

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247354

С.П. Денисюк, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

І.Ю. Бойко, ORCID 0000-0002-8044-137X

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ MICROGRID З ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ

Показано, що підвищення енергоефективності Microgrid з дизель-генераторами вимагає вирішення проблеми оптимізації режимів роботи Microgrid з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива дизель-генераторів. Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid в якості критерію, що має безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії, обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії в системі.

В статті визначено, що одним з важливих показників дизель-генераторних установок є їх економічність, яка визначається відношенням енергії, що виробляється, до витрати палива за годину роботи при номінальному навантаженні. Показано, що зниження витрати палива дозволяє підвищити ефективність роботи дизель-генераторних установок, а різні типи усталених та перехідних режимів роботи дизель-генераторів суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору технічної та фінансової ефективності.

Для підвищення техніко-економічних показників в Microgrid з дизель-генераторами в статті запропоновано використати електровартісну модель енергогенеруючої системи, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну генерованої потужності, так і динамічну зміну її вартості та вартості первинного палива. Дана модель дає можливість гнучкого нелінійного відстеження витрат палива, що з урахуванням вартості дизельного палива може слугувати у якості економічного критерія для визначення енергоефективності роботи генеруючої системи.

У статті наведено алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду, який дозволяє не тільки оцінити економічну та енергетичну ефективність Microgrid з дизель-генераторами, але й може бути застосований при модифікації Smart-лічильників, що дозволяє суттєво розширити їх функціональні можливості.

Ключові слова: *підвищення енергоефективності, фінансові та технічні показники, Microgrid, дизель-генератор, гібридна система електроживлення, динамічна електровартісна модель, Smart-лічильники.*

Вступ

Відповідно до положень «енергетичного переходу» останніми роками в Україні спостерігається підвищення кількості введених в експлуатацію об'єктів альтернативної енергетики, у першу чергу сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій. Так, у нашій державі у 2019 році виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальній структурі виробництва електричної енергії досягнув 3,6 % або 5,5 млрд. кВт·год. У 2020 році виробництво електроенергії на СЕС вже склало 6,8 млрд. кВт·год або ж 4,6 %, ВЕС – 3,3 млрд. кВт·год або ж 2,2 %. У 2020 році встановлена потужність генерації ВДЕ в Україні зросла в 1,4 раза, а виробництво – вдвічі, а частка ВЕС та СЕС у структурі виробництва електроенергії зросла вдвічі – із 3,3% до 6,8%. Найбільше зросла встановлена потужність СЕС, що обумовлює нагальну потребу в гнучких інструментах для їхнього балансування. У наступні три роки (2021–2023 рр.) тенденція до зростання зберігатиметься, хоча прогнозується, що темпи зростання будуть значно меншими (зниження темпів від 16% у 2022 році до 2,4 % у 2031 р.). Зокрема, обсяг відпуску у 2021 році очікується на рівні близько 13120 млн. кВт·год, що становитиме 9,5 % від сумарного відпуску

електричної енергії усіма об'єктами електроенергетики в ОЕС України.

На сьогодні балансування ВДЕ, переважно СЕС, у денні години НЕК «Укренерго» визначає як основну проблему інтеграції ВДЕ в енергосистему України [1]. Згідно «Звіту з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву», затвердженого постановою НКРЕКП № 605 від 13.03.2020 р., розвиток ВДЕ має бути узгоджений з можливостями забезпечення їх балансування [1]. Головні рекомендації цього Звіту полягають у подальшому розвитку атомної генерації, модернізації вугільних блоків ТЕС та обмеження виробництва електроенергії із ВДЕ. За висновками НЕК «Укренерго», саме через відсутність балансуєчих потужностей балансування ВДЕ наявними в енергосистемі потужностями є досить дорогим, неефективним та гальмує розвиток економіки України. Звіт визначає розвиток ВДЕ основною причиною подальшого зростання ціни електричної енергії на ринку.

За результатами багатьох наукових досліджень важливою проблемою забезпечення розвитку ВДЕ є оптимізація функціонування сучасних локальних систем енергозабезпечення, до складу яких входять ВДЕ, так і інші типи розосереджених джерел енергії (РДЕ), у першу чергу дизель-генератори (ДГ) [2, 3]. Такі системи під загальною назвою Microgrid отримали широке розповсюдження [3 – 5].

Актуальність оцінки технічних та вартісних показників роботи Microgrid з різними типами РДЕ зростає. Нагальною є проблема аналізу процесів підвищення енергоефективності в таких системах, які можемо розглядати як гібридні системи, робота системи з резервним джерелом у піковий період навантаження в усталених та перехідних режимах. При цьому зростає роль формування відповідних тарифних планів на генерацію електроенергії, зокрема, необхідно враховувати, що в короткотермінових (переривчастих) та постійних режимах роботи буде різна вартість генерації електроенергії ДГ.

Метою дослідження є оптимізація режимів роботи локальних системи енергозабезпечення (Microgrid), до складу якої входить ДГ з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива ДГ.

Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid необхідно обрати окремі критерії, що мають безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії. Для випадку системи із ДГ у якості такого критерію обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії.

1. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем Microgrid

Загальновідомо, що комбінація двох або більше різних типів джерел електроенергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з точки зору ціни, ефективності й надійності [2, 3, 5, 6]. Будь-яка комбінація технологій генерації енергії РДЕ, у тому числі ВДЕ, може утворювати гібридну енергетичну систему Microgrid. Наприклад, гібридна система може мати будь-яку комбінацію систем: вітроенергетичної, сонячної (на базі фотоелектричних панелей), мікрогідроелектростанцій, мікротурбін, дизель-генераторів, систем накопичення електроенергії, сховищ водню, виробленого, зокрема, на основі електролізу [2, 4, 6].

Виходи різних джерел генерації такої Microgrid повинні координуватися й узгоджено керуватися для одержання, наприклад, максимального обсягу генерованої електроенергії. Оскільки джерела РДЕ мають різні робочі характеристики, то важливо мати чітко визначену й стандартизовану структуру (процедуру) для їхнього з'єднання з метою створення гібридної Microgrid, де локальний кластер РДЕ, накопичувачів енергії й навантажень інтегруються разом і здатні автономно працювати [6]. Такі локальні системи енергозабезпечення також повинні мати можливість реалізації технології Plug & Play, відповідно до якої, пристрою (РДЕ, система зберігання енергії або кероване навантаження), можуть бути додані до існуючої системи Microgrid, не вимагаючи її реконфігурації при виконанні своєї визначеної функції. Можна виділити наступні особливості гібридних систем Microgrid, які роблять їх високоефективними і конкурентоспроможними [2, 5, 6]:

- гнучкість вибору палива, надійність, економічність, екологічність;
- можливість включення до їх складу високоефективного обладнання (паливних елементів, системи охолодження тощо);
- можливість одночасного забезпечення підвищення якості та доступності електроенергії, якості енергозабезпечення;
- можливість задіяти максимальну кількість ВДЕ з мінімальною вартістю генерації електроенергії при забезпеченні заданого графіка роботи споживачів;
- досягнення бажаних характеристик генерації та споживання електроенергії при найнижчій прийнятній вартості, що є ключовим елементом локальних систем енергозабезпечення, оптимізації їх функціонування на локальних ринках електроенергії.

