

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

БОЙКО ІВАН ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.314

ДИНАМІЧНА ТАРИФІКАЦІЯ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Жуйков Валерій Якович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» (м. Київ), професор кафедри електронних
пристроїв та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Юрченко Олег Миколайович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук
України, м. Київ, завідувач відділу транзисторних
перетворювачів;

кандидат технічних наук, доцент
Буйний Роман Олександрович,
Національний університет «Чернігівська політехніка»
МОН України, м. Чернігів, доцент кафедри електричних
систем і мереж.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р. о 15-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.20 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г. І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано « 16 » листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент

А.І. Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження.

Автономні системи електроживлення широко використовуються у складі електротехнічних комплексів в різних секторах економіки та географічних регіонах України. У загальному випадку система автономного електроживлення містить вітроустановки, сонячні батареї, дизель-генератори, випрямно-зарядні пристрої, батареї акумуляторів, інвертори, запобіжно-розподільні та комутуючі пристрої. Характерною особливістю автономних систем електроживлення є значна частка роботи у перехідних процесах, обумовлених зміною швидкості вітру, потоку сонячного світла, ступенем заряду акумуляторних батарей тощо.

Одним із важливих питань при роботі автономної системи електроживлення є тарифікації електроенергії, яка повинна бути взаємовигідною для виробників, постачальників та споживачів електричної енергії. На теперішній час для автономних систем електроживлення прийнято механізм регулювання ціни на основі ustalених режимів роботи та відповідних статичних моделей. Під час перехідних процесів змінюється рівень генерації електроенергії, що ускладнює тарифікацію електроенергії з використанням статичних моделей. Розроблено низку методів для динамічного визначення вартості електроенергії в умовах динамічної зміни рівня генерації електроенергії автономними та розосередженими системи електроживлення.

Дослідження зазначених питань тарифікації відображені у працях відомих вітчизняних та закордонних вчених, зокрема: Кириленко О.В., Блінов І.В., Ямненко Ю.С., Мохор В.В., Замулко А.І., Саух С.Є., Шульженко С.В., Борукаєв З.Х., Жуйков В.Я., А.К. David, Y.C. Lee, S. Wong, J. David Fuller, Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, Kameshwar Poolla, Toru Namerikawa, Norio Okubo, Ryutaro Sato, Yoshihiro Okawa, Masahiro Ono.

Питання підвищення точності визначення кількості генерованої електроенергії системою електроживлення потребує подальшого дослідження, оскільки відомий метод динамічного визначення вартості розроблено без врахування динамічної зміни параметрів енергогенеруючої системи під час перехідних процесів.

Таким чином, підвищення точності визначення кількості генерованої електроенергії автономною системою електроживлення шляхом розробки методу динамічної тарифікації, що враховує зміну параметрів під час перехідних процесів, є актуальним та важливим науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами.

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темою, яка фінансувалася Міністерством освіти і науки України: "Гетерогенна мережа збору, передачі та обробки інформації для системи розподіленої генерації MicroGrid" (№ ДР 0119U001184).

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні точності визначення кількості генерованої електроенергії автономною системою

електроживлення шляхом розробки методу динамічної тарифікації, що враховує зміну параметрів під час перехідних процесів.

Вирішення наукового завдання, поставленого в дисертації, включає в себе наступний комплекс задач:

- обґрунтування розробки моделі динамічної тарифікації на основі огляду рішень, які існують у світі;

- розробка динамічної моделі тарифікації електроенергії на основі рівняння економічного балансу, що надасть змогу враховувати вартість первинного носія електроенергії в залежності від рівня генерованої та споживаної енергії у поточному часі;

- розробка динамічної моделі з урахуванням перехідних процесів електротехнічної частини, що дозволить здійснювати адекватну тарифікацію у динамічних режимах зміни електротехнічних параметрів;

- розробка пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії, який працює із динамічно змінними даними, що дозволить реалізувати на практиці запропоновані теоретичні положення розрахунку.

Об'єкт дослідження: Перехідні та усталені процеси в автономній системі електроживлення.

Предмет дослідження: динамічна тарифікація у автономній системі електроживлення з урахуванням зміни рівня генерованої електроенергії під час перехідних процесів.

Методи дослідження: при розробці динамічної моделі енергогенеруючої системи використані методи обчислення за допомогою систем диференціальних рівнянь та методів інтегрування. В якості інструментарію досліджень використано математичне моделювання та відповідні методи і засоби аналізу стану перехідних процесів у нелінійній системі. Для розрахунку диференціальних рівнянь і моделювання перехідних процесів використано програмне середовище MATLAB 2010b. Моделювання пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії із можливістю щосекундної тарифікації на базі плати Arduino Uno із мікропроцесором ATmega328p виконано у середовищі TinkerCAD.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено метод динамічної тарифікації для автономної системи електроживлення шляхом врахування зміни виробленої електроенергії під час перехідних процесів, що дозволяє підвищити точність визначення кількості генерованої електроенергії.

2. Вперше отримано аналітичні залежності динамічної тарифікації для автономної системи електроживлення із дизель-генератором та накопичувачем електроенергії, що дозволяє розраховувати динамічну зміну вартості електроенергії за умови підтримування її генерації на заданому рівні.

3. Отримав подальший розвиток метод динамічної тарифікації шляхом врахування вартісних коефіцієнтів, що дозволяє враховувати частку виробленої електроенергії кожним працюючим генератором у складі електротехнічного комплексу.

4. Вперше отримано аналітичні залежності динамічної тарифікації для електротехнічного комплексу енергоострову, що дозволяє проводити динамічну тарифікацію окремих ізольованих систем електроживлення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблено алгоритм розрахунку вартості одиниці електроенергії двох генераторів з реалізацією на мікропроцесорі ATmega328p, що дозволяє отримувати значення динамічної тарифікації окремо по кожному споживачу.

2. Запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega328p для щосекундного розрахунку вартості.

3. Розроблена методика динамічної тарифікації впроваджена в дисципліні: “Маркетинг в енергетиці”, “Інтелектуальні електроенергетичні мережі та системи”, освітня програма другого (магістерського) рівня вищої освіти “Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології” КПІ ім. Ігоря Сікорського.

4. Оригінальність практичних результатів підтверджена авторським свідоцтвом на науковий твір «Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та врахування алгоритму динамічної тарифікації» № 101337 від 21 грудня 2020 р.

Особистий внесок здобувача. Всі результати та висновки, що становлять основний зміст дисертації, отримані автором особисто. Робота [6] написана автором самостійно. У роботах, опублікованих автором у співавторстві, особисто здобувачеві належить: в [1] – наведено аналіз використання пристроїв силової електроніки в Україні; в [2] – створено математичну модель, що поєднує динамічні рівняння, які описують економічні та електротехнічні параметри енергогенеруючої системи; в [3] – виконано комп’ютерне моделювання перехідних процесів у електротехнічній системі, за допомогою складеної динамічної електро-вартісної моделі; в [4] – огляд статичних та динамічних моделей розрахунку вартості електроенергії автономних систем у складі Microgrid; в [5] – комп’ютерне моделювання перехідних процесів у ізольованій електротехнічній системі із використанням створеної лінеаризованої динамічної електро-вартісної моделі; в [7] – огляд статичних та динамічних моделей розрахунку вартості електроенергії автономних систем у складі Microgrid; в [8] – запропоновано алгоритм технічної реалізації розрахунку вартості базової частини електроенергії при зміні її обсягу у динамічному режимі, на основі якого може бути виконана оцінка вартості у динамічному режимі для Microgrid різного функціонального призначення; в [9] – наведено аналіз тарифікації у енергосистемі України, яка використовується на сьогоднішній день; в [10] – створено алгоритм динамічної тарифікації на локальному рівні Smart Grid;

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи доповідалися та були обговорені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2015 IEEE 35th International Conference; Міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційно - комп'ютерні технології 2016"(м. Житомир, 2016.); Міжнародній

науково-технічній конференції "Smart - технології в енергетиці та електроніці" (сmt. Лазурне, 2016.); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку-PEMS'18, Київ, 2018; Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку-PEMS'19, Київ, 2019; Міжнародній науково-технічній конференції Actual Problems of Science and Education APSE – 2021 held in Budapest on 7th of February; Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку-PEMS'21, Київ, 2021.

