

УДК 621.311.001

КАПЛУН В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

**УМОВНИЙ ДИНАМІЧНИЙ ТАРИФ ЯК КРИТЕРІЙ
ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
МІКРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНИХ
ОБ'ЄКТІВ**

Мета. Обґрунтування критерію ефективності функціонування мікроенергетичних систем локальних об'єктів.

Методика. Мікроенергетична система розглядається як єдиний контрольований блок керованої системи електроспоживання з інтелектуальними джерелами, який може бути інтегрований у централізовану енергосистему. Аналіз підходів оцінювання ефективності локальної „розумної” мікроенергосистеми здійснюється з урахуванням дискретного і комбінаторного характеру математичних моделей систем такого роду, застосовані принципи структурування, декомпозиції і конвеєризації, теорії мережевих графів.

Результати. В роботі обґрунтовано поняття та принципи формування умовного динамічного тарифу як інтегрального показника поточної вартості електроенергії мікроенергетичної системи з декількома джерелами перед її розподілом між споживачами локального об'єкта, який формується на основі реальної собівартості електроенергії у обраному часовому інтервалі з урахуванням графіка навантаження у реальному часі.

Наукова новизна. Вперше для оцінювання ефективності мікроенергетичних систем локальних об'єктів з традиційними і поновлюваними джерелами запропоновано використання умовного динамічного тарифу як інтегрального показника поточної вартості електроенергії енергетичного модуля мікроенергосистеми з урахуванням графіка навантаження у реальному часі.

Практична значимість. У роботі запропоновано метод формування алгоритмів управління енергобалансом мікро-сітки з використанням інтелектуальної системи керування на основі добового прогнозування рівнів генерації автономних джерел, використання ємності накопичувача для забезпечення оптимальних витрат на електроспоживання об'єкта.

Ключові слова: мікроенергетична система, мікро-сітка, умовний динамічний тариф, традиційні та поновлювані джерела електроенергії, оптимальне електроспоживання.

Вступ. Багато подій протягом останнього десятиліття підняли інтерес до вивчення еволюції конкурентних систем енергозабезпечення з узгодженням попиту та пропозицій на енергетичних ринках для оптимізації тарифів. В основу формування тарифів при енергозабезпеченні від централізованої енергосистеми (ЦЕС) покладені граничні витрати на технологічний цикл генерації, транспорту та розподілу електроенергії. Найбільшу проблему централізованої енергосистеми – вирівнювання графіку генерації шляхом управління електроспоживання у пікові періоди, можна розв'язати шляхом створення мотиваційного середовища у великої кількості споживачів, запровадивши динамічне ціноутворення на ринку електроенергії [1-3].

Сьогоднішній рівень технічного забезпечення інтелектуального моніторингу, обліку та управління технологічними процесами у електричних мережах є достатнім для впровадження ринкових механізмів ціноутворення у енергетичній сфері. З одного боку, це дасть можливість оптимізувати роботу енергосистеми, знизивши пікові навантаження, а з

іншого – залучити споживачів до формування принципів управління енергосистемою шляхом впровадження динамічного ціноутворення на електроенергію у режимі реального часу.

Споживачі набувають досвіду динамічного ціноутворення у великому різноманітті повсякденних покупок. У своїй класичній книзі про управління доходами, що була опублікована у кінці 90-х, Роберт Кросс яскраво висвітлив тенденцію до динамічного встановлення цін з метою максимізації прибутку. У наш час, динамічне ціноутворення використовуються у різних сферах бізнесу: авіакомпаніями, готельним господарством, компаніями з прокату автомобілів, залізничними дорогами і ін. Споживачі розуміють, що повинні платити більше, коли попит вище. У той же час, споживачі також розуміють вигоду: планування подорожі у період низьких цін дозволяє заощаджувати значні кошти, змінюючи графік споживання в залежності від ціни.

Аналіз процесів в енергетичній сфері США показав, що впровадження на національному рівні динамічного ціноутворення має потенціал для п'ятикратного зменшення частки пікового попиту. Разом з цим таке оцінювання дозволило визначити ефективність управління попитом і показало, що навіть скорочення пікового попиту на 5% може зменшити витрати на виробництво електроенергії на \$3 мільярди в рік.

