

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ДОВГОТРИВАЛИХ 24-ГОДИННИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ПОТОКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МІКРОМЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

А.А. Щербань^{1*} академік НАНУ, О.Д. Подольцев^{1**}, докт. техн. наук,
Р.В. Білянін^{2***}, канд. техн. наук, Т.Ю. Антоненко^{2****}, канд. техн. наук, Ю.В. Дадажанов^{2*****}

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: podol@ied.org.ua.

² ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ",
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна.

У роботі розглянуто енергетичну стратегію реалізації надійного безперебійного електроживлення критично важливого технологічного обладнання промислового підприємства України в сучасних воєнних умовах шляхом створення в ньому промислової мікромережі та вирішення науково-технічних задач з оптимального використання її елементів і зменшення загальних витрат, які враховують вартість електроенергії, отримуваної від кожного джерела мікромережі. Задля вирішення вказаної задачі використовувався метод комп'ютерного моделювання. Показано, що для моделювання в мікромережі довготривалих (24-годинних) електромагнітних процесів доцільно використовувати узагальнений метод розрахунку комплексних струмів, який зазвичай застосовують для розрахунку електричних кіл синусоїдного струму. Але в даній задачі треба ще додатково враховувати, що в мікромережі повільно змінюються в часі не тільки амплітуди струмів, але і їхні фази, тому бажано застосовувати метод динамічного фазору, за яким розрахунок проводиться одночасно у комплексній і часовій площинах. Для реалізації такого методу в пакеті Matlab/Simulink необхідно розробляти відповідні системні моделі для всіх джерел електроживлення та змінного у часі навантаження. Наведено результати розрахунку довготривалих (протягом доби) потоків активної та реактивної потужностей в мікромережі типового промислового підприємства, що містить такі джерела електроенергії, як когенераційна установка і сонячна електростанція, які можуть працювати як паралельно із зовнішньою електромережею, так і без неї. Визначено добові витрати на електроенергію, яка отримується від кожного джерела електроживлення. Оскільки в мікромережах використовуються різні джерела електроживлення, то під час визначення шляхів зменшення загальних витрат на електроенергію слід розглядати різні сценарії підключення джерел електроживлення та їхній взаємний вплив на загальні витрати. Бібл. 32, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: промислова мікромережа, критично важливе електрообладнання, змінення в мікромережі активної та реактивної електричних потужностей, метод розрахунку довготривалих електричних процесів, комп'ютерний аналіз у пакеті Matlab/Simulink.

Вступ. На теперішній час одним із важливих і реалістичних підходів до здійснення надійного забезпечення електричною енергією критично важливого електрообладнання на промисловому підприємстві є створення на ньому локальної мікромережі [1–3]. Визначення поняття мікромережі наведено в [4–6] і сформульовано як електромережа низької та/або середньої напруги, що має у своєму складі джерела розподіленої електрогенерації і здатна працювати як в ізолюваному режимі, так і паралельно із зовнішньою електроенергетичною системою.

Згідно стандарту IEEE 1547.4 острівна енергосистема з розподіленою електрогенерацією може розглядатися як мікромережа, якщо вона відповідає чотирьом умовам: 1) містить власні (зокрема відновлювані) джерела електроенергії та навантаження; 2) може працювати паралельно з загальною системою електропостачання і від'єднуватися від неї, працюючи в острівному режимі; 3) має локальну електроенергетичну систему; 4) є спеціально спроектованою [7–9]. Особливо важливо, що мікромережа може працювати в автономному (острівному) режимі, тобто бути від'єднаною від основної електромережі [10–12]. Причому вона може включати в себе різні споживачі електроенергії

© Щербань А.А., Подольцев О.Д., Білянін Р.В., Антоненко Т.Ю., Дадажанов Ю.В., 2026
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-0200-369X>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>;
*** <https://orcid.org/0000-0003-3781-6233>; **** <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>;
***** <https://orcid.org/0009-0002-7462-8418>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

(навантаження) та власні розподілені енергетичні ресурси, такі як когенераційні установки, дизельні й бензинові електрогенератори, автономні відновлювані джерела енергії (ВДЕ) [13–15], електромагнітні й напівпровідникові перетворювачі параметрів електроенергії, які мають системи проміжного її накопичення [16], зокрема акумуляторні батареї різного типу [13, 17] та суперконденсатори [18, 19]. Використання таких накопичувачів в електроіндукційних [20] та електроімпульсних установках [21, 22] забезпечує реалізацію короточасних режимів великої потужності без порушення режимів електроживлення чутливих систем діагностики [16] і комп'ютерної техніки [23]. За паралельної роботи з основною мережею мікромережа може передавати в неї надлишок своєї енергії, покращуючи економічні характеристики підприємства.

Під час аварійних відключень основної мережі мікромережа продовжує працювати, але вже в ізольованому (острівному) режимі, забезпечуючи в першу чергу безперервне електроживлення критично важливого електротехнологічного обладнання всієї системи від своїх автономних джерел електроенергії та систем її попереднього накопичення в акумуляторах [19, 24] і суперконденсаторах [18, 19]. При цьому центральний контролер і локальні контролери мікромережі здійснюють диспетчерську роботу всієї системи електроживлення підприємства [24] і за необхідності можуть відключати навантаження, які не відносяться до критично важливих.

