

КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Дослідження висвітлює проблематику збільшення кількості активних споживачів в об'єднаних енергетичних системах, що працюють в умовах ринку електричної енергії. Робота направлена на вирішення завдань пов'язаних з низькою прогнозованістю поведінки активного споживача, його впливі на загальну мережу при ефективному впровадженні економічних стимулів.

Запропоновано методіку керування установками активного споживача або агрегатора, що може вносити зміни до поведінкової стратегії профіля навантаження з врахуванням економічних чинників, технічних обмежень відповідно до поточного стану енергетичної системи.

Розроблено алгоритм керування на основі гібридного методу логічного програмування обмежень з лінеаризацією функцій, що дозволило отримати оптимальні результати керування енергетичними потоками з врахуванням ринкових і системних обмежень.

При проведенні моделювання використано профілі споживання електроустановок промислового споживача та цінові показники електричної енергії на ринку «на добу наперед». В процесі моделювання було визначено різні стратегії сценарного управління електроустановками, що мають переважне застосування в сучасному підході до керування обладнанням активного споживача.

Ключові слова: активний споживач, промисловий споживач, самовиробництво, власне споживання, керування установками, ринок електричної енергії, відновлювальні джерела енергії, установки зберігання енергії.

Вступ. Розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в країнах ЄС показує значний приріст, як на боці генеруючих підприємств, так і в мережах споживачів електричної енергії [1] і українські підприємства також підтримують цей тренд, зокрема під тиском глобального здорожчання енергоносіїв та нестабільності роботи мереж в наслідок ворожих обстрілів інфраструктури. В черні 2023 року було прийнято ЗУ 3220-ІХ [2] що надав споживачам з наявними ВДЕ та УЗЕ в своїх мережах, отримувати статус активного споживача та проводити свою діяльність в умовах ринку електричної енергії. Активний споживач є невід'ємною частиною глобальної тенденції до реформування сталих моделей енергетичних мереж до сучасної розподіленої генерації [3] та має ряд переваг для електричних мереж в яких він функціонує [4]. Недосконалість нормативно-правового забезпечення діяльності активних споживачів та механізмів щодо їх взаємодії з суб'єктами ринку електроенергії не набули широкого застосування через ряд процедурних факторів. Одним із застережень є не прогнозована їх участь в керуванні навантаженням та різка змінювати режимів споживання електроенергії. В свою чергу необхідності участі активних споживачів в розвитку електроенергетики є одним із сучасних перспективних напрямків і світових трендів.

Мета та завдання. Розробити методіку динамічного керування установками активних споживачів, що працюють в умовах ринку електричної енергії. Для досягнення мети врахувати економічні та експлуатаційні критерії використання ВДЕ та УЗЕ за умов прогнозованості графіка електричних навантажень активного споживача.

Матеріал і результати досліджень.

Активний споживач як суб'єкт ринку електричної енергії, має можливість набувати ролі як покупця, так і продавця на ринку, за наявності в його мережах генеруючих установок або УЗЕ [5]. На рис. 1 показано комплексну схему приєднання установок до мереж активного споживача.

Таким чином структура установок активного споживача може набувати достатньо складних форм, з використанням УЗЕ як буферу накопичення електричної енергії, резервування всього або часткового навантаження споживача за умов приєднання генеруючих установок на базі ВДЕ та на різних рівнях системи електропостачання об'єкта. Також відповідно до проведених досліджень [6], кожен з цих елементів може бути як у власності споживача, так і у власності третіх осіб. Сучасне обладнання сонячних електростанцій, а саме інвертори надають можливості створення різних сценаріїв керування енергетичними потоками, що відображені в таблиці 1.

Наведені сценарії в Таблиці 1 дозволяють налаштувати обладнання для керування потоками генерації/накопичення/розряду/імпорту/експорту електричної енергії, за розкладом погодинним та/або за днями тижня. На практиці споживач оцінює періоди власного попиту, генерації, ринкові ціни закупівлі та

продажу електроенергії та створює свій сценарій функціонування обладнання для досягнення своїх технічних та економічних цілей.