Останнє десятиліття електромережі загального користування використовуються у режимах, що характеризуються поступовим переходом від класичної централізованої мережі з однонаправленою передачею енергії (від централізованих джерел до споживачів шляхом транспорту через розподільчі мережі) до локальних мереж з розподіленими джерелами, які набули нових властивостей шляхом впровадження інтелектуальних систем управління. Поява „розумних” мереж та мікро-сіток спричинило ряд проблем, пов'язаних з непристосованістю існуючих мереж до підключення джерел на рівні споживача. Мікро-сітка як локальна мережа низької напруги, управляється за допомогою інтелектуальної системи і може бути інтегрована у мережу центральної енергосистеми, мати з нею взаємопов'язані режими, або бути повністю ізольованою, функціонально відокремленою. Мікро-сітка може мати різні джерела генерації електроенергії, традиційні та поновлювальні, які теж можуть бути джерелами розподіленої генерації для централізованої мережі [4,5].

Постановка завдання. Для найбільш еластичного узгодження генерації та попиту на споживання у мікроенергетичній системі локального об'єкта доречно розглядати щодобові сценарії оптимізації. Графік генерації джерел розподіленої генерації чи автономних джерел – це планування генерації електроенергії щодобово або потижнево, для досягнення оптимізації в частині витрат на електрозабезпечення та, одночасно, враховуючи різноманітні обмеження для поновлюваних джерел (рівень досяжності до природного енергетичного потенціалу) та централізованої мережі (наявність добових тарифних зон, показники надійності, можливість паралельної роботи з джерелами розподіленої генерації). Це одна з найскладніших проблем оптимізації систем електрозабезпечення локальних об'єктів у межах мікро-сіток, оскільки для цього необхідно опрацювати багато безперервних і дискретних змінних для побудови декількох цільових функцій та коректно враховувати при цьому численні обмеження для дуже короткого часового інтервалу.

Проблема планування генерації електроенергії у мікро-сітках дуже відрізняється від планування графіків навантаження у класичній системі енергопостачання. Як було зазначено

вище, мікро-сітка зазвичай складається з традиційних джерел ЦЕС, генераторів з двигунами внутрішнього згорання та декількох поновлювальних джерел, насамперед, вітрових та сонячних електростанцій (ВЕС та СЕС), сумірною зі споживачем встановленою потужністю, а також накопичувачів - акумуляторних батарей (АКБ). Характеристики поновлювальних джерел і АКБ значно відрізняються від традиційних джерел. Крім того, неможливо завжди забезпечити однаковий рівень генерації поновлювальних джерел і, як наслідок, неможливо дотриматись наперед заданого графіка електроспоживання на основі використання тільки таких джерел. Тому зв'язок мікро-сітки з ЦЕС, традиційними джерелами та визначеною наперед ємністю накопичувача є необхідною умовою забезпечення заданого графіка електроспоживання об'єкта, у якому функціонує мікро-сітка.

Наявність у мікро-сітці декількох джерел, накопичувача електроенергії та їх зв'язок з ЦЕС вимагає створення ієрархічної автоматизованої системи керування. Поєднання традиційних і поновлювальних джерел, досконале прогнозування обсягів їх генерації є важливим і складним науковим завданням для розроблення принципів управління мікро-сіткою [6,7].

Результати дослідження. У роботі запропоновано метод формування алгоритмів управління енергобалансом мікро-сітки з використанням інтелектуальної системи керування на основі добового прогнозування рівнів генерації автономних джерел, використання ємності накопичувача для забезпечення заданого графіка електроспоживання, в якому функціонує мікро-сітка, і включення до структури енергетичного модуля таких джерел, які б забезпечили мінімальні експлуатаційні витрати на електрозабезпечення локального об'єкта.

На першому етапі завдання полягає у розробці теоретичних засад управління процесами генерації, накопичення та споживання електроенергії при детермінованому добовому графіку електрозабезпечення з трьома джерелами: ЦЕС, вітросонячною установкою (ВСУ) та автономною електростанцією з двигуном внутрішнього згорання (АЕСДВЗ) на основі одного критерію - умовного динамічного тарифу.

Умовний динамічний тариф (УДТ) – це інтегральний показник приведеної поточної вартості електроенергії на основній шині перед розподілом між споживачами локального об'єкта, який формується на основі реальної собівартості електроенергії кожного з джерел, що входять до енергетичного модуля мікро-сітки, у заданому часовому інтервалі, умовою визначення тривалості якого є прогноз незмінності вартості електроенергії та ймовірність, з якою цей прогноз здійснюється.

