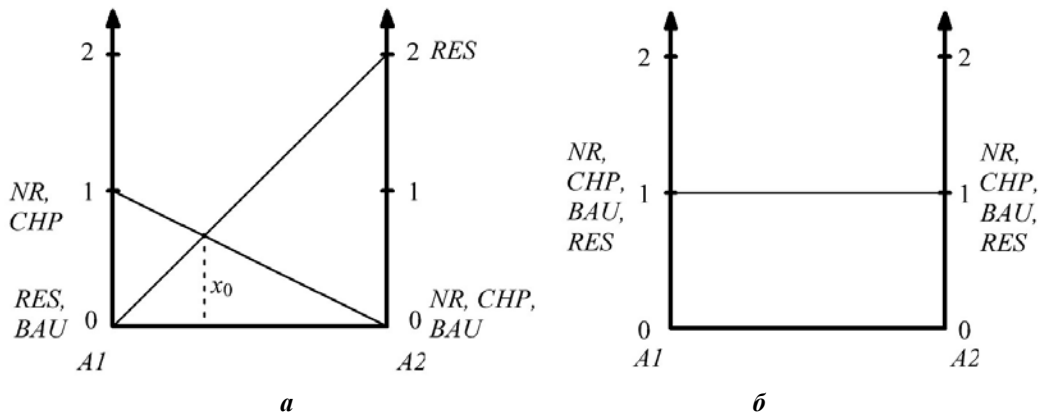


Рис. 3

Як видно з даної матриці та геометричного представлення (рис. 3), утворена модель синтезованої системи може мати кілька рівноважних станів. Найвигіднішим, а отже й найоптимальнішим, для DSO буде профіль стратегій («DSM», «RES»), котрий є рівноважним та домінуючим над рештою профілів стратегій. Проте, з точки зору оператора Microgrid, участь у програмах DSM веде до додаткових витрат, пов'язаних з дооснащенням джерел РГ системами акумулювання (Energy Storage Systems (ESS)) та технічними інтелектуальними засобами керування [6, 7, 9], що суперечить ідеї їхньої мінімізації. Для стимулювання оператора Microgrid у сприянні виконання завдань DSO доцільно модифікувати тариф, за яким оператор Microgrid продає електроенергію на ринку з урахуванням сучасних механізмів тарифікації у рамках різноманітних програм DSM (рис. 4) [3, 8, 10].

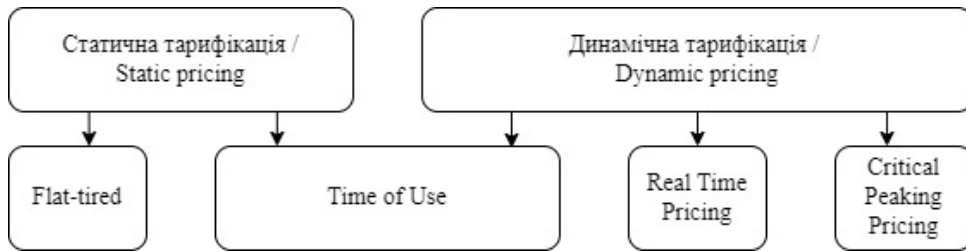


Рис. 4

З огляду на вищезазначене, задля максимізації прибутку оператор Microgrid буде реалізовувати генеровану електричну енергію на локальному балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг. Якщо функцію виграшу для оператора Microgrid записати з урахуванням додаткового прибутку від забезпечення надійності енергосистеми та забезпечення нормативних показників ПЯЕ, використовуючи модель динамічної тарифікації, то вона матиме наступний вигляд:

$$u_i = p \cdot q_i - c_i \cdot q_i + PQ_i, \text{ з урахуванням тарифних зон } (t): u_{RESi} = \sum_{i=1}^n u_{ti} .$$

Тоді, матриця гри буде мати вигляд

		DSO			
		NR	RES	CHP	BAU
RES	BAU	(1;1)	(1;0)	(1;1)	(1;0)
	DSM	(1;0)	(2;2)	(1;0)	(1;0)

На рис. 5 наведено геометричне представлення оптимізаційної задачі: *a* – виграші для групи гравців DSO; *b* – виграші для оператора Microgrid.

Таким чином, для даної матриці, геометричне представлення якої зображено на рис. 5, утворена модель синтезованої системи буде мати профіль стратегій («DSM», «RES»). Даний профіль

буде сильно домінувати над рештою профілів стратегій, а стан системи за даним профілем буде рівноважним за Нешем, а отже, найоптимальнішим з точки зору усіх гравців.