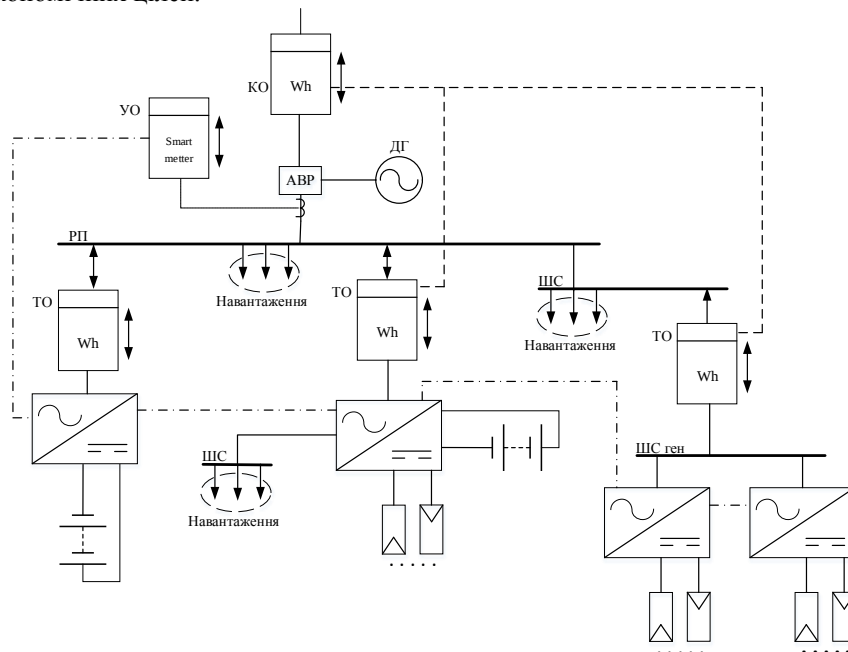


Рисунок 1 - Комплексна схема приєднання установок до мережі активного споживача

Таблиця 1 - Сценарії керування енергетичними потоками активного споживача

Сценарій	Енергетичні потоки			
	Заряд УЗЕ	Розряд УЗЕ	Експорт	Імпорт
1) Bc^S/Gs^S	Лише від ВДЕ (І пріоритет)	-	Лише з ВДЕ (ІІ пріоритет)	-
2) Bc^{S+G}	З ВДЕ та мережі	-	-	Лише в УЗЕ
3) Gs^S/Bc^S	Лише від ВДЕ (ІІ пріоритет)	-	Лише з ВДЕ (І пріоритет)	-
4) Gb^{C+B}/Bc^G	Лише з мережі (ІІ пріоритет)	-	-	На навантаження та в УЗЕ (І пріоритет)
5) Gb^C	-	-	-	Лише на навантаження
6) Bd^C/Gb^C	-	Лише на навантаження (І пріоритет)	-	Лише на навантаження (ІІ пріоритет)
7) Bd^{C+G}/Gs^B	-	На навантаження та експорт (І пріоритет)	Лише з УЗЕ (ІІ пріоритет)	-

Примітка. Назви сценаріїв містять позначення та індекси. Позначення відповідають джерелу живлення, а індекси дозволяють цілям їх використання: S (solar), B (battery), G (grid), b (buy), s (sell), c (charge), d (discharge).

Проте в умовах сучасного ринку електричної енергії, який характеризується високою волатильністю цін, що можуть різко відрізнятись від часу доби, такий метод керування не є достатньо ефективним, адже очікування від поведінки ринку можуть не справдитись. Визначенні статичні сценарії налаштування скерують надлишки електроенергії на експорт в години низької ціни або ж може відбутись режим заряджання УЗЕ в години з дорогою електричною енергією. Для уникнення таких ситуацій запропоновано алгоритм керування, що враховує ринковий сигнал, а вже потім оцінює всі технічні обмеження активного споживача та його обладнання та знаходить найкращу конфігурацію розподілу наявних енергетичних потоків (рис. 2).