Моделювання електромагнітних процесів у мікромережі дає змогу вивчати на етапі її проектування та побудови основні закономірності протікання усталених і перехідних режимів та змінення локальних активних і реактивних потужностей та прогнозувати основні електроенергетичні та перехідні електромагнітні процеси в мікромережі за різних режимів електроживлення критично важливого електротехнологічного обладнання. При цьому реалізуються найбільш оптимальні методи та підходи, представлені у роботах [25–27].

На даний час економічно найбільш ефективним для промислового підприємства слід вважати режим моделювання 24-годинної роботи мікромережі з отриманням попередньої інформації про погодинну вартість електроенергії за добу наперед – як прогнозовану ціну в сегменті РДН. У такому режимі можна враховувати всю енергію, що була передана в мікромережу впродовж доби. Проте якщо чисельний комп'ютерний розрахунок електромагнітних процесів в мікромережі проводити в часовій області за допомогою моделей високого рівня деталізації, то треба використовувати відносно малий крок інтегрування (на рівні 10^{-5} с) задля отримання задовільної точності розрахунків. Але чисельне інтегрування з таким кроком довготривалого 24-годинного електромагнітного процесу потребувало б значних комп'ютерних витрат, що майже унеможливило б проведення багатоваріантних розрахунків під час вирішення оптимізаційних задач.

Тому у даній роботі для моделювання такого процесу запропоновано використовувати символічний метод розрахунку комплексних струмів та напруг за умови, що амплітуди та фази цих синусоїдних величин повільно змінюються в часі. Такий метод називають методом динамічного фазору [28, 29], згідно з ним чисельний розрахунок комплексних струмів і напруг виконується одночасно у комплексній та часовій площинах. Його доцільно використовувати, коли цікавляться тільки повільними зміненнями всіх величин із характерним часом $\tau \gg T$, де $T = 20$ мс є періодом змінення струмів промислової частоти 50 Гц. В мікромережі, що досліджується, змінення у часі як рівня сонячної радіації, так і навантаження – технологічного обладнання підприємства – відповідають цим умовам, що зумовлює доцільність використання такого методу. Але для його реалізації необхідно створити відповідні моделі всіх елементів мікромережі, для яких можна використовувати класичний символічний метод розрахунку – класичний метод фазору.

Тому, **метою даної роботи** були: 1) розробка комп'ютерної моделі промислової мікромережі, що містить такі джерела електроенергії, як когенератор, дизель-генератор і сонячна електростанція, які працюють паралельно із зовнішньою електромережею або без неї, що дає змогу у разі використання методу динамічного фазору в електричних колах такої мікромережі розраховувати довготривалі процеси (протягом доби і навіть тижня); 2) визначення в мікромережі змінень активної та реактивної потужностей за проміжок часу – 24 години та 3) виконувати аналіз різних сценаріїв підключення основних елементів мікромережі із урахуванням вартісних характеристик електричної енергії, яка генерується різними джерелами електроживлення.

Для реалізації цієї мети в роботі, як приклад, розглядається промислова мікромережа, яка може бути створена на типовому промисловому підприємстві України, з урахуванням сучасних умов його електропостачання.

Енергетична стратегія типового вітчизняного промислового підприємства задля забезпечення його безперебійного та надійного електропостачання.

На сьогодні електроенергетика суттєво впливає на всі сфери життєдіяльності людей, тобто вона є життєзабезпечуючим техногенним фактором, який суттєво впливає на розвиток людської цивілізації. Якщо ще на початку лютого 2022 року диверсифікація капіталу у промислових компаніях України була за такими основними інвестиційними напрямками, як освоєння нової продукції, розвиток нових виробництв, придбання та модернізація спеціалізованого обладнання, то вже в кінці лютого 2022 р. трансформація, що почала відбуватися в різних сферах через воєнний стан, змусила збалансувати та направити їх на ті напрямки розвитку, які дають можливість безперервно працювати та своєчасно виробляти готову продукцію. Насамперед основні інвестиційні напрями були спрямовані на досягнення енергетичної безпеки та безперебійності критично важливих підприємств, і головною проблемою стала розробка та впровадження нової енергетичної стратегії в умовах воєнного стану для реалізації такої енергонезалежності та безперебійності.

Початком реалізації вказаної енергетичної стратегії може стати придбання і монтаж на підприємстві електростанції, потужність генерації енергії якої не залежить від пори року, погодних умов та сонячної радіації. Таким джерелом незалежного електроживлення може бути когенераційна газова установка. Якщо використовувати також сонячну електростанцію, то треба визначити мапу сонячної активності на території підприємства та бажане розташування сонячних батарей задля отримання максимальної генерації електроенергії. Бажано також мати джерела безперебійного електроживлення відповідальних енергооб'єктів. У даній роботі використовувалися джерела такого електроживлення потужністю 250 кВА, 400 кВА, 500 кВА і 800 кВА. Всі вказані джерела були об'єднані в єдину локальну енергосистему підприємства – мікромережу, схематично показану на рис. 1.

Джерела безперервного живлення бажано розташовувати біля критично важливого навантаження і тому їх було внесено до блоку – промислове виробництво. Характеристику такої електромережі наведено на рис. 2.