В залежності від добових зон тарифів ЦЕС (детермінований чинник), доступного природного потенціалу для генерації від ВСУ (ймовірнісний чинник), ємності накопичувача та рівня його заряду у будь-який момент часу (ймовірнісний чинник), собівартість електроенергії буде змінюватись у певних межах. Як видно з вище наведених міркувань, алгоритм керування мікро-сіткою повинен забезпечувати узгоджений добовий графік електроспоживання локального об'єкта обраними джерелами.



Рис.1 Формалізоване пояснення мети оптимізації функціонування мікроенергетичної системи

Перед тим, як перейти до формулювання принципів побудови алгоритмів керування енергетичним модулем, необхідно розробити формалізовану модель функціонування мікро-сітки і встановити причини, що суттєво впливають на формування собівартості електроенергії. Для прогнозування рівнів генерації ВСЕ необхідно використати статистичні дані про енергетичні потенціали вітру і сонця, вартість первинного палива та ймовірнісні методи їх оцінювання.

Загалом, задача оптимізації полягає у наступному:

I-й підхід: при відомих, обраних наперед потужностях генеруючих установок ВСУ, АЕСДВЗ, ємності акумуляторів та добовому графіку електроспоживання, необхідно розробити математичний апарат формування УДТ з урахуванням ймовірностей доступності до вітрової та сонячної енергії у обраній кліматичній зоні. На першому етапі показники апаратної надійності (безвідмовності) елементів системи вважатимемо постійними, тобто такими, що не впливають на процес генерації і накопичення, в тому числі і ЦЕС.

II-й підхід: при певних обмеженнях на ціну електроенергії у пропонованій системі (визначений наперед УДТ для добових зон) визначити склад системи електрозабезпечення на основі обраних джерел та оптимізувати їх потужності і ємність накопичувача з урахуванням ймовірностей доступності до вітрової, сонячної енергії у обраній кліматичній зоні та обмеженнями щодо апаратної надійності елементів системи.

Очевидно, що вирішення такого завдання необхідно побудувати та дослідити дискретно-лінійну цільову функцію на максимума та мінімуми відповідно, як для першого, так і для другого підходу. Виходячи з практичної зручності, тривалість часової дискрети можна обрати 20-30 хвилин.

До складових елементів системи енергетичного модуля мікро-сітки входять (рис.2):

- вітроелектростанція (ВЕС);
- сонячна електростанція (СЕС);
- інвертор з функцією зарядного пристрою І/ЗП;
- акумуляторні батареї (АКБ);
- автономна електростанція з двигуном внутрішнього згорання (АЕСДВЗ);
- шини централізованої енергосистеми (ЦЕС);

- таймер перемикання кіл для використання зонних тарифів ЦЕС;
- автоматизована система керування (СК).

До системи керування, у свою чергу входить:

- реле струму PI_1 ВЕС;
- реле струму PI_2 СЕС;
- реле контролю заряду АКБ PU_1 ;
- реле контролю напруги ЦЕС PU_2 ;
- пристрій автоматичного вводу резерву ЦЕС ABP_1 ;
- пристрій автоматичного вводу резерву АЕСДВЗ ABP_2 ;
- реле контролю напруги АЕСДВЗ PU_3 ;
- пристрій автоматичного вводу резерву для заряду АКБ ABP_3 ;
- пристрій автоматичного вводу резерву на шинах споживача ABP_4 .

Пріоритетна послідовність роботи джерел живлення наступна:

а) живлення споживачів відбувається від вітросонячної системи при достатньому рівні заряду АКБ. СК утримує ABP_4 в положенні 1, при значеннях сигналів з давачів PI_1 , PI_2 та PU_1 більше мінімальних порогових значень;

б) при досягненні сигналу з давача PU нижче мінімального порогового значення СК здійснює перемикання ABP_4 у положення 2. При цьому у часовій зоні найменшого тарифу можливе заряджання АКБ (при відсутності струму заряду з ВЕС і СЕС) для чого СК комутує ABP_3 ;

в) при відключенні ЦЕС (сигнал з PU_2 відсутній), СК запускає програму підготовки до запуску і пуск АЕСДВЗ, а потім, при появі сигналу з PU_3 , здійснює комутацію ABP_4 в положення 3.

При появі сигналів з PU_1 чи PU_2 більших, ніж мінімальні порогові значення, СК виконує відповідні комутації для перемикання живлення споживачів від джерел, пріоритетна послідовність роботи яких описана вище.