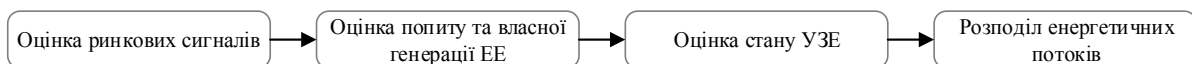


Рисунок 2 – Порядок прийняття рішення активного споживача в умовах ринку електричної енергії

Для реалізації роботи алгоритму (табл. 2) було використано метод логічного програмування обмежень (CLP) з лінеаризацією розрахунків, що дозволить отримувати результати послідовного прийняття рішень у кожному часовому інтервалі без прогнозування майбутніх станів системи та буде придатним для участі активного споживача на усіх сегментах спотового ринку електричної енергії. Для дослідження були визначені наступні вихідні дані до моделі:

- Економічні: тариф ОСР, тариф ОСП, погодинні ціни РДН, ціни прийняття рішення заряду та розряду;
- Нормативно-правові: договірна потужність споживача, модель функціонування з ринком;
- Технічні: ГЕН споживання, графік потенційної генерації ВДЕ, параметри УЗЕ, початковий стан УЗЕ.

Таблиця 2 – Математичне представлення алгоритму.

$T_{EE}(t) \geq T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) \leq -0.5P_{dec}$		
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{13E}(t) = MAX[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) - 0.5P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$	$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) + P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) - P_{13E}(t)$	$P_{13E}(t) = MAX[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t) - 0.5P_{sup}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$T_{EE}(t) > T_{EE}^{up} > T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$		$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) + P_{13E}(t) \leq -0.5P_{dec}$		$P_{13E}(t) = MIN[P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{sup}(t) = P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) + P_{13E}(t)$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		
$T_{EE}(t) \leq T_{EE}^{up}$		
$P_{CEC}^{max}(t) \geq P_{TEH}(t)$		$P_{CEC}^{max}(t) < P_{TEH}(t)$
$P_{13E}(t) = MIN[P_{dec} + P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$		$P_{13E}(t) = MIN[P_{dec} + P_{CEC}^{max}(t) - P_{TEH}(t); P_{CEC}^{max}(t)]$
$P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) - P_{13E}(t) \leq -0.5P_{dec}$		$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t)$
III		
$P_{sup}(t) = -0.5P_{dec}$	$P_{sup}(t) = P_{TEH}(t) - P_{CEC}^{max}(t) - P_{13E}(t)$	$P_{sup}(t) = -P_{CEC}^{max}(t) + P_{TEH}(t) + P_{13E}(t)$
$P_{CEC}^{max}(t) = P_{TEH}(t) - P_{sup}(t) + P_{13E}(t)$		

Для моделювання було використано дані споживання промислового споживача з волатильним рівнем навантаження між сезонами, з наявними УЗЕ на генерацією з фотоелектричної установки. Проведено моделювання для режимних днів всіх сезонів. Використана модель самовиробництва. Проведено порівняння роботи алгоритму динамічної зміни сценаріїв роботи установок з статичним сценарним налаштуванням. Результати сформованих графіків електричних навантажень активного споживача наведені на рисунку 2.

Як визначено з сформованих графіків, алгоритм динамічного керування має зміщені піки навантаження споживача симетричні мережі також зменшується величина піків у всіх випадках, окрім літнього графіку (рис.2(г)), де величини піків співпадають. Аналіз режимних характеристик графіків (табл. 3) показує переважно підвищення стабільності та прогнозованості поведінки навантаження активного споживача, окрім зимового сезону, що може бути пов'язано з особливістю самого ГЕН споживача, поведінкою ціни на РДН, а також активністю генерації з ВДЕ в цей сезон.

Також стратегія динамічного керування показала кращі економічні результати для активного споживача (табл. 4). Такий ефект проглядається для діб всіх сезонів, що відображається на загальному річному фінансовому результаті зобов'язань активного споживача за імпортовану електричну енергію. Також табл. 4 відображає економічні обмеження динамічної моделі, відносно яких відбувалось прийняття рішення щодо вибору сценарію в конкретний момент часу, де ціна прийняття рішення заряду та розряду.