За роботу «Оцінка стану електромагнітної сумісності та підвищення якості електроенергії при використанні пристроїв силової електроніки», виконану у співавторстві зі студентом Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Ершенгореном Н. Е. 25 лютого 2015 р. отримано грамоту Президії НАН України.

Публікації. Результати дисертації відображені у 10 наукових працях, з них 8 статей – у наукових фахових виданнях, з яких 6 публікацій – у наукових фахових виданнях України, 2 публікації – у виданнях країн ЄС, 1 – теза доповіді в збірнику матеріалів конференції, 1 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 86 найменувань та 8 додатків. Загальний обсяг роботи становить 136 сторінок, в тому числі 111 сторінок основного змісту, 53 рисунки, 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо їх апробацій.

У **першому розділі** надається загальний опис автономних електротехнічних систем, наводяться типи обладнання у складі таких систем. Приводиться класифікація систем електропостачання за рівнем відновлюваної енергії. На рис.1. наведено схеми з'єднання джерел електроенергії у єдину локальну систему на стороні постійного струму та на стороні змінного струму.

Загальновідомо, що комбінація двох або більше різних типів джерел електроенергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з точки зору ціни, ефективності й надійності. Будь-яка комбінація технологій генерації енергії розосереджених джерел енергії (РДЕ), у тому числі відновлюваних джерел енергії (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.

Згідно принципів Microgrid існує можливість поєднувати наведені вище системи у єдиний електротехнічний комплекс. Структурна схема типової

гібридної Microgrid на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та дизель-генератора (ДГ) наведено на рис. 2.

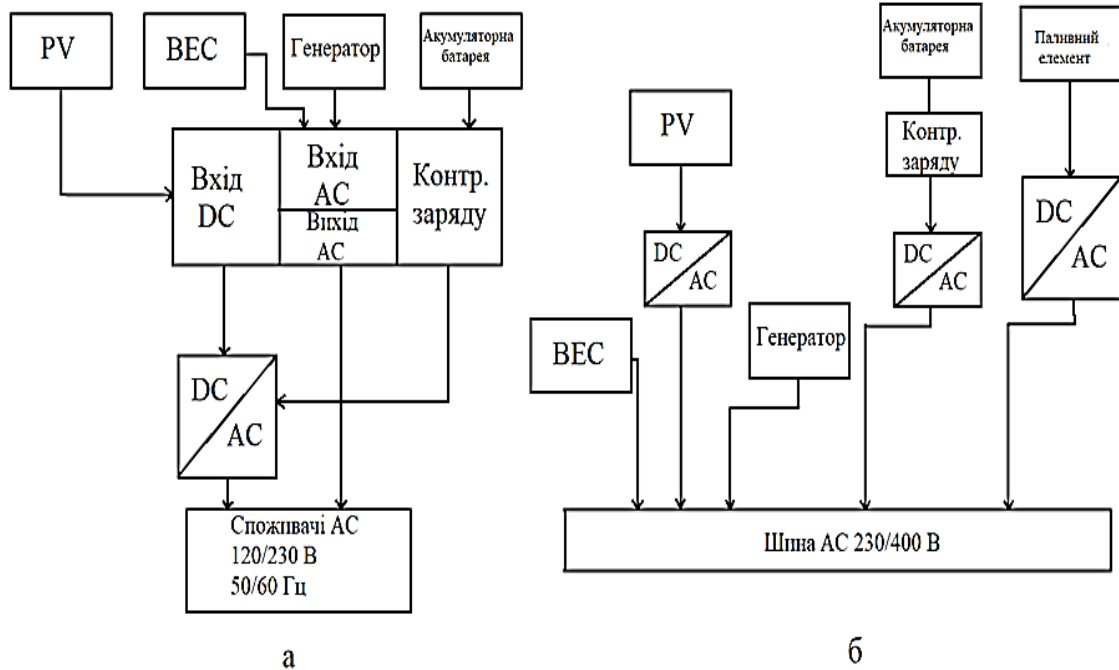


Рис. 1. Схема з'єднання елементів системи на стороні постійного струму (а) та змінного струму (б)

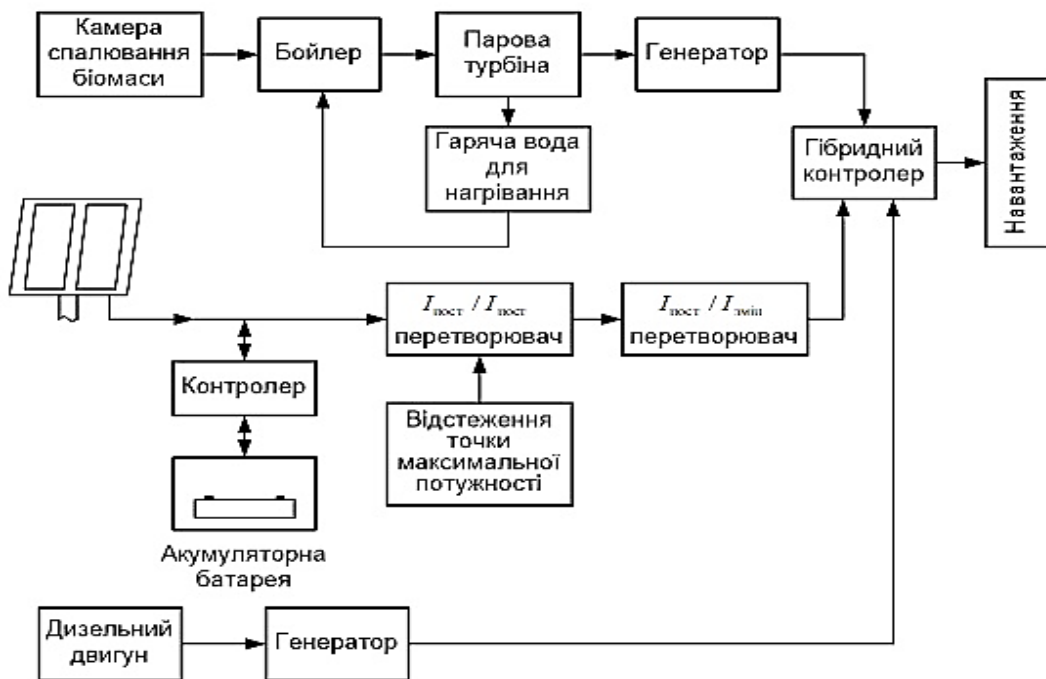


Рис. 2. Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ

Зазначається, що робота великої кількості автономних електротехнічних систем в ринкових умовах є неминучою, що наразі створює нові завдання, які повинні бути вирішені, а саме:

1. Забезпечення участі у ринку малих джерел живлення.
2. Переривчастий характер надання електроенергії в загальну електроенергетичну систему.
3. Автономність, яка обумовлена формою власності.

Одним із способів вирішення вище означених проблем є агрегування низки автономних електротехнічних систем у віртуальні електростанції. У цьому об'єднанні, група розосереджених генераторів матиме таку ж спостережність, керованість і функціональність на ринку як звичайні електростанції (ВрЕС).

Віртуальна електростанція це кластер розосереджених генераторних агрегатів, керованих навантажень і систем акумулявання, що працює в якості єдиної електростанції. Генератори можуть використовувати як викопні так і відновлювані джерела енергії. Серцем ВрЕС є система керування електроенергією, яка керує потоками енергії, що йдуть від генераторів, керованих навантажень і акумуляторів.