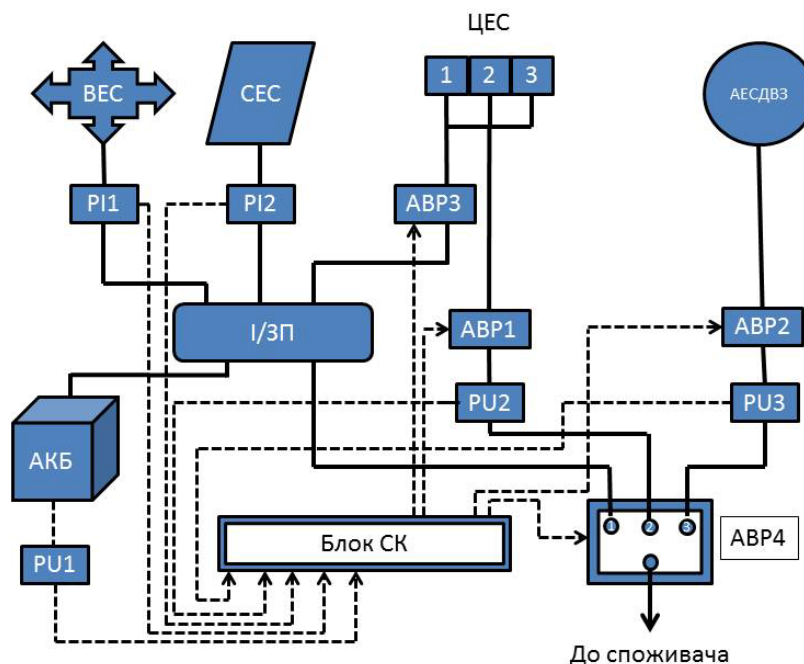


Рис. 2 Структурна схема енергетичного модуля мікроенергетичної системи з енергетичними зв'язками та сигналами керування

Для конкретного набору джерел (модельний ряд, встановлені потужності, кліматична зона) моделювання функціонування мікро-сітки необхідно здійснювати на основі часових діаграм роботи джерел у відповідності до пріоритету, визначеного вище.

Принцип формування УДТ полягає у одержанні розрахункової вартості електроенергії на шині споживача у певному часовому інтервалі, що генерується комбінованим енергетичним модулем з декількома джерелами (АКБ може бути як навантаженням для вітросонячної електростанції та ЦЕС, так і окремим джерелом) та прогнозного оцінювання незмінності визначеного УДТ на заданому інтервалі часу із заданою ймовірністю.

Для технологічного контролю рівнів генерації джерел (чи кількості відпущеної електроенергії з шин ЦЕС) пропонується наступна конфігурація збору первинних даних усередині енергетичного модуля для подальшого їх використання у обчисленнях інтелектуального блоку СК (рис.3).