Всіх споживачів електроенергії можна віднести до трьох типів. Перший – це критично важливе електротехнологічне обладнання, яке у разі відключення зовнішньої електромережі не може навіть короткочасно (протягом 2–10 мс) залишатися без електроживлення. Тому воно використовує джерела безперебійного живлення.

Другий тип – електрообладнання загального призначення, яке можна відключити у разі зникнення електроживлення від зовнішньої електромережі. Також існує третій тип обладнання, яке має відносно невелику потужність, проте повинно бути постійно під'єднаним до джерела електричної енергії. Це освітлення, аварійне і вимірювальне обладнання та силові трансформатори в режимі холостого ходу.

Побудова на підприємстві описаної вище мікромережі дає змогу забезпечити частково незалежне електропостачання, здійснювати акумулювання та стабілізацію пікових навантажень на підприємстві, а також в певні проміжки часу і генерацію електроенергії в зовнішню електромережу стороннім споживачам. Разом з цими заходами на підприємстві також доцільно впровадити такі енергозберігаючі технології, як утеплення приміщень, встановлення частотних перетворювачів, утилізаторів тепла, енергозберігаючого обладнання, модернізацію системи обліку електроенергії, тощо.

Реалізація вищезазначеної енергетичної стратегії дає можливість перейти підприємству зі статусу споживача електричної енергії в статус активного споживача. Це означає, що компанія своїм генеруючим та акумулюючим обладнанням може не тільки забезпечувати власні потреби в електроенергії, а й до 50% від загального обсягу річного споживання електроенергії постачати її у міську електромережу для сторонніх споживачів у терміни, коли вартість в ній електроенергії є найбільш коштовною.

Це дає змогу компанії отримувати додаткові кошти, які можливо використовувати на розвиток підприємства. Тому для підвищення результативності мікромережі в роботі запропоновано використання методу комп'ютерного моделювання і проведення аналізу різних сценаріїв її роботи.

