

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бойко Іван Юрійович

УДК 621.314

ДИСЕРТАЦІЯ

Динамічна тарифікація у системі електроживлення

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____Бойко І.Ю.

Науковий керівник:

Жуйков Валерій Якович, доктор технічних наук, професор.

Київ – 2021

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, 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.

У першому розділі автором наводиться загальний опис автономних генеруючих систем, типи обладнання у складі таких систем, класифікація систем електропостачання за рівнем відновлюваної енергії, схеми поєднання джерел електроенергії у єдину локальну систему на стороні постійного струму та на стороні змінного.

Розглянуто існуючі динамічні моделі тарифів та визначено, що для їх реалізації необхідно мати здатність гнучкої і динамічної відповіді. Автором зазначено, що формування тарифної ціни повинне базуватись на динамічних моделях, які включатимуть динамічний характер регулювання генерованої електроенергії системи і стимулювання відповідних бажаних дій. Також необхідним є врахування впливу параметрів перехідних процесів на вартість електроенергії у разі зміни параметрів енергогенеруючої системи. Окреслено недоліки існуючих моделей, а саме – неврахування динамічної зміни генерованої електроенергії.

З огляду запропонованих підходів до створення і впровадження динамічної тарифікації, за працями закордонних вчених визначено, що питання про актуальність розроблення моделі гнучкого динамічного ціноутворення для споживачів електроенергії є актуальним.

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 ізольованої системи, тобто на відхилення реальної тарифної ціни електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого в існуючій моделі щогодинної тарифікації. Розроблено математичну модель, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи з дизель-генератором та дозволяє розраховувати динамічну зміну тарифної ціни при динамічній зміні рівня генерованої електроенергії або навпаки.

Наведено приклад застосування математичної моделі для визначення вартості базової частини енергії конкретного дизель-генератора при відхиленні від номінального режиму на 5%. Використання динамічної оцінки вартості базової частини енергії показано на прикладі локального об'єкту, деякого енергоострову, генерація якого обмежена однією або кількома сотнями кВт. Наведено блок-схему алгоритму розрахунку вартості базової частини енергії двох генераторів, кожен з яких постачає електроенергію своєму споживачу, а також сумарної вартості базової частини енергії. Розрахунок виконується на кінці кожного інтервалу, на які поділений досліджуваний період часу. Алгоритм щосекундної динамічної тарифікації дає змогу контролювати та коригувати певні значення у заданих параметрах мережі. Оригінальність отриманого розрахункового виразу для щосекундної оцінки вартості базової частини енергії у (Вт·сек) при невеликих відхиленнях відносно точки спокою, алгоритму зміни вартості базової частини енергії та її розрахунку для системи електроживлення, що працює в режимі енергоострову, підтверджено свідоцтвом про реєстрацію авторського права на науковий твір «Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та

врахування алгоритму динамічної тарифікації» № 101337 від 21 грудня 2020 р. (у співавторстві з Рибієм М.В.).

Третій розділ дисертаційної роботи демонструє створення математичної електро-вартісної моделі ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором. За допомогою розробленої моделі перевірено виконання умови економічного балансу після завершення перехідних процесів. Досліджено перехідні процеси при лінійній та експоненційній залежності зміни рівня генерованої електроенергії від часу. Досліджено характер перехідних процесів у «малому». Проведено дослідження прискореного виходу генератора на робочий режим.

Виконано дослідження зв'язку між макроекономічними параметрами системи та її вартісними показниками і тривалістю перехідного процесу. 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.

У четвертому розділі запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega328p для щосекундного розрахунку. Також виконано моделювання роботи прототипу пристрою розрахунку на прикладі двох електротехнічних систем.

Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. № 101337 від 21 грудня 2020 р.

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

Список публікацій:

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.