Останнім часом все більш широке застосування знаходять комбіновані дизель-вітрові або дизель-фотоелектричні Microgrid, використання в яких ВДЕ дозволяє економити органічне паливо [5 – 8]. У таких гібридних системах в одній локальній мережі об'єднані дизель-генераторні установки (ДГУ), що працюють на органічному паливі, ВЕС та СЕС. Структурна схема типової гібридної Microgrid на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ наведено на рис. 1 [6 – 8].

У цій Microgrid використовується гібридний контролер, який підтримує баланс енергії під час зміна навантаження та визначає пріоритетність функціонування відповідних джерел енергії. Гібридний контролер забезпечує реалізацію наступних функцій:

- підключення живлення до споживача від джерела енергії, спроможного забезпечити вимоги навантаження;
- синхронізація сигналів напруги з різних джерел, наприклад, коли миттєва величина напруги від джерела фотовольтаїки відрізняється від величини напруги з іншого джерела, скажемо, біопалива, що викликає локальний потік циркулюючої потужності.

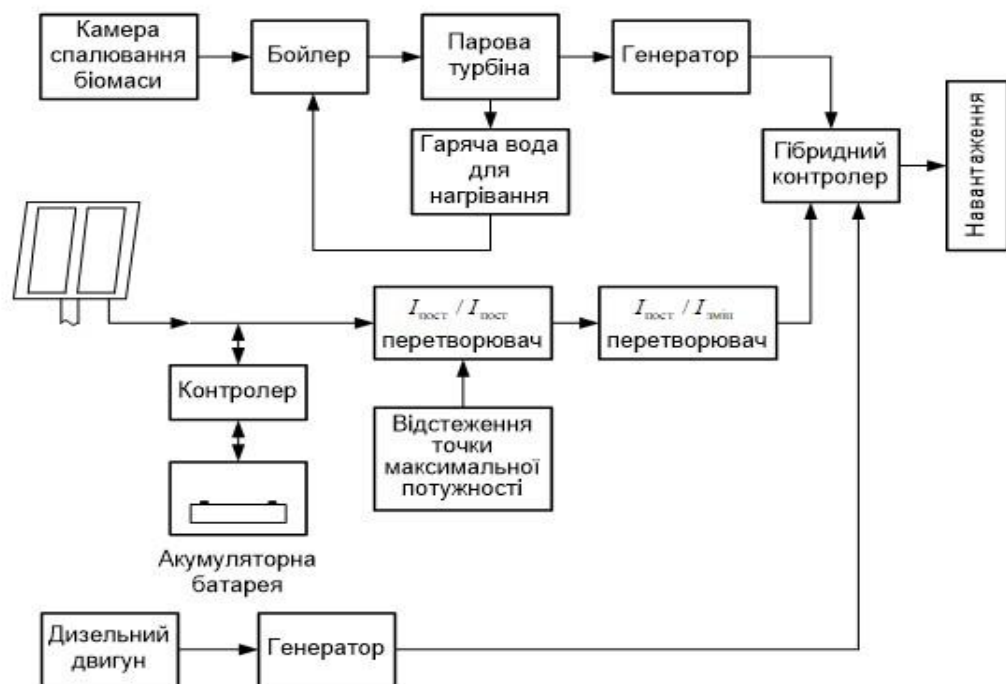


Рисунок 1 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ

Необхідність у паралельній роботі виникає з таких причин: потрібно забезпечити підвищену надійність живлення, забезпечити безперебійність живлення на період проведення технічного обслуговування основного джерела електроживлення, компенсувати зростання споживаної потужності підключеним навантаженням. Власне алгоритм паралельної роботи РЕ, зокрема ДГ, полягає в тому, що вони працюють з мережею на загальні шини навантаження. Для їх ефективної паралельної роботи потрібно забезпечити синхронізацію цих джерел. Також важливим аспектом роботи гібридної системи Microgrid є паралельна робота елементів та розподіл навантажень. Загальне навантаження, яке складається з активної та реактивної складових, має розподілятися системами керування пропорційно їхнім звичайним номінальним значенням без значного дисбалансу [2, 4, 6, 7].

Як вже зазначалося, до основних переваг ДЕУ можна віднести універсальність застосування, низьку вартість обладнання, швидку окупність, достатню надійність і довговічність. Дизельне паливо не характеризується летючістю, як пари бензину або газ, тому навіть його значний витік не створює небезпеки навколишньому середовищу [7 – 9]. В автономних системах енергозабезпечення, що працюють незалежно від мережі централізованого електропостачання, досить часто використовуються два і більше дизель-генератора. Крім підвищення надійності системи електропостачання, багатоагрегатного ДГУ дозволяє включати в роботу необхідну кількість ДГ відповідно до поточного графіком навантаження. Це дозволяє оптимізувати завантаження агрегатів і покращувати техніко-економічні характеристики ДГУ в цілому.

Оскільки режими роботи споживачів постійно змінюються, може виникнути ситуація, при якій ДГУ працює на межі або в межах обраної умови, при цьому ДГ будуть працювати в важких умовах пуск-зупинка, що скорочує термін їх служби і збільшує витрату палива. Знизити витрати палива, а також оптимізувати режими роботи ДГ є можливим, забезпечивши ДЕС блоком прогнозування навантаження і датчиком температури. У даному випадку мікроконтролер буде керувати процесом включення і виключення дизель-генераторів на підставі інформації, яка надходить від блоку прогнозування навантаження, температури навколишнього середовища, яку вимірює датчик температури.

Використовується інтегрального параметру, за яким можна керувати процесом пуску і зупинки ДГ на підставі залежності, дозволяє оптимізувати режими роботи системи. Оскільки температура повітря з плином часу змінюється плавно, з процесу роботи дизель-електростанції (ДЕС) виключаються режими, при яких відбуваються часті пуски і зупинки ДГ, і вони працюють в режимах, близьких до номінальних. Для визначення залежності, що зв'язує потужність навантаження конкретної ДЕС з температурою навколишнього середовища, використовуються добові відомості електричних навантажень ДЕС, річний графік середньоденний температури району, в якому розташована ДЕС, а також добові графіки навантажень в характерні сезони року. Це дозволяє отримати залежності температури навколишнього середовища, обсяги вироблення електричної енергії і потужності електричного навантаження ДЕС від днів року у вигляді лінійних трендів.

Наведені режими ДГ та ДЕС суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору як технічної, так і фінансової ефективності.

2. Особливості динамічного ціноутворення в Microgrid, формування електровартісної моделі

Ще у 1970-х роках з'явилися дослідження (Фред Кан) щодо застосування різної у часі цінової політики ціноутворення на регульовані послуги, зокрема й електроенергію [10]. Якщо фіксовані тарифи призводять до дорогого нарощування потужності, то на додаток до зменшення пікового попиту, динамічні ціни також надають кожному споживачеві можливість зменшити рахунки за електроенергію навіть на постійному рівні споживання, просто змінюючи алгоритм споживання, зміщуючи навантаження протягом дня. Динамічне ціноутворення (ціноутворення в режимі реального часу) – це тактика зміни ціни в часі [11]. США та Європа – два першопрохідці, які активно проводять дослідження у галузі динамічного ціноутворення, хоча існують відмінності у реалізації. Так, в США більше зосереджуються на дерегуляції, що забезпечує розвиток на ринковій основі, тоді як в Європі роблять більший акцент на встановленні Smart- лічильників для полегшення контролю споживання електроенергії. Динамічне ціноутворення на електроенергію може вплинути на зміну поведінки клієнтів споживання електроенергії [12]. Означена споживча поведінка, що змінює попит на електроенергію, як правило, відбувається одночасно, тим самим зміщуючи пікове навантаження на інший період часу, коли потреба в електроенергії зазвичай низька [13].