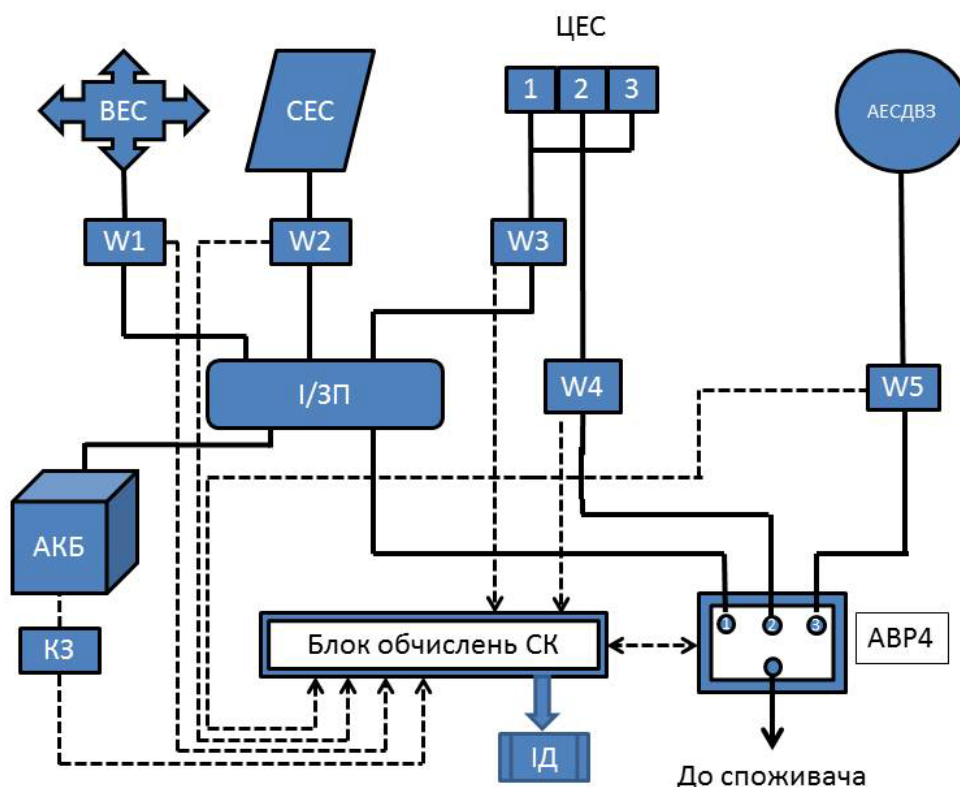


Рис. 3 Система збору і обробки даних для формування УДТ (W_1 - W_5 - цифрові вимірювачі потужності; КЗ – контролер рівня заряду АКБ; ІД – інформаційний дисплей)

Як видно з (рис.3) найпростішим давачем потужності у режимі реального часу може бути цифровий вимірювач потужності з відповідним інтерфейсом та адаптованим видом вихідного сигналу для блоку обчислень СК.

У загальному вигляді формування УДТ відбувається наступним чином. Оскільки джерела електричної енергії є взаємозамінними та взаємно резервованими, особливості процесів перетворення первинної енергії у електричну висуває певним чином обґрунтовані вимоги щодо пріоритетного їх використання. Знаючи рівень енерговитрат, раціональним є визначення кількості енергії w_n , яка повинна надходити від обраних n джерел, собівартість електроенергії від яких буде різною. Кожне з цих джерел має різну доступність k . Під доступністю будемо розуміти ймовірність того, що i -те джерело буде здатне генерувати задану кількість електроенергії w_n у заданий час, або ймовірність того, що генеруюча установка буде забезпечена первинною

енергією в будь-який час і в об'ємі, що відповідає номінальним показникам установки, $k_{di} \in [0,1]$.

Якщо необхідно забезпечити електроживлення визначеної групи струмоприймачів з заданим рівнем електроспоживання W , необхідна кількість електроенергії мікроенергетичної системи може забезпечуватися можливим набором комбінацій з будь-яких, наперед визначених n джерел електроенергії.

У формалізованому вигляді УДТ $U(t)$ визначатиметься як:

$$U(t) = \sum_{i=1}^n w_i B_i(t), \quad (1)$$

де $B_i(t)$ - питома вартість генерованої електроенергії i -тим джерелом для певного часу t .

Залежність (1) справедлива за умови, коли i -те джерело з найменшою собівартістю електроенергії може забезпечити достатньою кількістю електроенергії, у іншому випадку знадобиться додаткове джерело, яке забезпечить необхідною кількістю електроенергії, якої бракувало ($\sum_{i=1}^n W_k (1 - k_{di})$).

$$U(t) = \sum_{i=1}^n w_i B_i(t) k_i + B_k \sum_{i=1}^n W_k (1 - k_{di}). \quad (2)$$

Очевидно, що найбільш раціональний варіант електроживлення обраної групи споживачів з огляду витрат на первинні енергоресурси спостерігатиметься за умови:

$$U(t) \Rightarrow \min. \quad (3)$$

Розв'язок рівняння (3) дозволить одержати оптимальний набір джерел електроенергії з урахуванням режиму електроспоживання та приведеної питомої вартості електроенергії для обраного часу t . Мінімальне значення УДТ $U^{min}(t)$ в заданий момент часу t буде відповідати певній конфігурації структури активних джерел з мінімальною вартістю первинного палива чи тарифної зони для ЦЕС.

Висновки. Таким чином, мікро-сітку можна розглядати як єдиний контрольований блок навантаження у системі електроживлення або як блок інтелектуальних джерел, що працюють на паралель з централізованою енергосистемою. Маючи свою локальну „розумну” систему управління та генерації електроенергії, насамперед поновлюваними джерелами, мікроенергетична система спроможна забезпечувати споживачів локального об'єкта надійною та якісною електроенергією за найнижчою ціною.

Планування виробництва електроенергії та узгодження рівнів електроспоживання з графіком навантаження у мікро-сітці – це головна функція інтелектуальної системи управління. Вона повинна враховувати графік генерації електроенергії з власних джерел та найбільш оптимальний розподіл навантаження між споживачами, забезпечуючи стійкість роботи мікроенергетичної системи та якість електроенергії (безперервність електроживлення).