Висновки

В результаті проведеного дослідження встановлено, що використання методики на базі ринково-орієнтованого алгоритму керування установками активних споживачів має позитивний ефект як на фінансові показники діяльності його на ринку електричної енергії, так і на режимні характеристики графіків електричних навантажень, які вказують на більшу ступінь прогнозованості його поведінки.

Особливість застосованого керування на основі прийняття найкращого рішення в даний момент часу відкриває можливість для активних споживачів та їх агрегаторів. Застосування даного підходу можливе на всіх спотових сегментах ринку електричної енергії, що є ефективним інструментом для керування наявними потоками електричної енергії активного споживача.

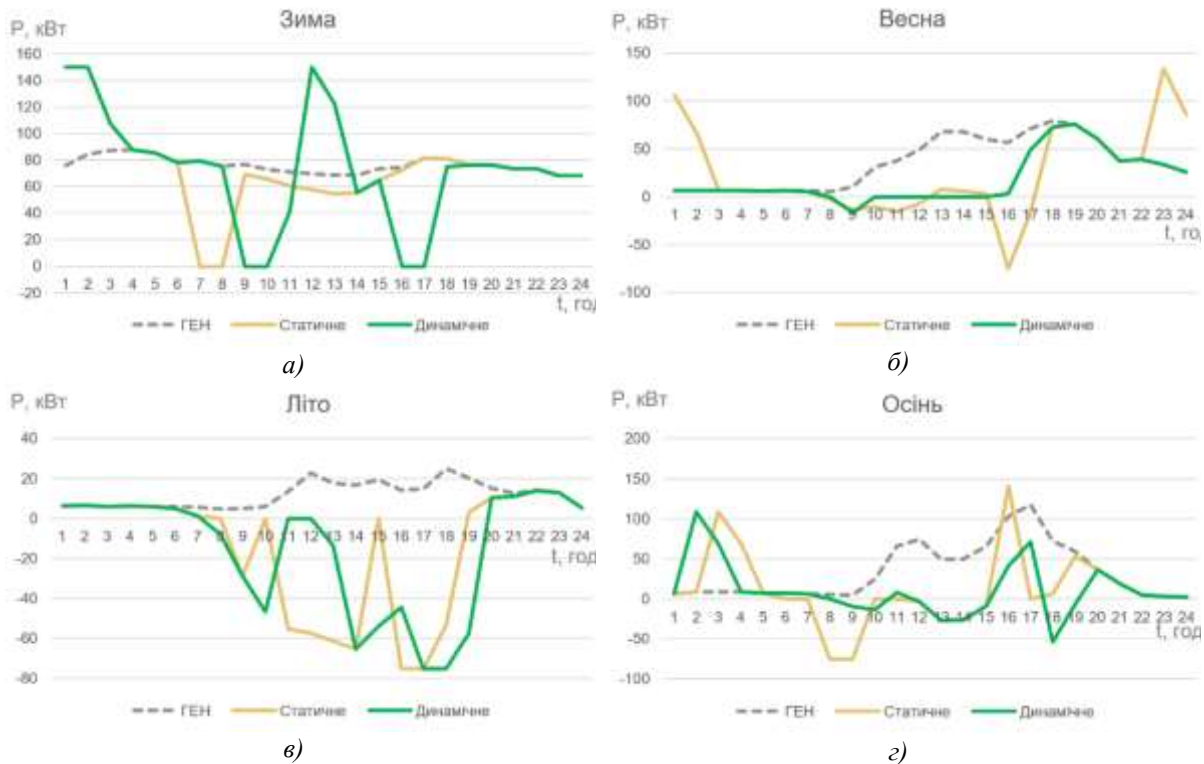


Рисунок 2 – Результати сформованих графіків навантаження активного споживача при роботі з використанням статичного та динамічного сценарного керування для періодів: зима (а), весна (б), літо (в), осінь (г).