Ціноутворення в режимі реального часу – це структура тарифу на комунальні послуги, при якій заряд за 1 кВт·год змінюється щогодини залежно від виробничих витрат у реальному часі. Оскільки експлуатація пікових електростанцій дорожча, ніж установок базового навантаження, роздрібні тарифи на електроенергію вищі в пікові періоди, ніж у періоди, що не відповідають пікам. Схема ціноутворення в реальному часі (Real-Time Pricing, RTP) є ідеальним методом для регулювання балансу потужності між попитом та пропозицією в інтелектуальних електричних мережах Smart Grid, має істотний вплив на поведінку споживачів, роботу системи та загальне керування системою [14].

Загалом усі існуючі пристрої вимірювання сигналів в електроенергетиці традиційно виділяють технічний та економічний контур обліку. Економічний контур являє собою розрахунок вартості спожитої та згенерованої електроенергії. Розрахунок проводиться за двома контурами, які мають прив'язку до часових зон. Ці контури мають зв'язки в конкретні точки часу. Якщо інтервал, що розглядається зменшити, тобто зміни тарифу відбуваються на проміжку від 30 хв. до 15 хв. та 5 хв., то кількість таких зв'язків зростає і настає фактичне поєднання цих виділених контурів в один енергоекономічний контур.

Для аналізу особливостей формування електровартісної моделі Microgrid для розглянемо на прикладі системи з ДГ [15, 16].

Існуюча наразі система усталеної лінійної тарифікації не можуть враховувати нелінійності у середній витраті палива при виробництві потужності ДГ, яка має безпосередній економічний вплив на ефективність роботи будь-якої гібридної системи, яка має у складі такий ДГ. Для оптимізації роботи таких Microgrid необхідне створення гнучкої динамічної моделі тарифікації [15, 16]. Як наслідок, можемо говорити про створення динамічної електровартісної моделі ізольованої енергогенеруючої системи із ДГ. Систему «виробник – споживач електроенергії» схематично представимо як замкнену макроекономічну систему, де споживач отримує електроенергію потужністю P , а взаємн сплачує її вартість $C_p \cdot P$; C_p – ціна одиниці потужності. Система витрачає певну кількість отриманих коштів $C_B \cdot B$ на закупівлю пального B , де C_B – ціна одиниці пального, та на власні потреби [15, 16]. Економічну складову наведеної системи

доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівнянням Фішера [17, 18]:

$$M \cdot V = C \cdot Q, \quad (1)$$

де M – грошова маса, що робить один оберт за час T_v , [грн]; $V = T/T_v$ – кількість обертів грошової маси M за досліджуваний період часу T . Швидкість обороту залежить від обсягів економічної активності при заданій грошовій масі [17, 18]. Для розробки математичної моделі динамічної тарифікації доцільно розглядати інтервал часу в 1 с; C – ціна одиниці продукції, [грн./шт.]; Q – кількість виготовленої продукції [шт.] за час T . Приймаючи, що продукцією є електроенергія (кВт·сек), рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = C_B \cdot B + C_P \cdot P. \quad (2)$$

Оскільки споживач в залежності від потреб може нарощувати або зменшувати обсяг споживаної електроенергії, що характеризується рівнем потужності, то за деякий проміжок часу Δt відбувається зміна рівня виробленої потужності споживання навантаження, при цьому рівнянні балансу прийме вигляд:

$$M \cdot V = C_B \cdot B + (C_P + \Delta C_P) \cdot (P + \Delta P), \quad (3)$$

де $\Delta C_P = (M \cdot V - C_B \cdot B - C_P \cdot P - C_P \cdot \Delta P - \Delta C_P \cdot \Delta P) / P$ – відповідна зміна тарифної ціни при зміні рівня потужності. Значення $\Delta C_P \cdot \Delta P$ не враховується, як мала величина другого порядку.

Приймаючи зміну тарифної ціни як $\Delta C_P = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P} - C_P \cdot (1 + \frac{\Delta P}{P})$ та враховуючи, що $\Delta C_P = \frac{dC_P}{dt} \cdot \Delta t$, отримаємо рівняння:

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P \cdot \Delta t} - \frac{C_P \cdot (1 + \frac{\Delta P}{P})}{\Delta t}, \quad (4)$$

яке описує динамічну зміну C_P в залежності від потужності, що забезпечує посекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ сек [15, 16].

Рівняння приросту потужності для ДГ можна отримати аналогічним чином із виразу для перетворення енергії згораючого первинного палива у вироблену потужність за 1 с. Із виразу для ККД ДГ отримаємо:

$$\frac{P}{\tau} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot P_T,$$

де η_B – ККД генератора; τ – стала часу генератора; P_T – потужність згораючого первинного палива. Приймаючи приріст потужності за одну секунду як $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ та виразивши обсяг енергії згораючого палива за 1 с через величину B , отримаємо:

$$\frac{P}{\tau} + \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B,$$

де γ – коефіцієнт перетворення первинного палива у вироблену електричну потужність. Замінивши різницевий вираз на похідну отримаємо рівняння приросту потужності для ДГ:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \quad (5)$$

Рівняння (4) та (5) складають динамічну електровартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P} - C_P \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right), \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \end{cases} \quad (6)$$

де $C_B \cdot B = \beta \cdot C_P \cdot P$; $\frac{1}{\beta}$ – коефіцієнт прибутку системи.

Для відображення зміни вихідного рівня генерованої потужності у сформованій електровартісній моделі (6) використовується складова ΔB , при тому, що M та V є незмінними. Прийнемо, що $\frac{\Delta B}{P}$ – обсяги

пального ΔB_p необхідні для переходу ДГ на новий, заданий рівень потужності. Можемо записати систему, у якій $\Delta B_p \cdot C_B$ та $\frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – відповідні впливи, що задають величину динамічного приросту тарифної ціни та потужності генератора:

$$\begin{cases} \frac{dC_p}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_p \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta P}{P}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_B}{P}, \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_p \cdot P)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (7)$$

3. Алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T

Для побудови алгоритму оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T надалі введемо наступні визначення. Нехай активна потужність $P(t)$ змінюється у часі протягом певного технологічного періоду T_T , який може складати хвилини, години тощо. Фактично $P(t)$ являє собою графік електричного навантаження (ГЕН) Microgrid. Обсяги споживання енергії позначимо як $W(t)$. Витрати первинного палива $B(t)$ зазвичай мають нелінійний характер і можуть бути визначені експериментально або шляхом використання номінальних характеристик. Витрати первинного палива також залежать від рівня споживання активної потужності $W(P)$. Для визначення вартості первинного палива C_B за інтервал T_T , слід врахувати тариф c_B , який може змінюватися довільно у часі або навпаки мати сталий характер (тобто $c_B = \text{const}$).