Список використаних джерел

1. P. Samadi, R. Schober, and V. Wong, "Optimal energy consumption scheduling using mechanism design for the future smart grid," in IEEE SmartGridComm, 2011.
2. P. Yi, X. Dong, A. Iwayemi, C. Zhou, and S. Li, "Real-time opportunistic scheduling for residential demand response," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 1, pp. 227–234, March 2013.
3. B.-G. Kim, Y. Zhang, M. van der Schaar, and J.-W. Lee, "Dynamic pricing for smart grid with reinforcement learning," in IEEE CCSES (IEEE INFOCOM Workshop), 2014.
4. M. H. Albadi and E. El-Saadany, "Demand response in electricity markets: An overview," in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
5. J.-W. Lee and D.-H. Lee, "Residential electricity load scheduling for multi-class appliances with time-of-use pricing," in IEEE GLOBECOM Workshops, 2011.
6. H.-T. Roh and J.-W. Lee, "Residential demand response scheduling for multi-class appliances in the smart grid," IEEE Transactions on Smart Grid, to appear. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2015.2445491>
7. A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 120–133, Sept. 2010.

УСЛОВНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ТАРИФ КАК КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Киевский национальный университет технологий и дизайна
КАПЛУН В.В.

Цель. Обоснование критерия эффективности функционирования микроэнергетических систем локальных объектов.

Методика. Микроэнергетическая система рассматривается как единственный контролируемый блок управляемой системы электропотребления с интеллектуальными источниками, которые могут быть интегрированы в централизованную энергосистему. Анализ подходов оценки эффективности локальной "умной" микроэнергосистемы осуществляется с учетом дискретного и комбинаторного характера математических моделей систем такого рода, применены принципы структурирования, декомпозиции и конвейеризации, теории сетевых графов.

Результаты. В работе обосновано понятие и принципы формирования условного динамического тарифа как интегрального показателя текущей стоимости электроэнергии микроэнергетической системы с несколькими источниками перед ее распределением между потребителями локального объекта, который формируется на основе реальной себестоимости электроэнергии в выбранном временном интервале с учетом графика нагрузки в реальном времени.

Научная новизна. Впервые для оценки эффективности микроэнергетических систем локальных объектов с традиционными и возобновляемыми источниками предложено использование условного динамического тарифа как интегрального показателя текущей стоимости электроэнергии энергетического модуля микроэнергосистемы с учетом графика нагрузки в реальном времени.

Практическая значимость. В работе предложен метод формирования алгоритмов управления энергобаланса микро-сети с использованием интеллектуальной системы управления на основе суточного прогнозирования уровней генерации автономных источников, использования емкости накопителя для обеспечения оптимальных затрат на электропотребление объекта.

Ключевые слова: *микроэнергетическая система, микро-сеть, условный динамический тариф, традиционные и возобновляемые источники электроэнергии, оптимальное электропотребление.*

**THE DYNAMIC PRICING OF ELECTRICITY
AS A CRITERIA OF EFFICIENCY OF LOCAL MICROENERGY SYSTEMS**

KAPLUN V.V.

Kyiv National University of Technologies & Design

Purpose. Justification of a criteria of efficiency of local micro energy systems.

Methods. Micro energy system is considered as a single unit controlled by the managed system with intelligent electricity sources that can be integrated into a centralized grid. Analysis of approaches evaluate the effectiveness of the local "smart" microgrid shall be based on the discrete and combinatorial nature of mathematical models of such systems by applying the principles of structuring, decomposition and pipelining, the network graph theory.

Results. The research justified the concept and principles of conditional dynamic pricing as the integral index of the current cost of electricity microgrid with multiple sources prior to distribution between consumption of a local object based on the current cost of electricity in the chosen time interval considering the load curve at the current time.

Originality. For the first time to assess the effectiveness of local microgrid with traditional and renewable sources suggested the use of the conditional dynamic pricing as the integral index of the current value of the power systems based on the load level at the current time.

The practical significance. This paper proposes a method of forming the control algorithms of the energy balance of micro-networks using an intelligent control system based on the daily forecasting generating of independent sources, the use of storage capacity for optimal power consumption for the local object.

Keywords: *microgrid, dynamic pricing, traditional and renewable energy sources, optimal power consumption.*