Ідеальна віртуальна електростанція використовує такі технології як: технології генерації, технології зберігання енергії, інформаційно-комунікаційні технології. Автором проведено огляд існуючих рішень щодо тарифікації електричної енергії, який свідчить о необхідності розробки способів динамічної тарифікації для локальних електротехнічних систем що забезпечить адекватну вартість електроенергії в різних режимах роботи.

Для подальшого розвитку моделей, представлених у роботах таких вчених як А.К. David, Y.C. Lee, Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Erkki Laitinen; Jukka H&li, Erkki Antila, Steven Wong, J. David Fuller, Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, Kameshwar Poolla, Hadis Pourasghar Khomami та Mohammad Hossein Javidі необхідно враховувати нелінійний характер електротехнічних процесів генератора.

Розробка засобів тарифікації в ізолюваних електротехнічних системах з урахуванням перехідних процесів електротехнічної частини дозволить здійснювати адекватну тарифікацію у динамічних режимах зміни електротехнічних параметрів.

Наводиться визначення розумного лічильника електроенергії, smart energy meter (SEM), принцип побудови та зв'язку між користувачем/домогосподарством та підстанцією.

У **другому розділі** обґрунтовується актуальність створення гнучкої динамічної тарифікації для локальних систем електроживлення, що дозволить забезпечити адекватну тарифну ціну електроенергії. Тривалість перехідних процесів генератора має безпосередній вплив на економічні параметри ізолюваної системи, тобто на відхилення реальної тарифної ціни електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого у існуючій моделі щогодинної тарифікації.

Система «виробник – споживач електроенергії» може бути представлена як замкнена макроекономічна система, яка поєднує динамічну та економічну частини ізолюваної системи.

Споживач отримує кількість електроенергії W , взамін сплачуючи її вартість $S_w = C_w \cdot W$, де C_w – вартість одиниці електроенергії. Система витрачає певну кількість отриманих коштів S [грн] на супутні витрати (spending). Наприклад, у випадку генератора на основі двигуна внутрішнього згорання величина S складає об'єм витраченого палива B , помножений на C_B , де C_B – вартість одиниці палива. У випадку сонячної панелі, вітрогенератора, МГЕС – величина S дорівнює амортизаційним відрахуванням та витратам на власні потреби. Економічну складову наведеної системи доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівнянням Фішера:

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

де: M , [грн] – грошова маса, що робить один оберт за час T_V , [грн]; $V = \frac{T}{T_v}$ – кількість обертів грошової маси M за досліджуваний період часу T ; C – вартість одиниці продукції, [грн/шт]; Q – кількість виготовленої продукції [шт] за час T .

Прийнявши, що продукцією є електроенергія [Вт·сек], [кВт·год] або інше, рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = S + C_w \cdot W. \quad (2)$$

Так як споживач в залежності від потреб може збільшувати або зменшувати обсяг споживаної електроенергії, що характеризується її рівнем, то, покладаючи, що за деякий тарифний проміжок часу Δt відбувається зміна рівня генерованої електроенергії, при цьому рівнянні балансу прийме вигляд:

$$M \cdot V = S + (C_w + \Delta C_w) \cdot (W + \Delta W), \quad (3)$$

Прийнявши зміну вартості як: $\Delta C_w = \frac{M \cdot V - S}{W} - C_w \cdot (1 + \frac{\Delta W}{W})$ та враховуючи, що $\Delta C_w = \frac{dC_w}{dt} \cdot \Delta t$ отримано рівняння:

$$\frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V - S}{W \cdot \Delta t} - \frac{C_w \cdot (1 + \frac{\Delta W}{W})}{\Delta t}, \quad (4)$$

Яке описує динамічну зміну C_w в залежності від рівня генерованої електроенергії, що забезпечує щосекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ сек. Інтервал тарифікації може обиратися в залежності від потужності.

Рівняння, яке характеризує зміну рівня енергії генератора, краще обрати диференціальним. У поєднанні із економічним рівнянням балансу енергогенеруючої системи можуть бути отримані наступні електро-вартісні моделі:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V - S}{W} - C_w \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right), \\ \frac{dW}{dt} = -W + \eta_g \cdot W_S, \end{cases} \quad (5)$$

де η_g – ККД генератора; W_S – обсяг енергії, отриманої від супутніх витрат.

Отже, було виконано розробку математичної моделі, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором та дозволяє розраховувати динамічну зміну тарифної ціни при динамічній зміні рівня генерованої потужності, або навпаки.

Використаний раніше підхід по представленню системи «виробник – споживач електроенергії» у якості замкненої макроекономічної системи застосовано для створення математичної електро-вартісної моделі для визначення вартості електроенергії при щосекундній тарифікації.

Для спрощення виразу (2) у правій його частині були залишені лише витрати на паливо, яке необхідне для виробництва електроенергії певним генератором на базі двигуна внутрішнього згорання: $C_B \cdot B(t)$, де: $B(t)$ – кількість палива, C_B – вартість одиниці палива.

Для подальшого оперування з вартістю електроенергії введено коефіцієнт $\sigma = C_B/C$, де: C – вартість одиниці електроенергії.

Ввівши заміни та взявши значення функцій $W(t), B(t), C(t)$ усередненими на інтервалі $[0; T]$, де T – досліджуваний інтервал часу, отримано рівність, виконавши визначене інтегрування якої та перевіривши правильність отриманого результату отримано вираз (6), що визначає динамічну зміну вартості одиниці електроенергії при зміні її рівня:

$$C(t) = \frac{W_0 + \sigma \cdot B(t)}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot C_0, \quad (6)$$

де W_0, C_0 – величини електроенергії та вартості її одиниці відповідні точки спокою.

Застосування виразу (6) передбачає попереднє розбиття діапазону зміни енергії на зони, всередині яких відбувається розрахунок відносно точки W_0 з вартістю C_0 .

На рис. 3. наведено розбиття діапазону зміни генерованої електроенергії на n частин. Для кожної з частин вираз (6) матиме вигляд:

$$C(t) = \frac{W_{0i} + \sigma \cdot B_{0i}}{W(t) + \sigma \cdot B_{0i}} \cdot C_{0i} \Big|_{W_{0i} \in \Delta W_{0i}}, \quad (7)$$

де $C(t)$ – вартість одиниці електроенергії при зміні її рівня $W(t)$ у малому діапазоні відносно стану спокою W_{0i} із вартістю C_{0i} . B_{0i} – кількість палива, що необхідна для генерації рівня електроенергії W_{0i} , σ – відношення вартості одиниці палива до вартості одиниці енергії.

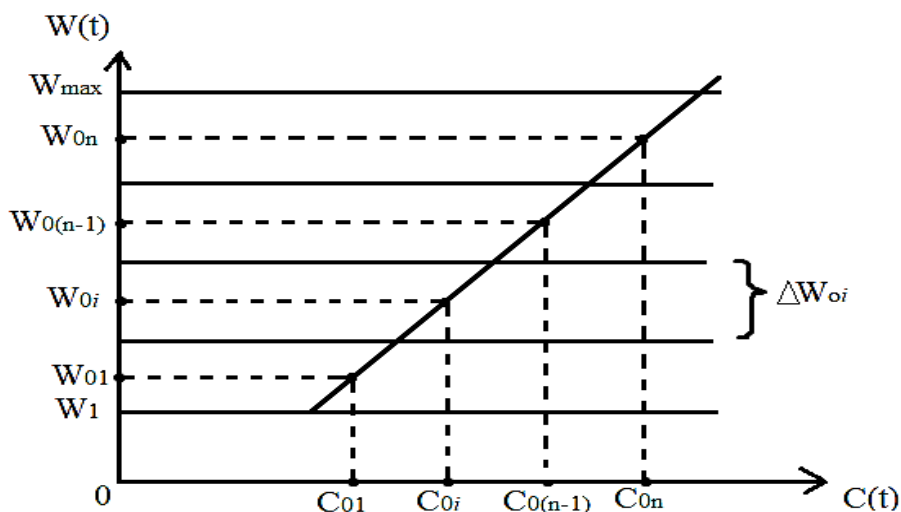


Рис. 3. Зворотна залежність вартості одиниці електроенергії від зміни її рівня

Визначення вартості одиниці електроенергії було продемонстровано на прикладі розрахунку для малих відхилень від деякого статичного рівня генерованої електроенергії на виході автономного дизель – генератора типу Teksan TJ138PE5C, а саме при відхиленнях на 5 % від режиму генерації 50% від номінальної потужності.