Для реалізації динамічної тарифікації в Microgrid на практиці, а саме для фіксації зміни кількості отриманої енергії у динамічному режимі, наведемо узагальнений алгоритм роботи обчислювача обсягів витрат палива та споживання електроенергії, який складається з кроків:

1. Установка початкових еталонів.
2. Введення i -го режиму. Контроль значень W та B та приростів ΔW та ΔB .
3. Перехід на новий режим $i=i+1$.
4. Обчислення миттєвої вартості палива $B_i(P)$ та електроенергії $W_i(P)$.
5. Визначення приростів вартості палива $\Delta B_i(P)$ та електроенергії $\Delta W_i(P)$.
6. Перевірка умови: чи знаходиться вартість у i -й зоні сталості тарифу: $\Delta B_i(P) > \varepsilon_{B(P)}$ та електроенергії $\Delta W_i(P) > \varepsilon_{W(P)}$ ($\varepsilon_{B(P)} > 0$ та $\varepsilon_{W(P)} > 0$).
7. Перехід на установку нового тарифу на електроенергію $W_i(T)$.
8. Контроль рівнів генерації та споживання електроенергії в Microgrid за i -м тарифом.
9. Формування поточного звіту електронних таблиць та графіків щодо миттєвих та інтегральних значень тарифів, генерації та споживання електроенергії в Microgrid.
10. Перехід при необхідності на 2 етап; у протилежному випадку перехід на етап 11.
11. Знімання інформації про миттєві та інтегральні характеристики в конкретні моменти часу.
12. Завершення роботи алгоритму.

В основу наведеного алгоритму покладено методологію динамічної тарифікації для системи Microgrid, що працює в ізолюваному режимі, зокрема, вирішення задачі розрахунку нової вартості базової частини енергії, при відхиленні обсягів генерованої енергії від деякого еталонного рівня, встановленого для даного інтервалу часу роботи локальної системи Microgrid.

Наведені динамічна електровартісна модель та узагальнений алгоритм роботи обчислювача можуть бути покладені в основу роботи Smart-лічильника з метою вирішення наступних задач:

1. Забезпечувати відображення миттєвих (миттєві потужності та миттєвий (усереднений за інтервал) тариф) та інтегральних (обсяги споживання електроенергії за зонами доби, за добу, тиждень тощо) характеристик.
2. Забезпечувати відображення графіка (функції) зміни тарифів, співставивши їх за величиною зміни генерації та споживання електроенергії (величиною небалансу), а також відображення величини проплачених / отриманих коштів на виділеному контрольованому інтервалі часу роботи Microgrid.
3. Здійснювати «зонування», тобто виділення мінімальних значень інтервалів часу, перебування в яких здійснюється зміна тарифів. Це також передбачає контроль за часом зміни потужності споживання та витрат палива в Microgrid, коли тарифи мають бути постійними.
4. Забезпечувати гнучкість роботи Smart Grid, до складу якої входить кілька Microgrid, для фіксованої точності вимірювання.
5. Визначення реального балансу витрат первинного палива та споживання електроенергії в Microgrid.
6. Уточнення дольової участі (технічної та економічної) об'єктів щодо обсягів генерації та споживання електроенергії, рівнів витрат електроенергії в системах передачі та розподілу.

7. Визначення дольової участі (технічної та економічної) елементів Microgrid у спотворення якості електроенергії (енергопостачання).

8. Оцінка реальних об'єктивних тарифів на електроенергію (таких, що змінюються в залежності від наявних (існуючих) режимів генерації електроенергії (ДГ, СЕС, ВЕС) та споживання).

9. Балансування рівнів генерації та споживання електроенергії в Microgrid, можливість оцінки рівнів неоптимальності.

10. Оцінка ролі системи накопичення (акумулявання).

11. Уточнення фінансових розрахунків (грошових потоків) між елементами Microgrid, як по горизонтальному, так і вертикальному рівням; зокрема, здійснення «квазіфінансових» розрахунків між елементами віртуальних електростанцій та елементами активних споживачів (з врахуванням механізмів керування попитом).

12. Планування закупівель обсягів первинного палива та можливих обсягів споживання електроенергії.

13. Формування сигналів для керування генерацією (ВДЕ) та електроспоживанням, у тому числі із залученням механізмів керування попитом.

14. Створення еталону ідеального тарифу для формування квазіоптимального тарифного плану, оцінки неоптимальності та прогнозування в залежності від інтервалу часу; можливість поєднання неоптимальності фінансової з неоптимальністю енергопроцесів за реактивною потужністю Фризе Q_{ϕ} .

4. Особливості функціонування ДГ; оцінка технічної і економічної (фінансової) ефективності його роботи

Для аналізу особливостей роботи ДГ в Microgrid спочатку коротко наведемо тенденції розвитку світового та українського ринків ДГУ [19].

Згідно зі звітом компанії Grand View Research, який був опублікований у 2018 році, світовий ринок ДГУ буде зростати зі швидкістю 6,8% на рік і до 2022 р. сягне 21,37 млрд. дол. [19]. У 2014 році найбільшим був сегмент малопотужних ДГУ (за класифікацією компанії, це пристрої до 350 кВА), який займав 49% ринку, однак з 2021 р. його частка може істотно скоротитися, оскільки відбулося динамічне зростання продажі високопродуктивних електростанцій. Малопотужні ДГУ стикаються зі зростаючою конкуренцією з боку установок на природному газі, хоча у високопродуктивному сегменті дизельні станції за вартістю експлуатації обходяться дешевше, ніж газові. Market Research Future (MRFR) прогнозує, що до 2023 року світовий ринок ДГУ буде рости щорічно зі швидкістю 6,5%. Ця компанія вважає, що домінуючим і найбільш швидкозростаючим залишатиметься найнижчий сегмент (в даному дослідженні до 500 кВт), що пов'язано з попитом на портативні та малопотужні генератори серед приватних осіб і малого бізнесу. Стаціонарні електростанції переважають над портативними в силу своєї поширеності в промисловому секторі та серед комерційних підприємств, а також завдяки широкому діапазону їх потужності (від 3 кВт до декількох МВт). У географічному розрізі основні продажі припадають на Азійсько-Тихоокеанський регіон, де знаходяться одні з найбільших економік світу – Японія, Китай і Індія.

Щодо продажів в Україні ДГУ різних торгових марок [19]. Перші позиції в грошовому обчисленні займають Aksa і Dalgakiran (по 8%), за ними розташовуються Fogo, Cummins і FG Wilson (по 6%). Сегмент 32–250 кВА учасники ринку оцінюють в 600–1000 одиниць. Тут перші місця займають торгові марки Dargex Energy, Dalgakiran, Fogo і Green Power. До числа «інших» входять також Aksa і JCB, але їх частки оцінити не вдалося. Обсяг сегмента 250–550 кВА оцінюється в 125–350 ДГУ, обсяги продажів зростання приблизно на 10%. На лідируючу позицію вийшла марка Fogo, за нею – Green Power, Dalgakiran і FG Wilson. Результати в сегменті понад 550 кВА – близько сотні ДГУ. Продажі тут у порівнянні з 2018 роком зросли приблизно на чверть. Звичайно, в цьому сегменті один великий проєкт може змінити всю картину; зокрема, таке впровадження завершила у 2017 році «Далгакіран Компресорс Інтернешнл», яка постачала електростанції Cummins для НАЕК «Енергоатому».