Таблиця 3 – Режимні характеристики графіків навантаження за статичного та динамічного сценарного керування

		Рср, кВт	Рмакс, кВт	Кз, в.о.	Медіана, кВт	СКВ, кВт	Квар, в.о.
Зима	Статичне	73,179	150,000	0,488	72,983	32,559	0,445
	Динамічне	76,584	150,000	0,511	75,831	46,224	0,604
	Δ	4,45%	0,00%	4,45%	3,75%	29,56%	26,28%
Весна	Статичне	24,312	133,608	0,182	6,455	46,131	1,897
	Динамічне	17,645	75,699	0,233	6,230	24,867	1,409
	Δ	-27,42%	-76,50%	21,94%	-3,62%	-46,09%	-25,72%
Літо	Статичне	-15,745	13,964	-1,128	2,113	31,706	-2,014
	Динамічне	-15,745	13,964	-1,128	0,521	30,129	-1,914
	Δ	0,00%	0,00%	0,00%	-75,34%	-4,97%	-4,97%
Осінь	Статичне	10,445	141,187	0,074	2,971	46,287	4,431
	Динамічне	10,445	108,503	0,096	5,577	33,787	3,235
	Δ	0,00%	-30,12%	23,15%	87,72%	-36,99%	-36,99%

Таблиця 4 – Економічні результати моделювання

	Зима (1 доба)	Весна (1 доба)	Літо (1 доба)	Осінь (1 доба)	Рік
Статичне, грн	-13 486,57	-3 607,01	563,22	-2 221,32	-1 687 651,82
Динамічне (найкращий), грн	-13 117,67	-2 670,66	1 199,37	-1 950,55	-1 488 555,46
Цінове обмеження для динамічного керування (Цпр.заряд...Цпр.розряд), грн	7,5...9,53	3,5...5,53	3,0...5,3	7,0...9,03	-
Ефект, %	2,74	25,96	53,04	12,19	11,80

A. Pystovyi¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0007-9774-4688

Y. Veremiichuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MANAGEMENT OF ENERGY FLOWS OF ACTIVE CONSUMERS IN THE ELECTRICITY MARKET

The study highlights the issue of increasing the number of active consumers in integrated energy systems operating in the electricity market. The work is aimed at solving problems related to the low predictability of active consumer behavior and its impact on the overall network with the effective implementation of economic incentives.

A methodology is proposed for controlling active consumer or aggregator installations that can make changes to the behavioral strategy of the load profile, taking into account economic factors and technical constraints in accordance with the current state of the energy system.

A control algorithm has been developed based on a hybrid method of logical programming of constraints with linearization of functions, which made it possible to obtain optimal results for controlling energy flows, taking into account market and system constraints.

The simulation used the consumption profiles of industrial consumer electrical installations and electricity price indicators on the day-ahead market. During the simulation, various scenario management strategies for electrical installations were identified, which are predominantly used in the modern approach to managing active consumer equipment.

Keywords: active consumer, industrial consumer, self-production, own consumption, facility management, electricity market, renewable energy sources, energy storage facilities.

References

1. Bogoroditska G. E., Voitov S. G., Dychenko S. Yu. Analysis of trends in the development of renewable energy in the EU. Change management and innovation. 2025. No. 14. P. 186–191. DOI:10.32782/cmi/2025-14-30.
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EU and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EU and 2006/32/EU : European Union Directive of 25.10.2012 no. 2012/27/EU: as of 1 January 2021. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text (date of access: 20.10.2025).
3. Law of Ukraine No. 3220-IX of 30.06.2023 "On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Restoration and "Green" Transformation of the Energy System of Ukraine" URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text> (date of access: 20.10.2025).
4. Law of Ukraine No. 555-IV "On alternative energy sources" URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (date of access: 08.10.2025).
5. Pustovyi A. M., Veremiychuk Yu. A. Analysis of mechanisms for stimulating the development of small-scale distributed generation on the side of household consumers in market conditions. Energy and Automation. 2025. No. 1. P. 78–89. DOI: 10.31548/energiya1(77).2025.078.
6. Kozachuk O. I. Intellectualization of electricity distribution networks with photovoltaic power plants and active electricity consumers.: dissertation of PhD in Technical Sciences : 141. Vinnytsia, 2024. 150 p.

Надійшла: 08.12.2025

Received: 08.12.2025