1. Рибіна О. Б., Бойко І. Ю. «Оцінка стану та перспективи використання пристроїв силової електроніки в Україні» // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - Збірник наукових праць. - Київ, 2013. - С.153-163. *(Особистий внесок здобувача полягає в аналізі використання пристроїв силової електроніки в Україні)*

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, №5 (94) - Київ, 2016 - с. 43-50. *(Особистий внесок здобувача полягає в створенні математичної моделі, яка поєднує динамічні рівняння, які описують економічні та електротехнічні параметри енергогенеруючої системи)*

3. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. «Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи» // Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, № 6 - с. 27-33. *(Особистий внесок здобувача полягає в комп'ютерному моделюванні перехідних процесів у електротехнічній системі, за допомогою складеної динамічної електро-вартісної моделі)*

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, 2016, № 3(78) - с. 66-75. *(Здобувачем наведено огляд статичних та динамічних моделей розрахунку вартості електроенергії автономних систем у складі Microgrid)*

5. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю., Застосування лінеаризованої електро-вартісної моделі для дослідження характеру перехідних процесів у ізолюваній генеруючій системі // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 4. - с. 41-49. *(Особистий внесок здобувача полягає у комп'ютерному моделюванні перехідних процесів у ізолюваній електротехнічній системі із використанням лінеаризованої динамічної електро-вартісної моделі)*

6. Бойко І. Ю. Актуальність застосування динамічної тарифікації для генеруючих систем Microgrid // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019.

№ 3. - с. 23-29. *(Здобувачем наведено переваги та актуальність використання гнучкої динамічної тарифікації електроенергії у локальних генеруючих системах у складі Microgrid)*

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, 2016, p. 29-41. *(Здобувачем наведено огляд статичних та динамічних моделей розрахунку вартості електроенергії автономних систем у складі Microgrid)*

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, 2021. pp. 46-49. *(Здобувачем запропоновано модель, яка дозволяє використовувати динамічну тарифікацію при зміні режимів роботи генератора. Також запропоновано алгоритм технічної реалізації розрахунку вартості базової частини енергії при зміні її обсягу у динамічному режимі.)*

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. *(Особистий внесок здобувача полягає у аналізі тарифікації в енергосистемі України, яка використовується на сьогоднішній день)*

10. Рибій М. В., Бойко І. Ю. Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та врахування алгоритму динамічної тарифікації. Свідectvo про реєстрацію авторського права на твір №101337. Київ, 2020. *(Особистий внесок здобувача полягає у створенні алгоритму динамічної тарифікації на локальному рівні Smart Grid)*

SUMMARY

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 dissertation work 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.

In the first section author gives a general description of autonomous generating systems, gives the types of equipment in such systems. The classification of power supply systems according to the level of renewable energy is given. Schemes of connection of power supplies to the uniform local system on the part of a direct current and on the part of an alternating current are resulted.

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.

An example of application of a mathematical model for determining the cost of the base part of the energy of a particular diesel-generator with a deviation from the nominal mode by 5% is given. The use of dynamic estimation cost of the base part of the energy has been demonstrated by the example of a local facility, an energy island. The generation of which is limited to one hundred or several hundred kW. The block diagram of the algorithm for calculating the cost of the base part of the energy of two generators, each of which supplies electricity to its consumer, as well as the total cost of the base part of the energy. The calculation is performed at the end of each interval into which the study period is divided. 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.

The third section of the thesis demonstrates the creation of mathematical electro-cost model of the isolated energy generating system with a diesel-generator. With the help of the developed model the fulfillment of the condition of economic balance after the completion of transitional processes is checked. Transients at linear and exponential dependence of power change on time are investigated. The nature of transients in small

is investigated. A study of the accelerated output of the generator to the operating mode is demonstrated.

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 fourth section demonstrates the technical implementation of the created mathematical models. 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 calculation device is also modeled on the example of two power generators.

The implementation of the results of the thesis is confirmed by the copyright registration certificate for a scientific work.