Важливою вимогою, що пред'являються до всіх типів ДГУ в складі Microgrid є економічність [20, 21]. Рівень економічності оцінюють виходячи з обсягу пального, необхідного для генерації одного кіловата електроенергії протягом години. Таку систему оцінки використовують в країнах Європи та більшості країн Азії. Режими роботи ДГУ щодо рівнів генерованої потужності відповідно до стандарту ISO 8528 розділяються наступним чином:

- *COP (Continuous power)* – необмежений час експлуатації при постійному навантаженні. Можливість роботи на 100% заявленої в цьому рейтингу потужності (приклад: безперервне джерело живлення паралельно з мережею);

- *PRP (Prime power)* – необмежений час експлуатації при змінному навантаженні, що не перевищує в середньому 70% заявленої потужності (приклад: основне джерело електроживлення при відсутності живлення мережі);

- *LTP (Limited time running power)* – обмежений час експлуатації (не більше 500 год. / рік на рік) при

постійному навантаженні (приклад: базове джерело для зняття піків в паралельну роботу);

- *ESP (Emergency standby power)* – обмежений час експлуатації (не більше 200 год. / рік на рік) при змінному навантаженні (приклад: резервне джерело живлення).

Номинальна потужність генератора розраховується для задоволення максимальної потреби в електричних навантаженнях, які вимагають, зокрема, резервного живлення. Існує чотири класи регулювання, які визначають якість електроенергії ДГ з точки зору стабільності, напруги і безперебійності. Чим вище клас, тим жорсткіші вимоги:

- *Клас G1* – електрогенератори для навантажень загального призначення (системи загального застосування – освітлення та інші прості традиційні електричні навантаження).

- *Клас G2* – електрогенератори для систем, де нормативи не є критичними і допускаються тимчасові відхилення (системи освітлення; насоси, вентилятори і підйомники);

- *Клас G3* – електрогенератори для систем, де вимоги до характеристик енергопостачання помірно жорсткі (телекомунікаційна апаратура та напівпровідникові системи керування, пристрої силової електроніки не повинні спотворювати синусоїдальність кривої напруги).

- *Клас G4* – електрогенератори для систем, де вимоги до характеристик енергопостачання жорсткі (системи обробки даних або обчислювальні системи).

Підвищення енергетичної ефективності ДГ є однією з найбільш актуальних завдань побудови Microgrid [22]. Одним з перспективних шляхів вирішення даного питання є розробка «інверторних» дизельних установок, які передбачають переведення дизельного двигуна на змінну частоту обертання, відповідно до його поточного завантаження. Вихідна напруга такої установки приводиться до стандартних параметрів за допомогою перетворювача частоти. Умови роботи ДГ в складі такого енергетичного комплексу характеризуються можливістю зниження частоти обертання до 40% відносно номінальної залежно від ступеня завантаження станції.

Залежно завантаження магнітоелектричного генератора від частоти обертання приводного дизельного двигуна дозволили встановити зв'язок між вхідним струмом напівпровідникового перетворювача і частотою за умови мінімальної питомої витрати палива дизельного двигуна (рис. 2). Дані залежності можуть бути корисні при формуванні алгоритму керування перетворювачем.

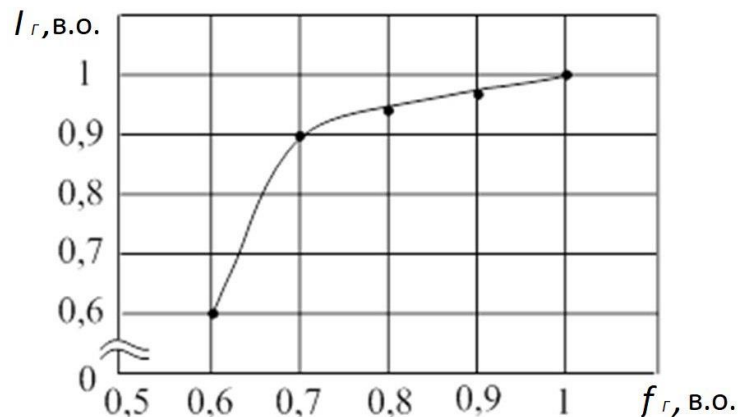


Рисунок 2 – Залежності струму навантаження I_g від частоти f_g синхронного генератора

Отже, взаємопов'язані зміни генерованої потужності та частоти обертання синхронного генератора, що працює в складі інверторної ДЕС, за критерієм мінімальної витрати палива, скорочує діапазон зміни вихідного напруги генератора і змінює його коефіцієнт завантаження, що трохи полегшує умови роботи магнітоелектричного генератора і вентиляного перетворювача.

Для наближеного розрахунку питомої ефективної витрати палива ДГУ використовують формулу множення потужності на коефіцієнт 0,184–0,220 кг / кВт·год. Формула виведена практичним шляхом – встановлено, що на виробництво 1 кВт·год витрачається приблизно 184 – 200 г дизпалива.

Витрата дизельного палива – важливий параметр при виборі ДГУ [23 – 26]. У порівнянні з бензиновими аналогами ДГУ вдвічі економніше. Єдиної норми по витраті пального для ДЕС не існує. На рівень споживання впливає низка факторів: від розмірів і ваги пристрою до умов навколишнього середовища. Наведемо фактори, які впливають на витрату палива ДГ [24]: існує залежність витрати палива від навантаження на генератора; погода; якість палива (від якості палива залежить не тільки витрата, але й термін служби двигуна); кількість відпрацьованих мотогодин і періодичність техобслуговування дизельного генератора; обсяг паливного бака; потужність; марка двигуна. Споживання ДГ також залежить

не тільки від моделі, але й від дотримання низки інших умов: відповідності номінальної потужності і навантаження; стани повітряних, масляних і паливних фільтрів, поршнів, ступеня зносу двигуна; справність електронної системи керування; використання сезонних видів палива, що відповідають ДСТУ [25, 26]. Так, занадто низька температура, яка призводить до загустіння палива, через що істотно знижується ефективність роботи дизельної установки. При неправильній подачі повітряно-паливного складу в агрегат споживання палива зростає приблизно на 25%. Пристрій розміщено в погано вентильованому приміщенні, що збільшує споживання палива. При використанні неякісного палива з домішками і сторонніми об'єктами витрата пального може значно збільшуватися.

У табл. 1 наведено приклад витрати палива для дизельного генератора потужністю 10 – 100 кВт [26].

Коротко наведемо аналітичні залежності витрат палива в ДГ, які доцільно застосовувати при уточненні запропонованих динамічної електровартісної моделі та узагальненого алгоритму роботи обчислювача, відповідної модифікації Smart-лічильника.