Величини витрати палива і рівень електроенергії на вході генератора матимуть значення, наведені у табл. 2. Також у табл. 2. наведені результати розрахунків вартості одиниці електроенергії у точці W_{0i} , яка відповідає рівню генерованої електроенергії у 50% від номінального режиму генерації та при відхиленні на 5% від обраного значення. Також розраховано процентне відхилення між результатами розрахунку обома методами, за виразом (6) та (7) (див. стовпець « Δ , (%)» табл. 2.).

Таблиця 2. Дані розрахунків

$\frac{W(t)}{W_H}$, (%)	Розрахунок за виразом (7)				Розрахунок за виразом (6)				Δ , (%)
	B_{0i} (л)	$\sigma \cdot B_{0i}$ (кВт · год)	$W(t)$ (кВт · год)	$C(t)$ ($\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$)	$B(t)$ (л)	$\sigma \cdot B(t)$ (кВт · год)	$W(t)$ (кВт · год)	$C(t)$ ($\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$)	
45%	15,9	68,68	61,87	6,65	15,1	65,23	61,87	6,83	2,76
50%	15,9	68,68	68,75	6,32	15,9	68,68	68,75	6,32	0
55%	15,9	68,68	75,62	6,01	16,7	72,14	75,62	5,87	2,32

На базі проведених розрахунків видно, що при відхиленні на деяку малу величину від встановленого для обраного режиму рівня генерованої енергії тарифна вартість зміниться відповідно: зростатиме при зниженні величини енергії, спадатиме при збільшенні величини енергії. З урахуванням того що час виходу дизель-генератора на режим роботи більше інтервалу в 1с та похибка між розрахунками динамічної зміни $C(t)$ двома методами менше 3%, у подальшому доцільно виконувати розрахунок лише за виразом (7).

Необхідність використання динамічної оцінки вартості електроенергії було продемонстровано на прикладі системи електроживлення локального об'єкту, енергоострову, генерація якого обмежена сотнею чи декількома сотень кВт. Нехай будинки загальною кількістю n під'єднані до власних генераторів і можуть обмінюватись даними.

Загалом кожен споживач має пристрій розрахунку (PR_i) де $0 < i \leq n$ (рис. 4.), під'єднаний до власного мікроконтролера, який у асинхронному режимі обмінюється даними із підсумовуючим пристроєм (PR_Σ). Загальний мікроконтролер (МК), під'єднаний до нього, регулює виконання умови економічного балансу у системі, яка описується рівнянням Фішера, відсилаючи необхідні дані до кожного PR_i . Таким чином за допомогою обладнання кожного i -го споживача пристроєм розрахунку з мікроконтролером $МК_i$, що об'єднані в мережу двосторонньої передачі даних із підсумовуючим пристроєм PR_Σ і

мікроконтролером МК, реалізується виконання умови економічного балансу у локальній системі із певної кількості генераторів і споживачів.

Крім описаних вище пристроїв розрахунку і підсумовуючих пристроїв, обладнаних мікроконтролерами, об'єднаними у мережу ethernet, до мережі додано загальне об'єднання даних, у якому реєструється обсяг усіх грошей (€), що витрачаються на придбання палива у обсязі $B = \sum_{i=1}^n B_i$.

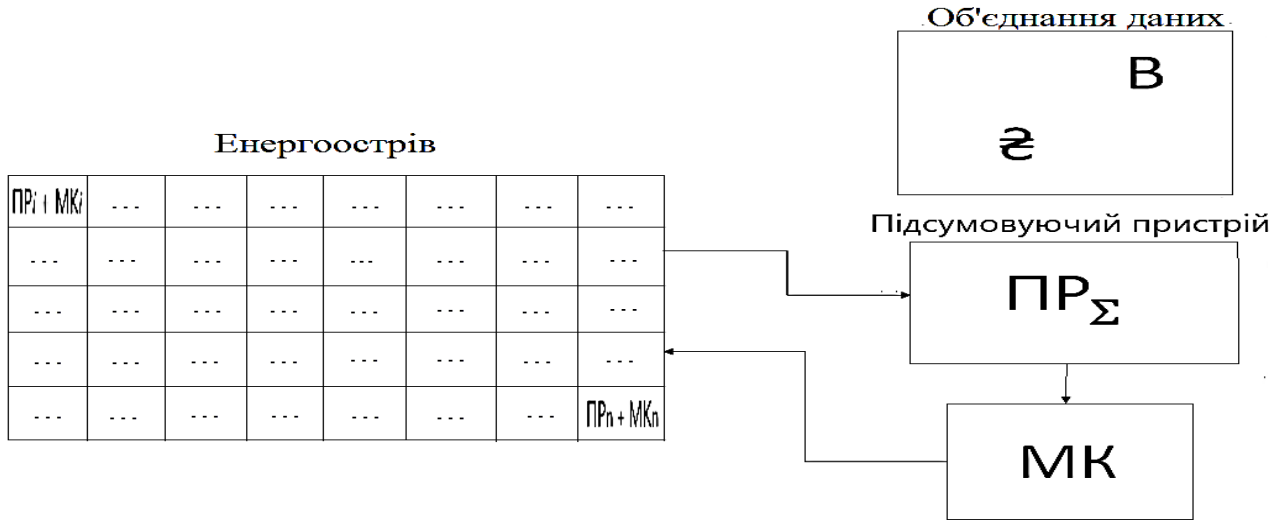


Рис. 4. Спрощена структурна схема зав'язків пристроїв розрахунку енергоострову

Обсяг грошей у розмірі $C_B \cdot B$ повинен враховуватися при перевірці виконання умови економічного балансу на інтервалі $[0; T]$. І якщо умова балансу не виконується, тоді вартість одиниці електроенергії C_{k+1} на кінці досліджуваного інтервалу $[0; T]$ буде відрізнятися від вартості на початку інтервалу C_k . Тоді різниця $\Delta C_t = C_{k+1} - C_k$ повинна переноситися на наступний розрахунковий інтервал і додаватися до вартості на його початку.

На рис. 5. наведено приклад певного періоду часу тривалістю в 24 год, по завершенню якого споживачі мають розрахуватися за отриману електроенергію.

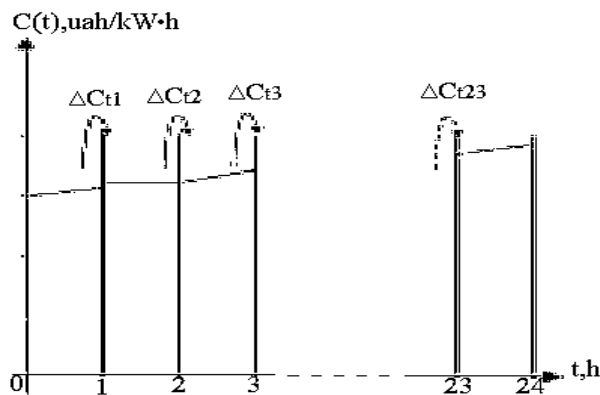


Рис. 5. Схема зміни вартості одиниці електроенергії генератора на протязі доби

На рис. 6. наведено блок-схему алгоритму розрахунку вартості одиниці електроенергії C_i для двох генераторів, кожен з яких постачає електроенергію своєму споживачу, а також сумарної вартості одиниці електроенергії.