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

List of main publications of the applicant:

The results of the dissertation are reflected in 11 scientific and scientific - methodical works, including 6 publications in scientific professional journals of Ukraine, 1 thesis in conference proceedings, 2 publications in professional journals of EU countries, 1 guideline for laboratory work, 1 certificate of copyright registration for a scientific work.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ІСНУЮЧІ ВИДИ ДИНАМІЧНОЇ ТАРИФІКАЦІЇ.....	19
1.1. Автономні генеруючі системи.....	19
1.2. Автономні генеруючі системи. Віртуальні електростанції.....	27
1.3. Динамічна тарифікація.....	30
1.3.1. Моделі динамічної тарифікації.....	30
1.3.2. Розумний лічильник.....	38
Висновки до першого розділу.....	39
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТАРИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ БАЛАНСУ.....	40
2.1. Створення динамічної електро-вартісної моделі ізольованої електротехнічної системи.....	40
2.2. Побудова математичної моделі визначення вартості електроенергії системи з дизель-генератором.....	42
2.3. Система динамічної тарифікації у електротехнічній системі енергоострову....	49
Висновки до другого розділу.....	54
РОЗДІЛ 3. ТАРИФІКАЦІЯ В ІЗОЛЬОВАНІЙ СИСТЕМІ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ЧАСТИНИ.....	55
3.1. Динамічна електро-вартісна модель системи із автономним дизель-генератором.....	55
3.2. Перехідні процеси при зміні рівня генерованої електроенергії.....	60
3.3. Зв'язок макроекономічних параметрів системи з її електротехнічними параметрами.....	64
3.4. Перехідні процеси у малому.....	69
3.5. Зв'язок економічних параметрів з тривалістю перехідного процесу.....	75
3.6. Перехідні процеси зміни вартості при зміні рівня генерованої електроенергії.....	77

3.7. Зв'язок між рівнем генерованої електроенергії і зміною вартості одиниці електроенергії.....	89
3.8. Врахування акумулятора у вартісній моделі	96
Висновки до третього розділу.....	100
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТАРИФІКАЦІЇ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	101
4.1. Модель розрахунку електроенергії для системи з двома генераторами.....	101
4.2. Модель роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії.....	105
Висновки до четвертого розділу.....	109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	110
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	112
Додаток А.1. Програмний код для функціонування пристрою розрахунку обсягу електроенергії першого генератора та радіо модуля.....	121
Додаток А.2. Програмний код для функціонування пристрою розрахунку обсягу електроенергії другого генератора та радіо модуля	123
Додаток Б. Програмний код мікроконтролера для прийому даних про спожиту електроенергію, розрахунку і передачі даних для визначення вартості одиниці електроенергії генераторів.....	125
Додаток В. Програмний код мікроконтролера розрахунку вартості одиниці електроенергії для генераторів та сумарної вартості електроенергії, що генерується щосекундно.....	129
Додаток Г. Програмний код для мікроконтролера пристрою розрахунку з LCD-дисплеєм	131
Додаток І. Програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії.....	132
Додаток Д. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.....	134
Додаток Е. Список публікацій.....	135

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ББЖ	–	блок безперебійного живлення
ВАГЕС	–	вітротурбінна акумулююча електростанція
ВДЕ	–	відновлювані джерела енергії
ВЕС	–	вітрова електрогенеруюча система
ВрЕС	–	віртуальна електростанція
Вт	–	ват
ГАЕС	–	гідроакумулююча електростанція
ДГ	–	дизель-генератор
ДЕС	–	дизель-електростанція
ДГУ	–	дизель-генераторна установка
кВт	–	кіловат
Л (ІР)	–	лічильник (пристрій розрахунку)
МК	–	мікроконтролер
ОЕС	–	об'єднана електроенергетична система
РДЕ	–	розосереджені джерела енергії
СЕС	–	сонячні електростанції
АС	–	Alternating Current
СТ	–	Current Transformer
DC	–	Direct Current
DCC	–	Distribution Capacity Contract
DDG	–	Decentralized Distribution Generation
DEM	–	Distributed Energy Management
DER	–	Distributed Energy Resources
DG	–	Distributed Generation
MPPT	–	Maximum Power Point Tracking
PDG	–	Powerhouse Distributed Generation
PV	–	Photovoltaic
PWM	–	Pulse-Width Modulation

ВСТУП

Обґрунтування теми дослідження.