Таблиця 1 – Витрати палива для дизельного генератора потужністю 10 – 100 кВт

Тип двигуна	Mitsubishi	Perkins	Iveco	Iveco
Потужність ДГУ, кВт	10	30	50	100
Навантаження, %	75	75	75	75
Витрати, л/год.	2,5	6,1	10,3	20,2

Як вже зазначалося, на 1 кВт·год. електроенергії дизель генератора потрібно в середньому 200 г пального [27]. Його питома витрата можна обчислити за формулою: $Q = q \cdot N$, де q – маса споживаного палива; N – значення номінальної потужності пристрою. Наприклад, генератору потужністю 100 кВт на годину безперервної роботи буде потрібно близько 20 л пального, агрегату 15 кВт буде досить 3 – 4 л. Ці обчислення є приблизними. Наприклад, витрата дизельного генератора YEG230DTLS-5R номінальною потужністю 13,6 кВт при 70% навантаженні становить 2,94 л/год., а моделі YH550DTLS-5R на 33 кВт – 7,58 л/год. Для нормальної роботи електростанції рекомендується, щоб її номінальна потужність на 25% перевищувала потужність обладнання навантаження, тобто при номінальній потужності обладнання в 24 кВт рекомендована межа повинен становити 30 кВт.

Наведемо особливості методики розрахунку витрати палива в ДГ [28]. Зазвичай в документах на ДГ вказується витрата при 75% навантаженні на агрегат, який не відображає реальну картину при роботі в інших режимах. Середньорічний питомий розрахунок витрати палива для ДГУ з визначенням потужності дизельної установки обчислюється за формулою:

$$b = (g_e \cdot H \cdot C \cdot 1,36) / \eta_{\Gamma} + B_x / E, \quad (8)$$

де g_e – питома витрата палива при номінальній потужності в 75%, (береться за паспортом); H – коефіцієнт, що враховує навантаження; C – коефіцієнт зношеності двигуна; η_{Γ} – ККД дизель-генератора в залежності від режиму роботи; E – заплановане виробництво електроенергії в кВт·год; B_x – витрата палива установки на холостому ходу, що розраховується за формулою:

$$B_x = 0,15 \cdot N_e \cdot g_e \cdot K_x \cdot C \cdot n, \quad (9)$$

де K_x – коефіцієнт витрати на холостому ходу, що дорівнює 0,21 для установок потужністю менше 1000 к.с. та 0,17 для більш потужних генераторів; N_e – номінальна потужність генератора в к.с.; n – плановане число запусків двигуна. Параметр B_x / E зазвичай занадто малий, і його можна не враховувати в розрахунках. Величину ККД при зміні навантаження рекомендується обчислювати пропорційно, від номінального значення.

Майже аналогічна співвідношенням (8) та (9) інша методика розрахунку пропонує формулу:

$$b = (1,05 \cdot g_e \cdot K) / \eta_{\Gamma} + (1,05 \cdot K_x \cdot g_e \cdot N_e \cdot 0,15) / E, \quad (10)$$

Використовуються ті ж показники, тільки з різницею у застосуванні коефіцієнтів. Якщо в першому

варіанті для врахування зміни навантаження і зносу генератора використовується величина $H \cdot C / \eta_{\Gamma}$, то в другому варіанті цей показник дорівнює $1,05 \cdot K$. Він характеризує зростання витрат через коливання навантаження та розраховується за формулою:

$$K = 0,87 + 0,13 \cdot (N_e / N_{cp}). \quad (11)$$

Окремі значення коефіцієнтів, що враховують навантаження на ДГ і ступінь його зносу (співвідношення (10) та (11)), представлені в табл. 2.

Методика розрахунку нормативів питомих витрат палива по дизельним електростанціям [29]. Розрахунки норм питомих витрат (НПВ) по ДЕС виконуються на основі паспортних даних дизель-генераторів, навантажувальних характеристик дизелів, регульовальних характеристик ДГ, прийнятих за довідковою літературою або за даними заводів-виробників обладнання.

У паспортних та довідкових даних вказуються технічні параметри, відповідні режиму номінальної потужності ДГ: питома витрати палива, ККД генератора, потужності дизеля і дизель-генератора тощо. НПВ визначаються шляхом введення коригувальних коефіцієнтів до паспортних питомих витратами палива на прогнозовану навантаження, знос двигуна, пуски і зупинки, відпуску тепла від утилізаційних газо-водогрійних котлів, споживання електроенергії на власні потреби, теплотворну здатність палива. Розрахунки НПВ виконуються по кожному ДГ, встановленому на електростанції, і в цілому по ДЕС. При цьому, витрати електроенергії на власні потреби ДЕС, за винятком циркуляційних насосів системи тепlopостачання, відносяться на електроенергію, витрати тепла на власні потреби ДЕС відносяться до виробничих потреб.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів H та C в залежності від навантаження ДГ відносно номінальної потужності

Навантаження відносно номінальної потужності, %	Коеф. H	Коеф. C
100	1,00	1,015 – 1,020
95	1,025 – 1,035	1,020 – 1,030
90	1,030 – 1,040	1,030 – 1,035
85	1,040 – 1,055	1,030 – 1,040
80	1,050 – 1,055	1,035 – 1,045
75	1,050 – 1,065	1,035 – 1,050
70	1,055 – 1,060	1,040 – 1,050
65	1,060 – 1,075	1,040 – 1,050
60	1,070 – 1,080	1,050 – 1,060
50	1,085 – 1,090	1,050 – 1,070
40	1,115 – 1,125	1,060 – 1,080

5. Витрата палива ДГ в системі

На основі даних, наданих додатком «Калькулятор витрати палива дизельного генератора» ресурсу [30], була виконана побудова залежності середньої витрати палива \bar{V} (л/год.) від потужності ДГ P (кВт) для трьох значень середнього навантаження на генератор у відсотках. Було розглянуто наступні значення середнього навантаження на генератор – 50%, 75%, 100%. При цьому враховується, що час роботи генератора становить 1 год.

Графіки на рис. 3 відображають пряму залежність $\bar{V} = f(P)$, а графіки на рис. 4 – зворотну залежність $P = f(\bar{V})$. Діапазони зміни потужності ДГ обрані наступними: 200 – 300 кВт, 500 – 600 кВт, 700 – 800 кВт, 900 – 1000 кВт з кроком 20 кВт.