Де i – номер генератора, T – досліджуваний інтервал часу, $W_{\Sigma i}$ – сумарний обсяг електроенергії виробленої кожним генератором, W_{Σ} – сумарний обсяг електроенергії, генерованої усіма генераторами на інтервалі часу T , $C_{\text{вар}i}$ – ваговий коефіцієнт вартості електроенергії i -го генератора, I_i, U_i – величини напруги та струму, що генеровані i -м генератором за інтервал часу T .

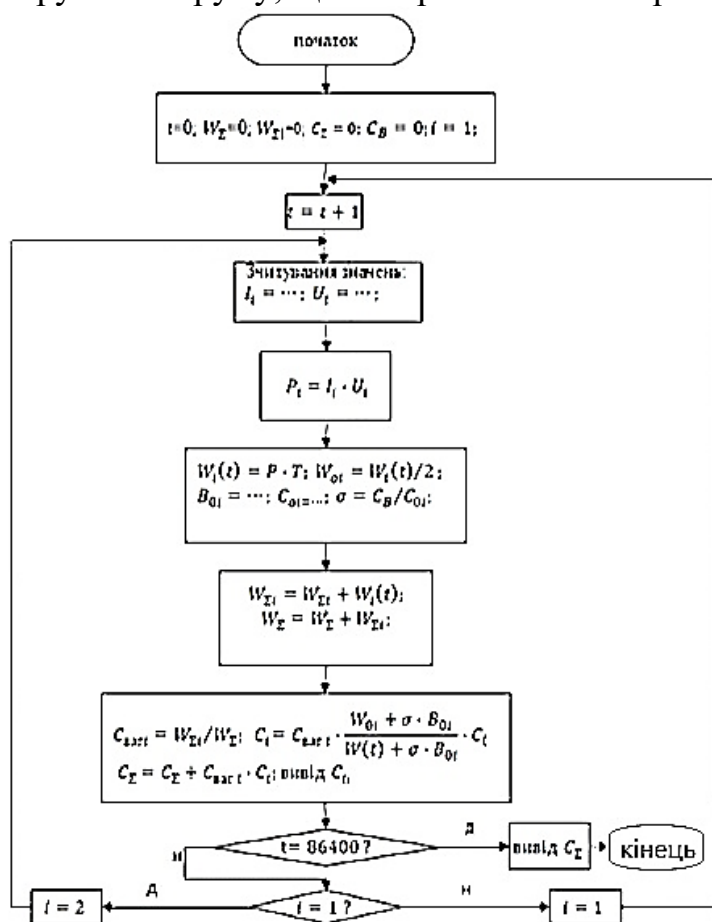


Рис. 6. Алгоритм щосекундного розрахунку C_i на протязі доби

Розрахунок виконується на кінці кожного інтервалу часу T , на протязі досліджуваного часу t . Для прикладу у якості величини t обрано одну добу, а розрахунок вартості C_i виконується щосекундно, тобто $T = 1$ с. У якості номера генератора використовується змінна $i = 1, 2$. По завершенню досліджуваного періоду, тобто коли $t = 86400$ с розрахунок завершується. Тарифікація може бути так і щогодинна. В такому випадку інтервал часу $T = 1$ год. Розрахунок має завершуватися якщо змінна $t = 24$. Даний алгоритм використано у авторському творі [10].

У третьому розділі створено математичну електро-вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну рівня генерованої електроенергії, так і динамічну зміну вартості одиниці електроенергії:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \Delta B_w \cdot C_B, \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}, \end{cases} \quad (8)$$

де β – коефіцієнт, обернений до прибутку системи, ΔB_w – кількість палива, необхідна для генерації рівня електроенергії W , τ – стала часу перехідного процесу генератора, η_B – ККД дизель-генератора, γ – коефіцієнт перетворення палива у генеровану електроенергію.

При відсутності обмежень для приростів W і C_w , після завершення перехідного процесу відповідні величини знаходяться на рівнях, що відповідають виконанню умови балансу у рівнянні Фішера. Результати моделювання наведені на рис. 7. Параметри математичної моделі наведені у табл. 3. Рівняння балансу з урахуванням виконаних замінь матиме вигляд:

$$M \cdot V = \beta \cdot C_w \cdot W + C_w \cdot W, \quad (9)$$

де $\beta \cdot C_w \cdot W = C_B \cdot B$.

Таблиця 3. Параметри системи на старті моделювання перехідних процесів

Параметр	τ	η_B	γ	M	V	ΔB	β	W_0	C_{w0}
Значення	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	100000 грн	1	0 л	1	1000 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$

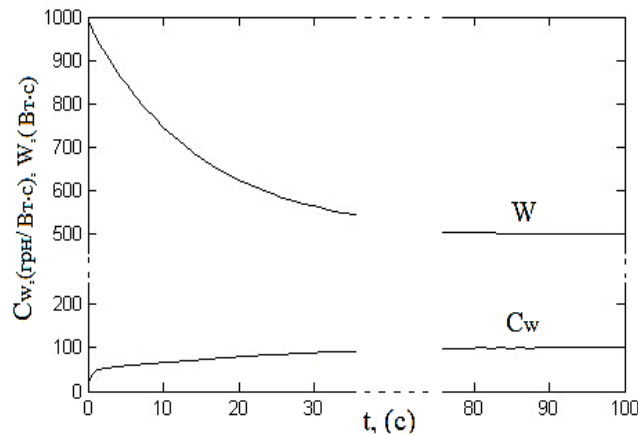


Рис. 7. Перехідні процеси у системі при відсутності обмежень для приростів

У період часу $t = 0$ відбувається зниження рівня генерованої електроенергії на $500 \text{ Вт} \cdot \text{с}$, при цьому вартість одиниці електроенергії зростає відповідно умови балансу. В усталеному режимі значення $W = 500 \text{ Вт} \cdot \text{с}$, $C_w = 100 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$. Перевірка виконання умови балансу виконана шляхом підстановки відповідних параметрів у рівняння (9) і показує виконання цього рівняння, при параметрах, наведених у табл. 3.

Продемонстровано можливість розрахування усталеного значення вартості одиниці електроенергії C_w після завершення перехідних процесів, тобто коли прирости $\frac{dC_w}{dt}$ і $\frac{dW}{dt}$ рівні нулю. Прирівнявши до нуля $\frac{dC_w}{dt}$ і $\frac{dW}{dt}$ отримано систему (10), що дозволяє розраховувати значення C_w , W після завершення перехідного процесу:

$$\begin{cases} C_w = \frac{M \cdot V}{W \cdot (\beta + 1)}, \\ W = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot M \cdot V}{C_B \cdot (\beta + 1)} + \eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B. \end{cases} \quad (10)$$

Із використанням рівняння економічного балансу досліджено зв'язок макроекономічних параметрів системи з її електротехнічними параметрами (системи 11, 12).

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -V + \frac{\Delta W \cdot C_W + W \cdot \Delta C_W + W \cdot C_W + \beta \cdot W \cdot C_W}{M} + \frac{\Delta B \cdot C_B}{M}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V}{C_B \cdot (1 + \frac{1}{\beta}) \cdot \tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = -M + \frac{\Delta W \cdot C_W + W \cdot \Delta C_W + W \cdot C_W + \beta \cdot W \cdot C_W}{V} + \frac{\Delta B \cdot C_B}{V}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V}{C_B \cdot (1 + \frac{1}{\beta}) \cdot \tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (12)$$

Для дослідження характеру перехідних процесів виконано лінеаризацію отриманої математичної моделі. За допомогою отриманої лінеаризованої моделі складено вирази для макроекономічних параметрів системи, перевищення яких призведе до появи коливань у перехідному процесі (13, 14). Виконано дослідження зменшення коливальності у перехідному процесі (рис. 8).