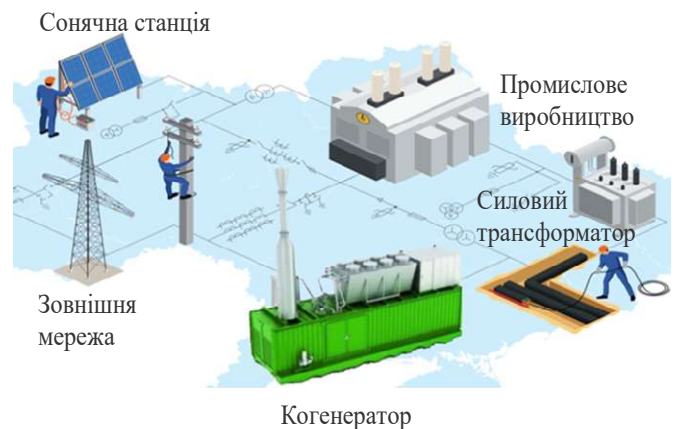


Рис. 1

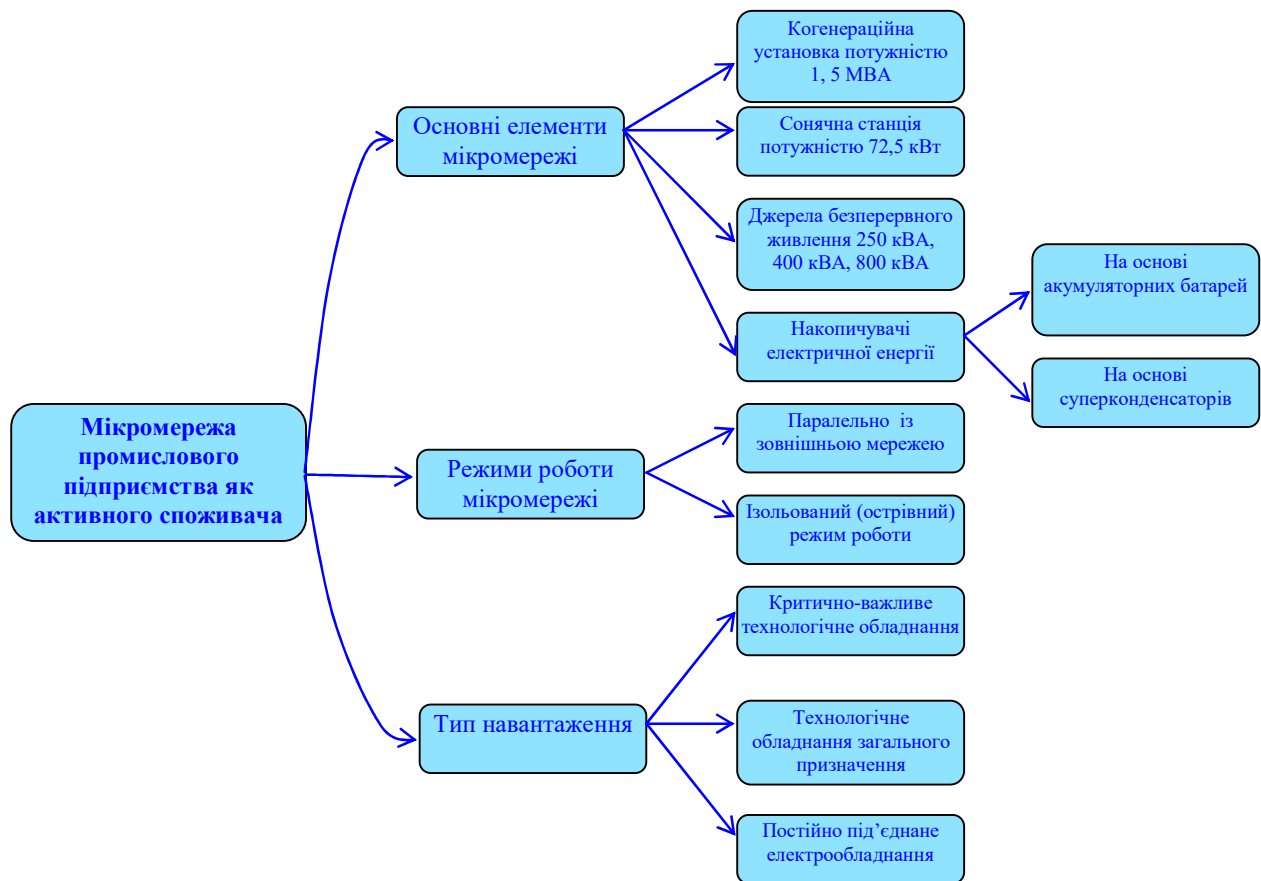


Рис. 2

Комп'ютерна Simscape-модель електричної мікромережі підприємства. На рис. 3 показано створену в пакеті Matlab/Simulink імітаційну Simscape-модель промислової мікромережі, що досліджується. Основними її елементами, моделі яких представлено на цьому рисунку, є наступні.

- 1) Когенераційна установка з активною потужністю 1,5 МВт та максимальною реактивною потужністю 0,5 МВАр.
- 2) Сонячна електростанція встановленою потужністю 72,5 кВт.
- 3) Силивий трифазний трансформатор 6/0,4 кВ потужністю 6,3 МВА.
- 4) Навантаження, що складається з технологічного обладнання підприємства та характеризується активною та реактивною потужностями, значення яких змінюються у часі впродовж доби за визначеним законом.
- 5) Силиві кабельні й повітряні лінії електропередачі, що з'єднують елементи мікромережі.

При цьому, в моделі на рис. 3 не наведено джерела безперервного живлення, оскільки вони працюють в аварійному режимі вимкнення джерел електроенергії, що потребує особливого розгляду.

В моделі також ураховується, що величину напруги задає зовнішня електромережа, а кожен із трьох наведених блоків має однакову структуру – містить два керованих джерела струму, комплексні значення яких розраховуються таким чином, щоб активна і реактивна потужності на виході блоку дорівнювала заданим функціям часу.

Як приклад внутрішню структуру блоку навантаження показано на рис. 4, де вхідне значення змінної у часі активної потужності $P_{Load}(t)$, що характеризує споживання на підприємстві електроенергії, величину якої технологічними установками характеризує графічна залежність, наведена на рис. 5, а.

В той же час змінне у часі значення реактивної потужності $Q_{Load}(t)$ цих технологічних установок навантаження визначається з умови, що коефіцієнт їхньої потужності в кожен момент часу приблизно дорівнює 0,9.