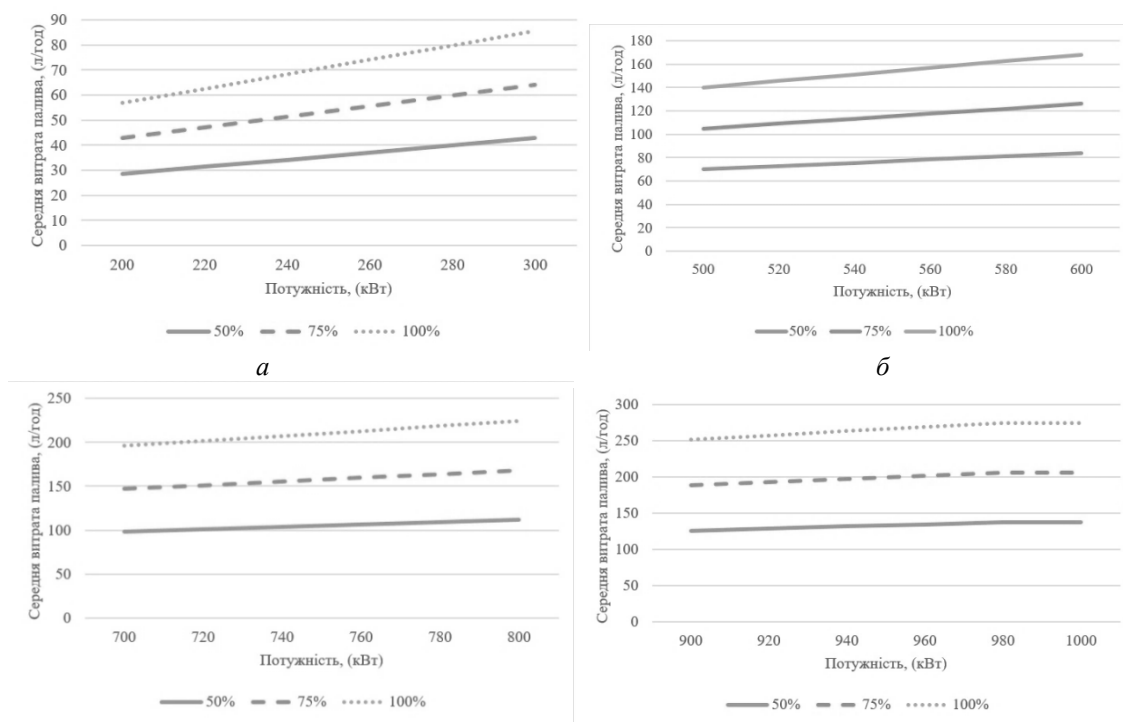


Рисунок 3 – Розрахунок прямої залежності $\bar{V} = f(P)$

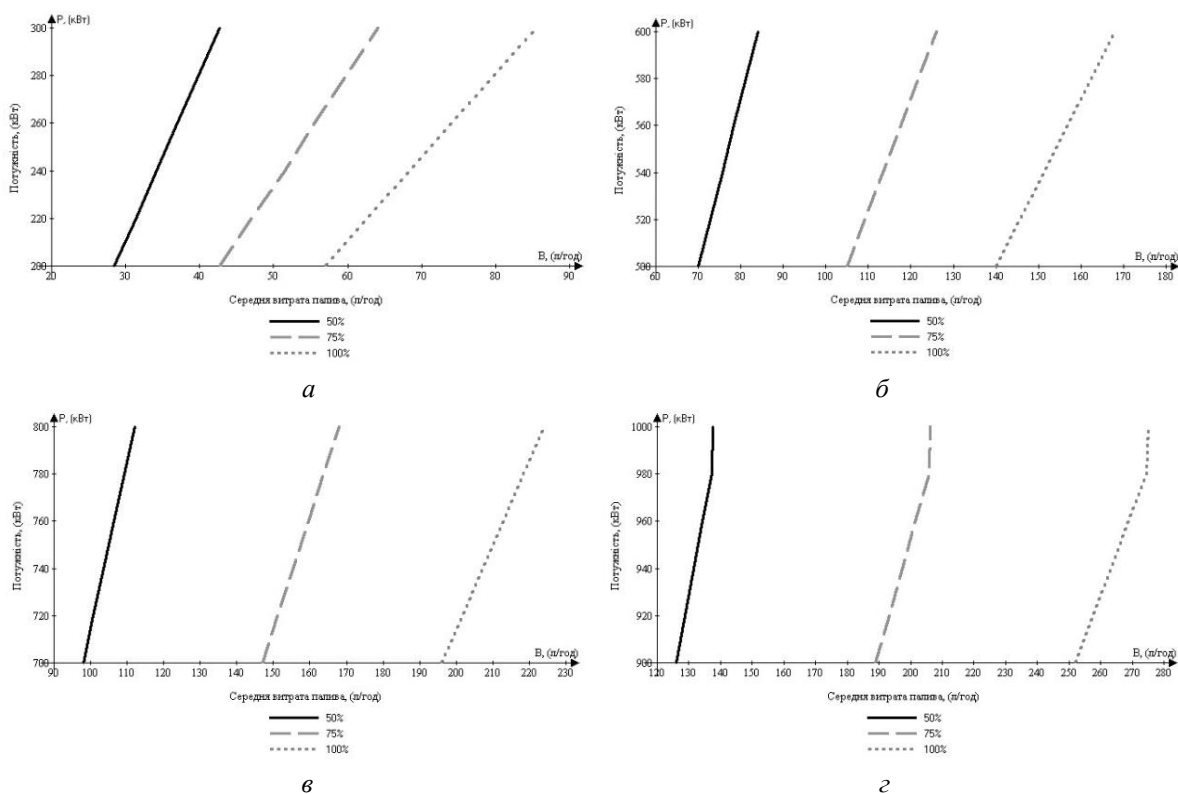


Рисунок 4 – Розрахунок зворотної залежності $\bar{V} = f(P)$

Необхідно зазначити, що при розрахунку наведених на рис. 3 та 4 залежностей зменшення кроку приросту потужності при побудові наведених функціональних залежностей стає помітною нелінійністю функціональних залежностей як функція від витрати палива.

Звичайно, фактичні результати будуть відрізнятися від наведених вище, оскільки вони, як вже зазначалося, залежать від ККД і технічного стану ДГ, температури палива і навколишнього середовища.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що підвищення енергоефективності Microgrid з ДГ вимагає вирішення проблеми оптимізації режимів роботи локальних системи енергозабезпечення (Microgrid) з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива ДГ. Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid в якості критерію, що має безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії, обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії в системі.

2. Визначено, що одним з важливих показників ДГУ є її економічність, яка визначається відношенням енергії, що виробляється, до витрати палива за годину роботи при номінальному навантаженні. Зниження витрати палива дозволяє підвищити ефективність роботи ДЕС. Різні типи усталених та перехідних режимів роботи ДГУ суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору як технічної, так і фінансової ефективності.

3. Для підвищення техніко-економічних показників в Microgrid з ДГ було запропоновано використати електроваріаційну модель енергогенеруючої системи, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну генерованої потужності, так і динамічну зміну її вартості та вартості первинного палива. Дана модель дає можливість гнучкого нелінійного відстеження витрат палива, що з урахуванням вартості дизельного палива може слугувати у якості економічного критерія для визначення енергоефективності роботи генеруючої системи.

4. Запропонований алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T дозволяє не тільки оцінити економічну та енергетичну ефективність Microgrid з ДГ, але й може бути застосований при модифікації Smart-лічильників, що дозволяє суттєво розширити їх функціональні можливості.

Список використаної літератури

1. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву, затверджений постановою НКРЕКП № 605 від 13.03.2020 р.

2. Интеллектуальные электрические сети: элементы та режимы: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.

3. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Анализ режимов загрузки магнитоэлектрического генератора инверторной дизельной электростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.

4. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories. Март 2016

5. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li. – Вересень 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>

6. Синеглазов В.М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analytyka/>.

7. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8615>.

8. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 53–56.

9. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 237–238.

10. Joskow Paul L., Wolfram Catherine D. Dynamic Pricing of Electricity // American Economic Review. – 2012. – 102 (3). – P. 381–85.

11. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management, Third. – New Jersey: Prentice Hall, 2007.

12. Yalcintas M., Hagen W.T., Kaya A. An analysis of load reduction and load shifting techniques in commercial and industrial buildings under dynamic electricity pricing schedules // Energy Build. – 2015. – Vol. 88. – P. 15–24.