Для демонстрації впливу збільшення величини грошової маси M на зростання коливальності перехідного процесу проведено моделювання із параметрами $M = 1500$ грн (рис. 8, випадок 1) та $M = 5000$ грн (рис. 8, випадок 2).

$$M_{max} = \frac{(1+\beta) \cdot W_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1+\beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}, \quad (13)$$

$$V_{max} = \frac{(1+\beta) \cdot W_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1+\beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot M \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}. \quad (14)$$

Де a, b – константи, використані для апроксимації нелінійності лінійним виразом.

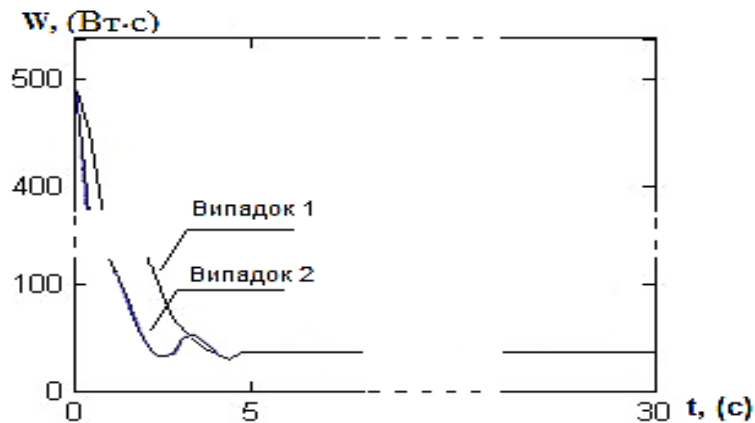


Рис. 8. Коливання у перехідному процесі рівня генерованої електроенергії

Досліджено зв'язок економічних параметрів системи із тривалістю перехідного процесу (вираз 15, рис. 9). Тривалість перехідного процесу $t_p \leq \frac{1}{\eta} \cdot \ln \frac{1}{\Delta}$, де Δ – половина ширини області, при потраплянні в яку перехідний процес вважається завершеним.

$$\eta = \frac{-(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1+\beta) - b \cdot (1+\beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{W_0^2})}}{2}. \quad (15)$$

На рис. 9. наведено моделювання перехідних процесів генерованої електроенергії для двох різних випадків. Прийнято, що у випадку 1 грошова маса $M = 300$ грн, а у випадку 2 $M = 1000$ грн.

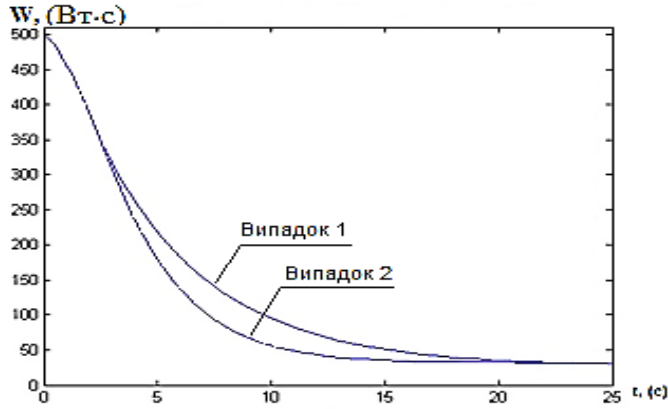


Рис. 9. Графік перехідного процесу рівня електроенергії

Створено математичну модель для дослідження прискореного виходу енергогенератора на заданий режим роботи (16).

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_w}{W} & 0 \leq t \leq t_1; \Delta B = 800; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_P \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau} & t_1 \leq t \leq T; \Delta B = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Досліджена зміна вартості одиниці електроенергії при лінійній або експоненційній зміні рівня генерованої електроенергії (вирази 17, 18).

$$C_w = \frac{M \cdot V \cdot (Ei((1+\beta) \cdot t) - Ei(1+\beta))}{k \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} + \frac{K_B \cdot (e^{(1+\beta-t)} - 1)}{(1+\beta)} + C_{wx.x.} \cdot e^{(1+\beta-t)}, \quad (17)$$

де k – лінійний коефіцієнт для відображення залежності W від t , $C_{wx.x.}$ – вартість одиниці електроенергії при роботі генератора на холостому ході.

$$C_w = -\frac{M \cdot V \cdot e^{k \cdot t} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{(1+\beta+k)}{k}, 2 + \frac{(1+\beta)}{k}, e^{k \cdot t}\right)}{Z \cdot (1+\beta+k)} - \frac{K_B}{(1+\beta)} + \frac{M \cdot V \cdot e^{(1+\beta+k)} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{(1+\beta+k)}{k}, 2 + \frac{(1+\beta)}{k}, e^k\right)}{Z \cdot (1+\beta+k) \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} + \frac{K_B \cdot e^{(1+\beta) \cdot (1-t)}}{(1+\beta)} + C_{wx.x.} \cdot e^{(1+\beta) \cdot (1-t)}. \quad (18)$$

Де k , Z – лінійні коефіцієнти для відображення залежності W від t , $C_{wx.x.}$ – вартість одиниці електроенергії при роботі генератора на холостому ході.

Складену раніше електро-вартісну модель було доповнено для дослідження роботи енергогенеруючої системи із акумулятором (19).

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \frac{(\Delta B + B_{п.з.}) \cdot C_B}{W}, \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot B_{п.з.}}{\tau}, \end{cases} \quad (19)$$

де $B_{п.з.}$ – кількість палива, необхідна для повного заряду акумулятора до рівня електроенергії W_3 з урахуванням ККД заряду η_3 .

Для випадку розряду акумулятора система (19) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W + W_3 \cdot \eta_p} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W + W \cdot \eta_p}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_B}{W + W_3 \cdot \eta_p}, \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W + W_3 \cdot \eta_p}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \left(\beta \cdot C_w \cdot (W + W_3 \cdot \eta_p)\right)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}, \end{cases} \quad (20)$$

де η_p – ККД розряду акумулятора.

Досліджено використання акумулятора при аварійному зменшенні рівня електроенергії дизель-генератора. Отримані результати у динаміці демонструють перехідні процеси вартості одиниці електроенергії (рис. 11) при компенсації втрати рівня генерованої електроенергії за рахунок використання акумулятора (рис. 10).