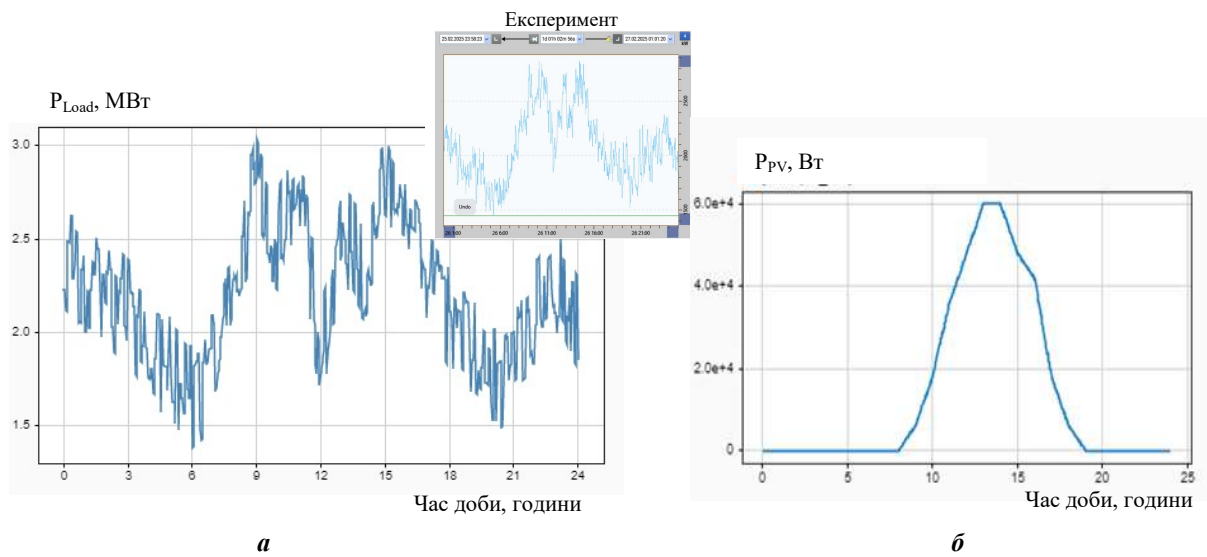


Рис. 5

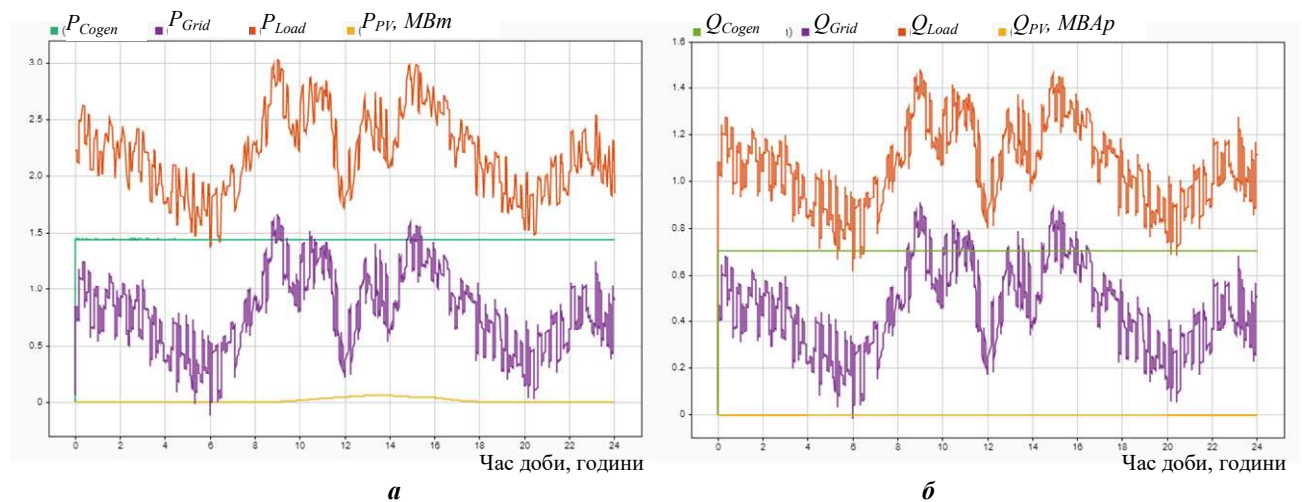


Рис. 6

Із наведених на рис. 6 результатів розрахунків видно, що електроенергію у мікромережі генерує переважно когенераційна установка і зовнішня електромережа. При цьому в кожен момент часу виконується баланс активної потужності в мікромережі

$$P_{Grid} + P_{Cogen} + P_{PV} = P_{Load} + \sum P,$$

де $\sum P$ – електричні втрати в силовому трансформаторі та в двох лініях електропередавання, що використовувалися в моделі на рис. 3. Ці втрати також розраховуються як функції часу, а їхнє значення складало декілька відсотків від активної потужності навантаження.

Реактивна потужність навантаження, у кожен момент часу компенсується когенератором та зовнішньою мережею, тому в мікромережі виконується також баланс і реактивної потужності

$$Q_{Grid} + Q_{Cogen} = Q_{Load} + \sum Q,$$

де $\sum Q$ – реактивна потужність силового трансформатору і двох ліній електропередавання.

При цьому отримане значення активної потужності характеризує інтенсивність добового споживання електроенергії (тобто за одиницю часу) на підприємстві.

Аналіз добових витрат на електроенергію підприємством. Змінням активної потужності в мікромережі, які показано сірими стрілками на рис. 3 і значення яких наведено на рис. 5, можна поставити у відповідність інтенсивність грошових витрат за споживану щогодини електричну енергію від відповідних джерел електроживлення. Слід зазначити, що ці потоки характеризуються як

величиною, так і напрямком. Якщо електрична енергія від сонячної станції та когенератора завжди поступає в мікромережу, то відповідні грошові потоки на рис. 3 теж спрямовані до цих джерел.

Взаємодія зовнішньої мережі із мікромережею є більш складною – потік електроенергії між ними в певні проміжки часу може бути спрямованим як в прямому (до мікромережі), так і в зворотному (від джерел мікромережі до зовнішньої мережі, коли підприємство продає надлишок енергії зовнішньому споживачу) напрямках. На рис. 3 такі можливі варіанти показано двонаправленими об'ємними стрілками як для активної потужності P_{Grid} , так і для грошового потоку $C'_{Grid} \cdot P_{Grid}$, пов'язаному з цією потужністю. Тут C'_{Grid} – ціна на електроенергію, що поступає від зовнішньої мережі або передається в цю мережу від підприємства.

Розраховані на цій основі потоки електроенергії в мікромережі дають можливість розрахувати добові витрати на електроенергію, що є важливим показником для підприємства, яке випускає конкурентоспроможну продукцію. Для розрахунку цих витрат використовувалися наступні значення питомих витрат підприємства на виробництво 1 кВт год електроенергії:

– сонячною станцією – $C'_{PV} = 5,6$ грн/(кВт·год);

– когенераційною установкою – $C'_{Cg} = 5,7$ грн/(кВт·год).

При цьому під час розрахунку враховувалися вартість генеруючого обладнання і термін його окупності на підприємстві. Також для когенераційної установки враховувалася вартість природного газу для підприємства на момент проведення цих досліджень.