13. Shirazi E., S. Jadid S. Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via NEMDAS // Energy Build. – 2015. – Vol. 93. – P. 40–49.

14. Hongbo Zhu, Yan Gao, Yong Hou. Real-Time Pricing for Demand Response in Smart Grid Based on Alternating Direction Method of Multipliers // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – 10 p.

15. Boiko I. Relevance of Dynamic Tariffication Application for Microgrid Generation Systems // Energy: Economics, Technology, Ecology // 2019. – № 3 (57). – P. 23–29.
16. Zhuikov V.I., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX (31), Issue: 250, 2021 Feb. – P. 50–53.
17. Bordo Michael D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987 – V. 2. – P. 175–177.
18. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987. – V. 4. – P. 601–602.
19. Український ринок дизель-генераторів в 2018 році. Травень 21, 2019 «Мережа і бізнес»; В. Ткаченко; Дослідження ринку ДГУ «Мережа і бізнес». <https://generator.ua/masters>
20. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
21. Дизельні електростанції – основні характеристики. URL: <https://pogliad.ua/news/com-news/profesiyniy-krugozir/dizelni-elektrostanciyi---osnovni-harakteristiki-374868>.
22. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Анализ режимов загрузки магнитоэлектрического генератора инверторной дизельной электростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
23. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
24. <https://fogo.ua/ru/stati/7-faktorov-vlijajushhih-na-rashod-topliva-dizel-generatora/>
25. <https://1kwt.com/dizelnaja-elektrostantsija-na-100-kvt-rashod-topliva>
26. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
27. <https://www.yanmarrus.ru/about/statyi-i-obzory/raskhod-topliva-dizelnogo-generatora/>
28. <https://www.jcbgenerators.ru/tehnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html>
29. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_56377/ab28c1730667f75a2c4c3be8b4f92ea3e11573d2/
30. Калькулятор расхода топлива дизельного генератора. [Електронний ресурс] // URL: <https://mechatronics.by/service/utilities/diesel-genset-fuel-consumption/>

S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences, Prof., **ORCID 0000-0002-6299-3680**

I. Boiko, **ORCID 0000-0002-8044-137X**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

INCREASING MICROGRID ENERGY EFFICIENCY WITH DIESEL GENERATORS

It is shown that increasing the energy efficiency of Microgrid with diesel generators requires solving the problem of optimizing the modes of operation of Microgrid using as an optimization criterion for reducing the consumption of primary fuel diesel generators. To study the energy efficiency of such types of Microgrid as a criterion that has a direct impact on the amount of electricity generated, selected adequate accounting of primary fuel consumption when generating a given amount of electricity in the system.

The article determines that one of the important indicators of diesel generator sets is their efficiency, which is determined by the ratio of energy produced to fuel consumption per hour of operation at rated load. It is shown that the reduction of fuel consumption allows to increase the efficiency of diesel generators, and different types of steady and transient modes of diesel generators significantly affect the efficiency of Microgrid in terms of technical and financial efficiency.

To improve the technical and economic indicators in Microgrid with diesel generators, the article proposes to use the electric cost model of the power generation system, which allows to calculate both the dynamic change of generated power and the dynamic change of its cost and the cost of primary fuel. This model allows flexible nonlinear tracking of fuel consumption, which, taking into account the cost of diesel fuel, can serve as an economic criterion for determining the energy efficiency of the generating system.

The article presents an algorithm for evaluating the financial and technical performance of Microgrid in dynamic modes over a period of technology, which not only evaluates the economic and energy efficiency of Microgrid with diesel generators, but can also be used to modify Smart meters, which can significantly expand their functionality.

Keywords: *energy efficiency improvement, financial and technical indicators, Microgrid, diesel generator, hybrid power supply system, dynamic electric cost model, Smart meters.*

References

1. Report on the assessment of compliance (sufficiency) of generating capacity to cover the projected demand for electricity and provide the necessary reserve, approved by the resolution of the NKREKP № 605 from 13.03.2020

2. Intelligent electrical networks: elements and modes: According to the general. ed. acad. NAS of Ukraine O.V. Kyrylenko / Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. – 400 p.
3. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Analysis of loading modes of a magnetoelectric generator of an inverter diesel power plant // Modern problems of science and education. – 2014. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
4. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories. Mapr 2016
5. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li. – September 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>
6. Sineglazov V.M. Prospects for the development of hybrid energy systems. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/>.
7. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Ways to reduce fuel consumption of diesel power plants // Modern problems of science and education. – 2013. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8615>.
8. Khvatov O.S., Darienkov A.B., Tarasov I.M. Diesel-generator power plant with variable shaft rotation frequency // Bulletin of ISEU. – 2010. – Issue. 2. – P. 53–56.
9. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Ways to reduce fuel consumption of diesel power plants // Scientific Review. Technical sciences. – 2014. – № 1. – P. 237–238.
10. Joskow Paul L., Wolfram Catherine D. Dynamic Pricing of Electricity // American Economic Review. – 2012. – 102 (3). – P. 381–85.
11. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management, Third. – New Jersey: Prentice Hall, 2007.
12. Yalcintas M., Hagen W.T., Kaya A. An analysis of load reduction and load shifting techniques in commercial and industrial buildings under dynamic electricity pricing schedules // Energy Build. – 2015. – Vol. 88. – P. 15–24.
13. Shirazi E., Jadid S. Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via HEMDAS // Energy Build. – 2015. – Vol. 93. – P. 40–49.
14. Hongbo Zhu, Yan Gao, Yong Hou. Real-Time Pricing for Demand Response in Smart Grid Based on Alternating Direction Method of Multipliers // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – 10 p.
15. Boiko I. Relevance of Dynamic Tariffication Application for Microgrid Generation Systems // Energy: Economics, Technology, Ecology // 2019. – № 3 (57). – P. 23–29.
16. Zhuikov V.I., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX (31), Issue: 250, 2021 Feb. – P. 50–53.
17. Bordo Michael D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987 – V. 2. – P. 175–177.
18. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987. – V. 4. – P. 601–602.
19. Ukrainian market of diesel generators in 2018. May 21, 2019 "Network and Business"; V. Tkachenko; Market research of DGU "Network and Business". <https://generator.ua/masters>
20. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
21. Diesel power plants – the main characteristics. URL: <https://pogliad.ua/news/com-news/profesiyniy-krugozir/dizelni-elektrostanciyi---osnovni-harakteristiki-374868>.
22. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Analysis of loading modes of the magnetoelectric generator of the inverter diesel power plant // Modern problems of science and education. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
23. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
24. <https://fogo.ua/ru/stati/7-faktorov-vlijajushhih-na-rashod-topliva-dizel-generatora/>
25. <https://1kwt.com/dizelnaja-elektrostantsija-na-100-kvt-rashod-topliva>
26. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
27. <https://www.yanmarrus.ru/about/statyi-i-obzory/raskhod-topliva-dizelnogo-generatora/>
28. <https://www.jcbgenerators.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html>
29. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_56377/ab28c1730667f75a2c4c3be8b4f92ea3e11573d2/
30. Diesel generator fuel consumption calculator. [Electronic resource] // URL: <https://mechatronics.by/service/utilities/diesel-genset-fuel-consumption/>

Надійшла 15.07.2021
Received 15.07.2021