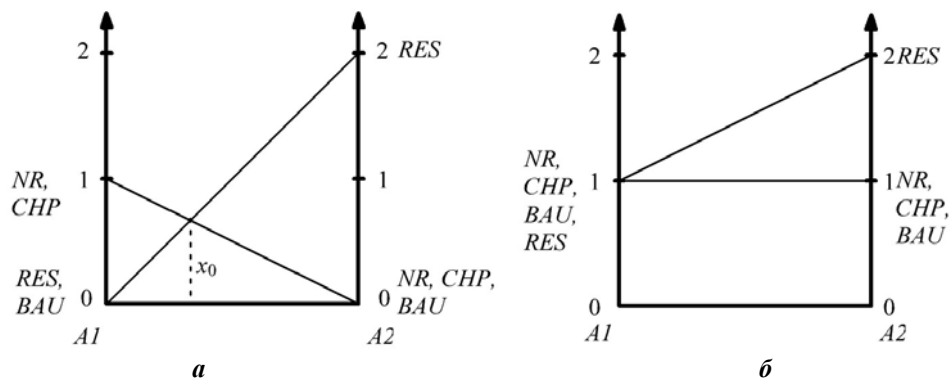


Рис. 5

Висновки. За результатами дослідження проблеми взаємної інтеграції локальних електроенергетичних систем Microgrid з джерелами РГ та НВДЕ з централізованими електроенергетичними системами, котра полягає в узгодженні цілей та параметрів режимів функціонування означених систем, запропоновано моделі систем, що синтезуються, будувати на основі теорії ігор. Такий спосіб побудови створює можливість відображення різносторонньої взаємодії (на технічному та економічному / ринковому рівнях) зазначених систем. Формалізовано постановку задачі багатокритеріальної оптимізації для моделей локальних систем з джерелами РГ та моделей централізованих електроенергетичних систем у рамках теорії ігор. Запропоновано процедуру оптимізації моделі синтезованої системи у вигляді формалізованої гри на основі використання механізмів динамічної тарифікації як елементу програм керування попитом, котра дає змогу знайти найоптимальніше серед інших оптимальних рішень поставленої ігрової задачі знаходженням рівноважних за Нешем стратегій гравців.

1. Shaping a secure and sustainable energy future for all. URL: <https://www.iea.org> (дата звернення 15.05.2022)
2. Ackerman T., Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific. Yokohama, Japan, October 6-10, 2002. Vol. 2. Pp. 1357–1362. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1177677>
3. Denysiuk S., Derevianko D. The cost based DSM methods in microgrids with DG sources. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine, September 13-17, 2021. Vol. 1. Pp. 544-548. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570096>
4. Hatziargyriou N. Microgrids: Architectures and Control. IEEE Press: JohnWiley & Sons, 2014. 344 p.
5. Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D. Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks. *Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*. 2007. Vol. 3. No 1. URL: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1079 (дата звернення 15.05.2022).
6. Nazari M.H., Bagheri Sanjareh M., Khodadadi A., Torkashvand M., Hosseinian S.H. An economy-oriented DG-based scheme for reliability improvement and loss reduction of active distribution network based on game-theoretic sharing strategy. *Sustainable Energy, Grids and Network*. 2021. Vol. 27. 100514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100514>
7. Блінов І.В., Трач І.В., Парус Є.В., Дерев'яно Д.Г., Хоменко В.М. Регулювання напруги та реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом використання розосереджених відновлюваних джерел енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2022.02.060>.
8. Hussain M., Gao Y. A review of demand response in an efficient smart grid environment. *The Electricity Journal*. 2018. Vol. 31. Pp. 55–63.
9. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.044>.
10. Khan Ahsan Raza, Anzar Mahmood, Awais Safdar, Khan Zafar A., Khan Naveed Ahmed. Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. No 54. Pp. 1311–1322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.117>

SYNTHESIS OF MODELS OF LOCAL POWER SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

S.P. Denysiuk, D.H. Derevianko, H.S. Bielokha
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.
E-mail: dereviankodenys@gmail.com

The problems of integration of Microgrids which include DG sources and RES with centralized electric power systems are investigated in this paper. The main stages and tasks of synthesis of models of these systems are analyzed. Authors propose to create models of the synthesized systems based on game-theoretic approach which allows to take into account the interests (objective functions) of the models of both Microgrids and centralized systems. Such method allows to reflect the diverse interaction of the systems with DG sources and RES and centralized power systems. Based on the proposed method, the problem of multi-criterion optimization for models of such systems in the framework of game theory is formulated by authors. The procedure of optimization of the synthesized system model in a formalized game is proposed/ This procedure is based on the mechanisms of dynamic pricing and allows to find the most optimal solutions for the game task. References 10, figures 5.

Key words: Microgrid, distributed generation, optimization of models of synthesized systems, synthesis of models of systems with distributed generation sources, game theory.

1. Shaping a secure and sustainable energy future for all. URL: <https://www.ica.org> (accessed at 15.05.2022)
2. Ackerman T., Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. IEEE/PES *Transmission and Distribution* Conference and Exhibition: Asia Pacific. Yokohama, Japan, October 6-10, 2002. Vol. 2. Pp. 1357–1362. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC.2002.1177677>
3. Denysiuk S., Derevianko D. The cost based DSM methods in microgrids with DG sources. IEEE 2nd KhPI Week on *Advanced Technology* (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine, September 13-17, 2021. Vol. 1. Pp. 544-548. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570096>
4. Hatziaargyriou N. *Microgrids: Architectures and Control*. IEEE Press: JohnWiley & Sons, 2014. 344p.
5. Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D. Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks. *Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*. 2007. Vol. 3. No 1. URL: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1079 (accessed at 15.05.2022).
6. Nazari M.H., Bagheri Sanjareh M., Khodadadi A., Torkashvand M., Hosseinian S.H. An economy-oriented DG-based scheme for reliability improvement and loss reduction of active distribution network based on game-theoretic sharing strategy. *Sustainable Energy, Grids and Network*. 2021. Vol. 27. 100514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100514>
7. Blinov I.V., Trach I.V., Parus Ye.V., Derevianko D.H., Khomenko V.M. Voltage and reactive power regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060> (Ukr).
8. Hussain M., Gao Y. A review of demand response in an efficient smart grid environment. *The Electricity Journal*. 2018. Vol. 31. Pp. 55–63.
9. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus E.V., Trach I.V. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044> (Ukr).
10. Khan Ahsan Raza, Anzar Mahmood, Awais Safdar, Khan Zafar A., Khan Naveed Ahmed. Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. No 54. Pp. 1311–1322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.117>

Надійшла 23.05.2022
Остаточний варіант 03.06.2022