Ціна на електроенергію, що поступає від зовнішньої електромережі або передається в цю мережу – C'_{Grid} , розраховується з використанням погодинної ціни купівлі або продажу електроенергії в сегменті РДН $C^{РДН}_{II}$ за наступним виразом:

$$C'_{Grid} = \begin{cases} C^{РДН}_{II}, & P_{Grid} > 0, \\ C^{РДН}_{II}, & P_{Grid} < 0. \end{cases}$$

В цьому виразі режим $P_{Grid} > 0$ означає, що мікромережа споживає електроенергію від зовнішньої мережі, а $P_{Grid} < 0$ – мікромережа генерує електроенергію в зовнішню мережу, і підприємство продає електроенергію зовнішньому споживачу за ціною, зумовленою відповідними нормативами – приймалося $C^{РДН}_{II} = 8,96$ грн/(кВт·год)

для проведення подальших розрахунків. Погодинні значення $C^{РДН}$ для підприємства, що використовувалися в цих розрахунках, показано на рис. 7.

Використовуючи ці показники та розраховані і показані на рис. 6, а потоки активної потужності, добові витрати на електроенергію для підприємства у разі використання мікромережі розраховуються за загальною формулою

$$C_{Grid} = \int_0^{24} C'_{Grid}(t) \cdot P_{Grid}(t) dt, \quad C_{PV} = \int_0^{24} C'_{PV} \cdot P_{PV}(t) dt, \quad C_{Cogen} = \int_0^{24} C'_{Cogen} \cdot P_{Cogen}(t) dt. \quad (1)$$

Загальні добові витрати на електроенергію складають

$$\sum C = C_{Grid} + C_{PV} + C_{Cogen}, \text{ [грн]}. \quad (2)$$

На рис. 8 показано погодинні витрати на електроенергію від трьох розглянутих вище джерел живлення, які розраховано як $C'_{Grid}(t) \cdot P_{Grid}(t)$ (для зовнішньої мережі), $C'_{PV} \cdot P_{PV}(t)$ (сонячна станція) та $C'_{Cg} \cdot P_{Cg}(t)$ (для когенератора). Загальні добові витрати, що розраховувалися за виразами (1) і (2) для досліджуваного режиму мікромережі, мають наступні значення: $C_{Grid} = 121$ тис. грн, $C_{PV} = 2$ тис. грн, $C_{Cogen} = 198$ тис. грн, $\sum C = 321$ тис. грн. Видно, що найбільші витрати пов'язані з роботою когенератора і тому будь-яке зменшення ціни на електроенергію від нього суттєво вплине на загальні витрати.

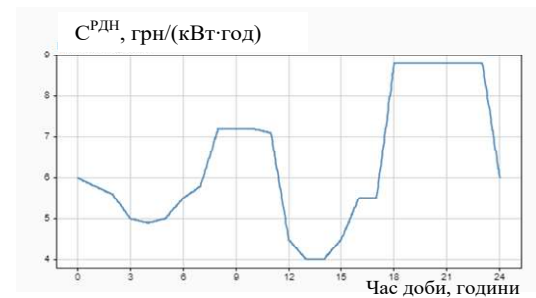


Рис. 7

Аналіз добових витрат на електроенергію за різних сценаріїв роботи мікромережі. Визначення стратегії зменшення на підприємстві витрат на електроенергію (за добу, місяць та рік) є актуальною задачею, задля вирішення якої можуть бути задіяні різні підходи і, в тому числі, комп'ютерне моделювання. Такий підхід передбачає побудову відповідної моделі мікромережі, постановку оптимізаційної задачі та отримання оптимального рішення. В найпростішому варіанті постановка задачі оптимізації може включати планування різних сценаріїв роботи мікромережі та вибору з їх числа такого, що характеризується найменшими добовими витратами на електроенергію для підприємства. В даній роботі, реалізуючи саме такий підхід, на основі розробленої та описаної вище Simscape-моделі мікромережі проведено розрахунки декількох сценаріїв, описаних у таблиці, та проведено їхній

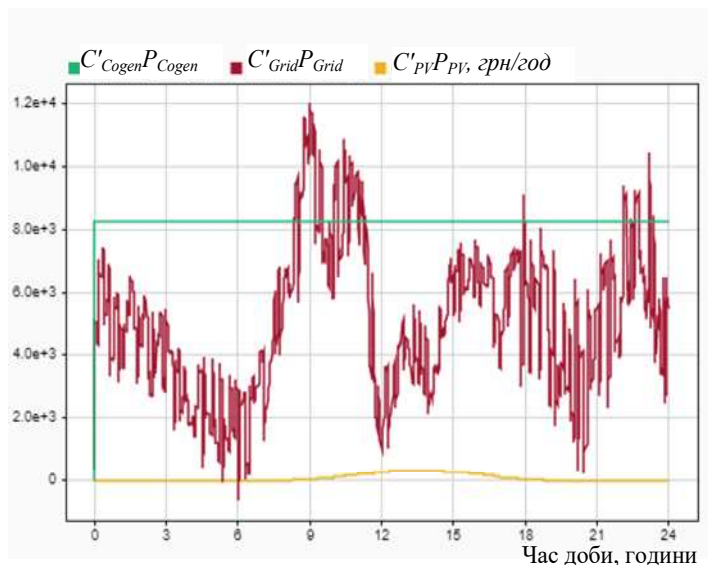


Рис. 8

№ п/п	Короткий опис сценаріїв роботи мікромережі	Загальна сума добових витрат $\sum C$, тис. грн.
1	Електроживлення здійснюється тільки від зовнішньої мережі	345
2	Когенератор і сонячну електростанцію підключено цілодобово	321
3	Когенератор та сонячну станцію підключено з 6-00 до 24-00.	318
4	Потужність когенератора збільшено з 1,45 до 2 МВт.	309
5	Потужність когенератора збільшено з 1,45 до 2,5 МВт.	287
6	Потужність когенератора збільшено з 1,45 до 3 МВт.	252