Електроенергетика України є технологічно складною, територіально розгалуженою системою, яка поєднує електрогенеруючі станції, об'єднану електроенергетичну систему (ОЕС) та розподільні електричні мережі країни. Енергетичну незалежність завжди пов'язують з національною безпекою держави [1, 2]. Стратегічною метою розвитку електроенергетичного комплексу є його докорінна перебудова на засадах новітніх технологій із забезпеченням маневреності та динамічної тарифікації [3].

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 усталених 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, A.K. 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 та інші.

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, актуальне завдання полягає у розробці динамічної тарифікації на основі побудови моделі, що містить рівняння економічного балансу та рівняння перехідних процесів електротехнічної системи [4].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, 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 і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробці динамічної тарифікації на основі рівнянь, що описують динамічну зміну електротехнічних параметрів системи електроживлення та рівняння економічного балансу. 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:

1. Обґрунтування розробки моделі динамічної тарифікації на основі огляду рішень, які існують у світі.

2. Розробка динамічної 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.

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

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

Об'єктом дослідження є перехідні та усталені процеси в автономній системі електроживлення.

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

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

Наукова новизна отриманих 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 отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено алгоритм розрахунку вартості одиниці електроенергії двох генераторів, 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 дисципліни: “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 [13] написана автором самостійно. У роботах, опублікованих автором у співавторстві, особисто здобувачеві належить: в [5] – наведено аналіз використання пристроїв силової

електроніки в Україні; в [6] – створено алгоритм розрахунку за темою дисертації; в [7] – виконано аналіз тарифікації в енергосистемі України, що використовується на сьогоднішній день; в [8] – створено математичну модель, яка поєднує динамічні рівняння, які описують економічні та електротехнічні параметри енергогенеруючої системи; в [9] – комп’ютерне моделювання перехідних процесів у електротехнічній системі, за допомогою складеної динамічної електро-вартісної моделі; в [10] – в огляді статичних та динамічних моделей розрахунку вартості електроенергії автономних систем у складі Microgrid; в [11] – в огляді статичної та динамічної тарифікації електроенергії автономних систем у складі Microgrid; в [12] – у комп’ютерному моделюванні перехідних процесів у ізольованій електротехнічній системі з використанням створеної лінеаризованої динамічної електро-вартісної моделі; в [14] – створено алгоритм динамічної тарифікації на локальному рівні Smart Grid; в [15] – запропоновано алгоритм технічної реалізації розрахунку вартості базової частини енергії при зміні її обсягу у динамічному режимі, на основі якого може бути виконана оцінка вартості у динамічному режимі для Microgrid різного функціонального призначення.

Апробація роботи. 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 НТУУ «Київський політехнічний інститут» 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 обсяг 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.

РОЗДІЛ 1

ІСНУЮЧІ ВИДИ ДИНАМІЧНОЇ ТАРИФІКАЦІЇ

1.1. Автономні генеруючі системи

Автономні енергоустановки потужністю від декількох сотень Вт до декількох сотень кВт, працюючи у складі електротехнічного комплексу широко використовуються в різних секторах економіки та географічних регіонах України [16]. Останнім часом все більш широке застосування знаходять комбіновані дизель-вітрові або дизель-фотоелектричні автономні енергоустановки, використання в яких відновлюваних джерел дозволяє економити органічне паливо [17]. У загальному випадку система автономного електропостачання об'єкту містить наступне обладнання:

- енергогенеруючі машини – вітроелектричні системи, сонячні батареї, дизельні генератори, бензинові агрегати, що використовують для вироблення електроенергії різні джерела (енергію вітру або сонця, дизельне паливо, бензин);
- випрямно-зарядні пристрої, що перетворюють вироблену енергогенеруючими установками енергію в електроенергію з параметрами, необхідними для зарядження батареї акумуляторів та живлення інвертора;
- батареї акумуляторів, призначені для акумулювання електроенергії та живлення інвертора;
- запобіжно-розподільні пристрої, що розподіляють електроенергію від випрямного і зарядного пристроїв і від батареї акумуляторів, а також здійснюють захист цих пристроїв від позаштатних режимів роботи;
- інвертори DC / AC, що перетворюють постійний струм від випрямно-зарядного пристрою або від батареї акумуляторів у електроенергію зі стандартними параметрами для електропостачання споживачів;
- комутуючі пристрої, що здійснюють електропостачання споживачів від одного з джерел: інвертора DC / AC, дизельної або бензинової установки або одночасно від декількох джерел з їх синхронізацією.