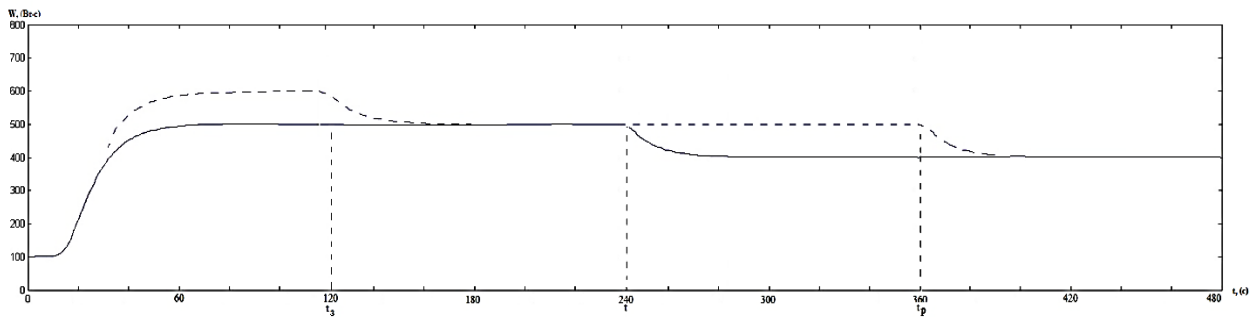


Рис. 10. Зміна рівня генерованої електроенергії

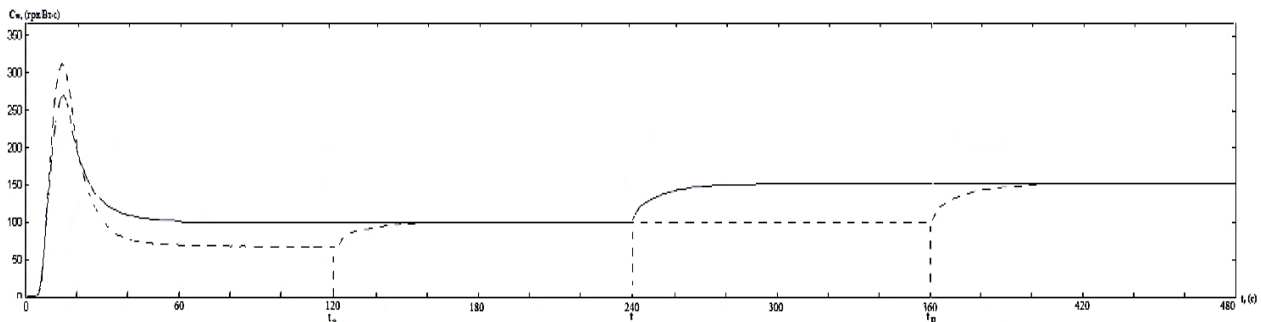


Рис. 11. Зміна вартості одиниці електроенергії

У четвертому розділі було використано алгоритм для динамічного визначення вартості одиниці електроенергії у ході розробки прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії. Прототип виконано на базі мікроконтролера Arduino Uno, який включає у собі мікропроцесор ATmega328P. Для передачі інформації про обсяг спожитої електроенергії від мікроконтролера пристрою розрахунку до мікроконтролера для прийому даних і визначення вартості електроенергії МК_Σ використано радіо-модуль NRF24L01+, запрограмований на передачу необхідних даних. Мікроконтролер МК_Σ також виконано на базі Arduino Uno із модулем NRF24L01+, налаштованим на прийом та передачу даних. Схему під'єднання пристрою розрахунку до однієї фази виділено у блоці ПР_i на рис. 12. Для функціонування пристрою розрахунку генерованої електроенергії та радіо-модуля NRF24L01+ складено код на мові C++, завантажений за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікропроцесора ATmega328P.

Схему мікроконтролера МК_Σ наведено на рис. 13.

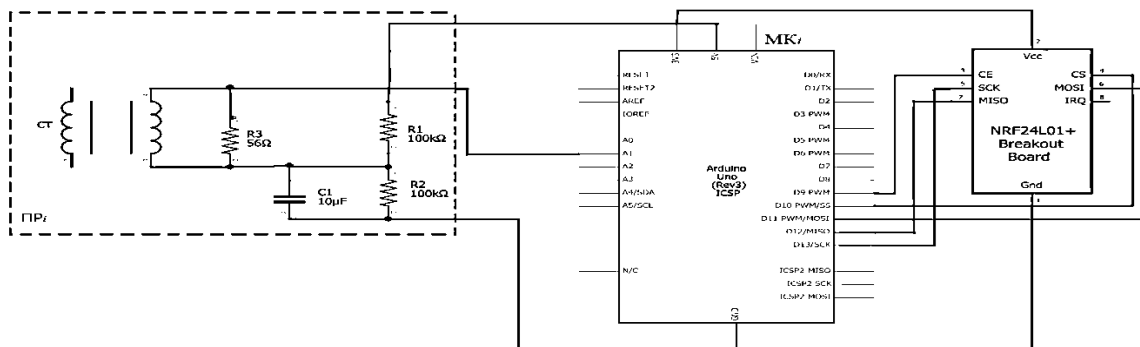


Рис. 12. Спрощена схема пристрою розрахунку з радіо-модулем

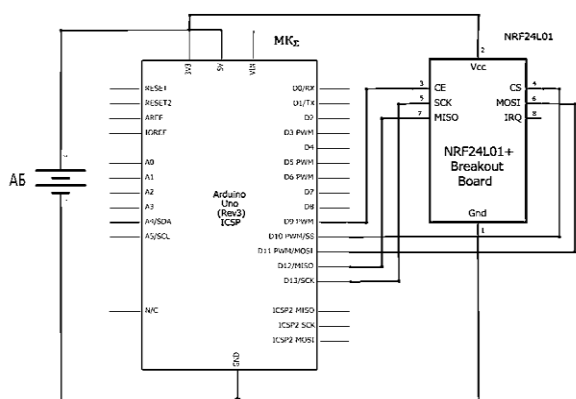


Рис. 13. Спрощена схема

мікроконтролера для прийому даних і визначення вартості електроенергії

Для побудови схеми пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії та симуляції його роботи обрано середовище TinkerCAD. Зважаючи, що

TinkerCAD не підтримує трансформатор струму, генератор сигналів був використаний для створення прикладу сигналу на вході пристрою розрахунку. Для відображення

середньоквадратичного струму на вході пристрою розрахунку та розрахованого значення обсягу електроенергії на базі середньоквадратичної потужності до кожної Arduino Uno під'єднано модель LCD дисплею роздільної здатності (16x2). Спрощену схему пристрою розрахунку з LCD дисплеєм роздільної здатності (16x2) та генератором сигналів під'єднаним до шунтуючого резистора R3 зображено на рис. 14.

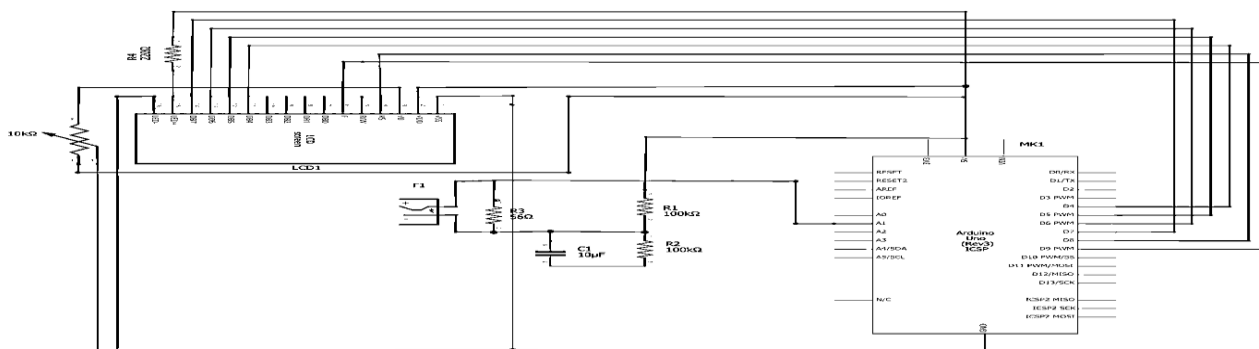


Рис. 14. Спрощена схема пристрою розрахунку електроенергії

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі результатів проведених досліджень вирішено актуальне наукове завдання розробки динамічної тарифікації спожитої

електроенергії на основі рівнянь, що описують динамічну зміну електротехнічних параметрів системи електроживлення та рівняння економічного балансу.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. На основі огляду існуючих рішень щодо тарифікації електроенергії обґрунтовано актуальність розробки моделі динамічної тарифікації для електротехнічних систем.

2. На основі рівняння економічного балансу створено математичну електро-вартісну модель електротехнічної системи, що враховує динамічну зміну рівня генерованої електроенергії, вартості одиниці електроенергії, а також вартість первинного носія електроенергії і дозволяє виконувати адекватну щосекундну або щогодинну тарифікацію.

3. Запропоновано спрощене рівняння для визначення вартості одиниці електроенергії. Наведений приклад застосування математичної моделі для визначення вартості одиниці електроенергії конкретного дизель-генератора при відхиленні режиму роботи на 5% показує, що похибка при використанні спрощеного та точного виразу становить менше 3%. Визначення динамічної вартості електроенергії продемонстровано на прикладі локального об'єкту, енергоострову.

4. Створено математичну електро-вартісну модель електротехнічної системи із дизель-генератором, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну рівня генерованої електроенергії, так і динамічну зміну вартості одиниці електроенергії, з урахуванням статичних величин цих параметрів і виконання умови економічного балансу після завершення перехідних процесів.