порівняльний аналіз за критерієм – значення загальних добових витрат на електроенергію $\sum C$ – див. вираз (2). Припускалося, що для збільшення потужності когенератора (позиції 4–6 у таблиці) на підприємстві додатково встановлено ще один когенератор потужністю 1,5 МВт. Із таблиці видно, що оскільки ціна на електроенергію, що продається в зовнішню мережу, є відносно високою – складає 8,96 грн./(кВт·год), то у разі збільшення потужності когенератора або використання, наприклад, додаткового когенератора чи дизель-генератора, загальні добові витрати на електроенергію можуть стати меншими – див. варіанти 5 і 6 у таблиці.

Висновки. 1. Досліджено і визначено наукові та практичні умови реалізації надійного безперебійного електроживлення критично важливого технологічного обладнання стратегічно важливих підприємств України в сучасних умовах.

2. Обґрунтовано, що вказану стратегію доцільно реалізувати шляхом створення мікромережі з когенераційними установками, дизель-генераторами, відновлюваними джерелами електроенергії, акумуляторними і конденсаторними накопичувачами електроенергії та спеціальними джерелами безперебійного електроживлення у єдину локальну

енергосистему підприємства – мікромережу, схематично показану на рис. 1.

3. У процесі реалізації вказаної стратегії в електрообладнанні мікромереж (визначенні та оптимізації довготривалих 24-годинних електромагнітних процесів) треба урахувати, що в них повільно змінюються в часі не тільки амплітуди струмів, але і їхні фази, тому в розрахунках доцільно використовувати так званий узагальнений метод Фазору з проведенням досліджень одночасно у комплексній і часовій площинах.

4. Оскільки в мікромережах використовуються різні джерела електроживлення, то під час визначення шляхів зменшення загальних витрат на електроенергію слід розглядати різні сценарії підключення джерел електроживлення та їхній взаємний вплив на загальні витрати.

1. Microgrid. Design, Optimization, and Applications. Ed. by Amit Kumar Pandey. CRS Press, 2024. 316 p.
2. Patrao .I, Figueres E., Garcerá G., González-Medina R. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. *Renew Sustain Energy Rev.* 2015. No 43. Pp. 415-424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.054>.
3. Pabbuleti B., Somlal J. A review on hybrid ac/dc microgrids: Optimal sizing, stability control and energy management approaches. *J. Crit. Rev.* 2021. No 7(1). Pp. 371-381. DOI: <https://doi.org/10.31838/jcr.07.02.72>.
4. SGCG/M490/G_Smart Grid Set of Standards 25 Version 3.1. Official edition. 2014. 259 p.
5. IEC TS 62898-1: 2017+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. 2023. 78 p.
6. IEC TS 62898-2: 2018+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 2: Guidelines for operation. 2018. 38 p.
7. Kroposki B., Basso T., DeBlasio R. Microgrid standards and technologies. *Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, PA, USA, 20–24 July 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/pes.2008.4596703> (accessed at 15.06.2025).
8. Bayindir R., Colak I., Fulli G., Demirtas K. Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016. Vol. 66. Pp. 499-516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>.
9. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkaruplyo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. IEEE 2nd KhPI Week on *Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 13-17 September 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>.
10. Hatziaargyriou N., Hiroshi Asano, Reza Iravani, Chris Marnay. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine.* 2007. Vol. 5. No 4. Pp. 78-94. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpae.2007.376583>.
11. Sachidananda Sen, Vishal Kumar. Microgrid modelling: A comprehensive survey. *Annual Reviews in Control.* 2018. Vol. 46. Pp. 216-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.010>.
12. Liang H., Zhuang W. Stochastic Modeling and Optimization in a Microgrid: A Survey. *Energies.* 2014. Vol. 7(4). Pp. 2027-2050. DOI: <https://doi.org/10.3390/en7042027>.
13. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M.E.H. An Energy Management System for Hybrid Energy Sources-based Stand-alone Marine Microgrid. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science.* 2019. Vol. 322. P. 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/322/1/012001>.
14. Ostapchuk O.V., Shevchenko I.V. Use of hybrid systems based on renewable sources in microgrid: an overview. *Vidnovliuvana energetika.* 2022. No 4. Pp. 9-25. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).9-25](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).9-25). (Ukr)
15. Yeliz Yoldaş, Ahmet Önen, Muyeen S.M., Athanasios V. Vasilakos, İrfan Alan. Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2017. Vol. 72. Pp. 205-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.064>.
16. Shcherba A., Vinnychenko D., Suprunovska N., Roziskulov S., Dyczko A., Dychkovskiy R. Management of Mobile Resonant Electrical Systems for High-Voltage Generation in Non-Destructive Diagnostics of Power Equipment Insulation. *Electronics.* 2025. No 14(15). P. 2923. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14152923>.
17. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M., Guerrero J.M. Energy Management System for an Islanded Microgrid With Convex Relaxation. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2019. Vol. 55. No 6. Pp. 7175-7185. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2019.2917357>.
18. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Biletsky O.O. Increasing energy efficiency of charge circuits of supercapacitors from voltage source. Proceedings IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS-2020)*, Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. Pp. 164-167. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160218>.
19. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analysis of transient and steady modes in the power supply system of electric vehicles, which contains a battery and supercapacitors connected in parallel. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2025. No 5. Pp. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.05.019>.
20. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Suprunovska N.I., Bilianin R.V., Antonets T.Yu., Masluchenko I.M. Modeling and analysis of electro-thermal processes in installations for induction heat treatment of aluminum cores of power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics.* 2024. No 1. Pp. 51-60. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.07>. (Ukr)
21. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2018. No 3. Pp. 43-47. DOI: <httpS://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>.
22. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2022. No 2. Pp. 3-11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>.

23. Shcherba A., Podoltsev O., Kucheriava I., Hutorova M., Petryshyn L., Pazynich Yu. Computer simulation and management of partial discharges in XLPE insulation of high-voltage power cable. *Polityka Energetyczna, Energy Policy Journal*. 2025. No 28(3). Pp. 5-26. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/208278>.
24. Li Y., Nejabatkhah F. Overview of control, integration and energy management of microgrids. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2014. Vol. 2. No 3. Pp. 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0063-1>.
25. Sirviö K.H., Laaksonen H., Kauhaniemi K., Repo S. Evolution of the electricity distribution networks—active management architecture schemes and microgrid control functionalities. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No 4. Pp. 1772. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11041772>.
26. Gokul Sidarth Thirunavukkarasu, Mehdi Seyedmahmoudian, Elmira Jamei, Ben Horan, Saad Mekhilef, Alex Stojcevski. Role of optimization techniques in microgrid energy management systems. A review. *Energy Strategy Reviews*. 2022. Vol. 43. Article no: 100899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100899>.
27. Ahmad Alzahrani, Mehdi Ferdowsi, Pourya Shamsi, Cihan H. Dagli. Modeling and Simulation of Microgrid. *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 114. Pp. 392-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.053>.
28. Yang T., Bozhko S., Le-Peuvedic J.M., Asher G., Hill C.I. Dynamic Phasor Modelling of Multi-Generator Variable Frequency Electrical Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016. Vol. 31. Issue 1. Pp. 563-571. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2399371>.
29. Sanders S.R., Noworolski J.M., Liu X.Z., Verghese G.C. Generalized averaging method for power conversion circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1991. Vol. 6. Pp. 251-259. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.76811>.
30. Stagg G.W., ElAbiad A.H. Computer Methods in Power System Analysis. McGraw-Hill, 1968. 438 p.
31. Reijer Idema, Domenico J. P. Lahaye. Computational Methods in Power System Analysis, 2014. 123 p. DOI: <https://doi.org/10.2991/978-94-6239-064-5>.
32. Mahmoud M.S., Hussain S.A., Abido M.A. Modeling and control of microgrid: An overview. *Journal of the Franklin Institute*. 2014. Vol. 351. Issue 5. Pp. 2822-2859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.01.016>.

MODELING AND ANALYSIS OF LONG-TERM 24-HOUR PROCESSES OF CHANGES IN ELECTRICAL ENERGY FLOWS IN THE MICROGRID OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, R.V. Belyanin², T.Yu. Antonets², Yu.V. Dadazhanov²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: podol@ied.org.ua.

² Yuzhcable works, PJSC,
Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine.

The paper considers the energy strategy for implementing reliable uninterrupted power supply of critically important technological equipment of an industrial enterprise of Ukraine in modern military conditions by creating its industrial microgrid and solving scientific and technical problems regarding the optimal use of its elements and reducing overall costs, which take into account the cost of electricity received from each source of the microgrid. To solve this problem, a computer modeling method was used. It is shown that for modeling long-term (24-hour) electromagnetic processes in a microgrid, it is advisable to use a generalized method for calculating complex currents, which is usually used to calculate sinusoidal current electrical circuits. However, in this task, it is also necessary to take into account that in a microgrid, not only the amplitudes of currents change slowly over time, but also their phases, so it is advisable to use the dynamic phasor method, according to which the calculation is performed simultaneously in the complex and time planes. To implement this method in the Matlab/Simulink package, it is necessary to develop appropriate system models for all power sources and time-varying loads. The paper presents the results of calculating long-term (over a day) active and reactive power flows in the microgrid of a typical industrial enterprise, which contains such power sources as a solar power plant and a cogeneration unit, which can operate both in parallel with the external power grid and without it. The daily costs of electricity obtained from each power source are determined. In order to identify ways to reduce the total cost of electricity, the paper considers various scenarios for connecting power sources and determines their impact on the total daily costs of the enterprise. References 32, figures 8, table 1.

Key words: industrial microgrid, critical electrical equipment, changes in active and reactive electrical power in the microgrid, method for calculating long-term electrical processes, computer analysis in the Matlab/Simulink package.

Надійшла 03.07. 2025
Прийнята 22.09.2025