5. За допомогою створеної динамічної моделі виконано дослідження зміни вартості одиниці електроенергії при різній тривалості виходу генератора на заданий робочий режим. Виконано моделювання при лінійній та експоненційній функції зміни рівня генерованої електроенергії та досліджено стрибок вартості на початку перехідного процесу. Показано, що зміна вартості одиниці електроенергії на початку перехідного процесу при зміні режиму роботи генератора від холостого ходу до номінального значення змінюється у 10 та більше разів.

6. Для виконання алгоритму динамічної тарифікації запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega326p для щосекундного розрахунку вартості електроенергії, що дозволяє реалізувати на практиці запропоновані теоретичні положення розрахунку динамічної тарифікації з часом виходу генератора на режим 6...10с.

7. Запропонована схема пристрою, підсумовуючого об'єм спожитої кожним користувачем електроенергії, та схема підсумовуючого пристрою, який виконує розрахунок вартості одиниці електроенергії і дозволяє розраховувати вклад кожного генератора у сумарне значення тарифної вартості, з відповідним визначенням вартості електроенергії по кожному генератору.

8. Проведено моделювання розрахунку електроенергії для системи з двома генераторами що показало адекватну роботу пристроїв розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії відповідно теоретичним положенням.

9. Методика динамічної тарифікації впроваджена в дисципліні: “Маркетинг в енергетиці”, “Інтелектуальні електроенергетичні мережі та системи”, Освітня Програма другого (магістерського) рівня вищої освіти: “Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології” КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рибіна О. Б., Бойко І. Ю. «Оцінка стану та перспективи використання пристроїв силової електроніки в Україні». *Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* Київ, 2013. С. 153-163.

2. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. - «Застосування динамічної електро-вартісної моделі для дослідження зміни економічних та електротехнічних параметрів генеруючої системи». *Електроніка та зв'язок.* Том 21, Київ, 2016, №5 (94). С. 43-50.

3. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. «Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи». *Електроніка та зв'язок.* Том 21, Київ, 2016. № 6. С. 27-33.

4. Жуйков В. Я., Ямненко Ю. С., Бойко І. Ю., Клепач Л. Є. Статична та динамічна тарифікація електроенергії автономних Micro Grid. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки.* Житомир, 2016. № 3(78). С. 66-75.

5. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю., Застосування лінеаризованої електро-вартісної моделі для дослідження характеру перехідних процесів у ізольованій генеруючій системі. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* Київ, 2018. № 4. С. 41-49.

6. Бойко І. Ю. Актуальність застосування динамічної тарифікації для генеруючих систем Microgrid. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* Київ, 2019. № 3. С. 23-29.

7. Static and dynamic tariffing electric power autonomous of microgrid // V. Zhuikov, J. Yamnenko, T. Tereschenko, L. Klepach, I. Boiko. *Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wroclaw University of Technology*, ISSN 2084-2201, No. 7. Wroclaw, 2016. P. 29-41.

8. V. Y. Zhuikov, I. Y. Boiko, S. P. Denysiuk. «Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets». *Science and Education a New Dimension.* IX (31), Issue 250. Hungary, 2021. P. 46-49.

9. Price formation in the energy markets of Ukraine / Zhuikov, V.; Pichkalov, I.; Boyko, I.; Blinov, I. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2015 IEEE 35th International Conference.* Kyiv, 2015. P. 553-556.

10. Рибій М. В., Бойко І. Ю. Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та врахування алгоритму динамічної тарифікації. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №101337.* Київ, 2020.

АНОТАЦІЯ

Бойко І. Ю. Динамічна тарифікація у системі електроживлення. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці динамічної тарифікації на основі рівняння економічного балансу та рівнянь, що описують динамічну зміну електротехнічних параметрів системи.

Створена динамічна модель поєднує, з одного боку, енергетичні показники енергогенеруючої системи, а з іншого – економічні показники замкненої макроекономічної системи. За допомогою моделі досліджено вплив перехідних процесів генератора на зміну вартісних показників економічної системи, а також виконано прогнозування тарифної ціни для виробників та споживачів електроенергії.

За допомогою лінеаризації диференціальних рівнянь шляхом розкладання у ряд Тейлора в околі певної обраної точки була створена альтернативна динамічна електро-вартісна модель. Досліджено використання акумулятора при аварійному зменшенні рівня генерованої електроенергії.

Запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega328p для щосекундного розрахунку вартості базової частини електроенергії.

Ключові слова: Мікромережа; локальна генеруюча система; динамічна модель; рівняння Фішера; щосекундна тарифікація; пристрій розрахунку.

ABSTRACT

Boiko I. Y. Dynamic tariffing in the power supply system. - Manuscript.

Thesis for a Candidate degree in Technical Science, specialty 05.09.03 - "Electrical complexes and systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the development of the method of dynamic tariffing on the basis of the equation of economic balance and the equations describing the dynamic change of electrotechnical parameters of the system.

The created dynamic model combines, on the one hand, energy indicators of the energy generating system, and on the other - economic indicators of the closed macroeconomic system. With the help of the model the influence of generator transients on the change of cost indicators of the economic system is investigated, and also the forecast of the tariff price for producers and consumers of the electric power is executed.

Author gives a general description of autonomous generating systems, gives the types of equipment in such systems. The existing dynamic models of tariffs are considered and it is determined that for their realization it is necessary to have the

ability of flexible and dynamic response. The author noted that the formation of the tariff price should be based on dynamic models, which will include the dynamic nature of the regulation of system capacity and stimulate the relevant desired actions. It is also necessary to take into account the influence of the parameters of transients on the cost of electricity when changing the parameters of the energy generating system. The shortcomings of the existing models are outlined, namely the disregard for the dynamic change of the generated power. Given the proposed approaches to the creation and implementation of dynamic charging by foreign scientists, it is determined that the question of the relevance of developing a model of flexible dynamic pricing for electricity consumers is relevant.

The second section presents the relevance of creating flexible dynamic tariffication for local systems, which will provide an adequate tariff price for electricity. The duration of the generator transients has a direct impact on the economic parameters of the isolated system, i.e., the deviation of the real tariff price for electricity from the accepted static value set in the existing model of hourly tariffication. It was created a mathematical model that combines the electrical and economic parameters of an isolated power generation system with a diesel generator, and allows you to calculate the dynamic change in the tariff price with a dynamic change in the level of generated power, or vice versa.

The algorithm for dynamic per - second tariffing allows to control and adjust certain values in the specified network parameters. The originality of the obtained calculation expression for the dynamic per-second estimate of the cost of the base part of energy ($W \cdot \text{sec}$) with small deviations relative to the point of rest, the algorithm for calculating the cost of the base part of the energy for some energy islands was confirmed by obtaining a certificate of registration of copyright in scientific work "Application of prosumers at the local level Smart Grid and taking into account the algorithm of dynamic tariffication" in co-authorship with M. V. Rybiy № 101337 of December 21, 2020.

A study of the impact of macroeconomic parameters of the system on the change of its cost indicators and the duration of the transition process is done. By linearizing the differential equations by decomposing into a Taylor series in the vicinity of a certain selected point, an alternative dynamic electro-cost model was created. The use of the accumulator at emergency reduction of power level of the diesel generator is investigated.

The author proposes a technical implementation of a prototype of a calculation device based on the ATmega328p microprocessor for per second calculation of the cost of the basic part of electricity. The work of the prototype of a smart electricity meter is also modeled on the example of two power generators.

Keywords: Microgrid; local generating system; dynamic model; Fisher's equation; per second billing; calculation device.

Підписано до друку 15.11.2021 р.
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний. Друк різнографічний
Кількість умовних друкованих аркушів 0,9
Тираж 100 екз. Замовлення №140325
Ліцензія від 10.11.2019 2 063 000 0000 012219
Надруковано в поліграфії «КРІ print»,
За адресою м. Київ, пров. Політехнічний 1/33