У разі застосування генеруючих джерел електроенергії різних типів розрізняють гібридні або інтегровані системи електропостачання. У гібридних системах в одній локальній мережі поєднані дизель-електричні установки, що працюють на органічному паливі, і вітрові або сонячні електричні установки, що використовують відновлювану енергію вітру і сонця. Розроблена класифікація вітро-дизельних систем електропостачання за рівнем відновлюваної енергії, що визначається як відношення виробленої вітроустановками енергії до її загальної кількості, що споживається об'єктом [18]:

1) Системи з низьким рівнем відновлюваної енергії ($< 20\%$). У таких системах рівень енергії, що генерується вітроустановкою, незначний і немає необхідності в спеціальному регулюванні та керуванні роботою системи. Оскільки дизель-генератори враховують короточасні коливання у споживанні енергії, додаткова вітрова енергія для них є просто негативним навантаженням. Тому дизель-генератори при коливаннях величини вітрової енергії забезпечать нормальне функціонування системи за допомогою свого автоматизованого керування.

Прикладом такої системи електропостачання є система станції Neumaier, в якій вітроустановка H-Rotor 20/56 генерує до 5% споживаної енергії;

2) Системи середнього рівня відновлюваної енергії ($< 50\%$). У таких системах дизель-генератори використовують для підтримки мінімального навантаження системи. При виробленні вітроустановками значної кількості енергії дизельний генератор знижує навантаження. Для регулювання напруги в системі та підтримки необхідного балансу електроенергії потрібні додаткові засоби регулювання і пристрої, що забезпечують стійку роботу системи (регулювання генерованої електроенергії вітроустановок, застосування баластного навантаження, застосування батарей компенсуючих конденсаторів тощо). У порівнянні з попереднім класом, системи середнього рівня більш складні та дорогі. Однак збільшення їх вартості необхідно співвідносити зі зменшенням споживання дизельного палива і часом роботи дизель-генератора. Система середнього рівня, що включає вітростанцію з восьми вітроустановок, функціонує на чеській полярній станції Gregor Mendel;

3) Системи з високим рівнем відновлюваної енергії (> 50%) можуть виробляти вітрової енергії більше, ніж потрібно для електропостачання об'єкта. При цьому обов'язковою умовою є наявність у системі додаткового обладнання, що забезпечує стабільність і якість електроенергії в періоди, коли дизельні генератори, що регулюють ці параметри, відключені. Тоді надлишки енергії вітроустановок повинні спрямовуватися на керовані вторинні навантаження (батареї конденсаторів або батареї акумуляторів, розподілені навантаження, силові перетворювачі енергії). Для створення запасу енергії, що забезпечує якість і стабільність електропостачання, застосовують накопичення і зберігання енергії в батареї акумуляторів або в інерційному маховику. Такі системи вимагають складної технології і досконалих засобів регулювання, що збільшує їх вартість. Однак при цьому значно знижуються споживання органічного палива, час роботи і кількість запусків дизельних установок. У роботі [19] наводиться приклад станції Mawson, де з 2003 року експлуатується система електропостачання високого рівня, що включає дві вітроустановки загальною потужністю 600 кВт і дизельний генератор потужністю 480 кВт.

В інтегрованих системах однієї локальної мережі можуть спільно працювати лише джерела відновлюваної енергії, наприклад, вітрові та сонячні електричні установки. Режими роботи системи, умови включення режимів, значення керуючих уставок різних параметрів, порядок вмикання і вимикання обладнання системи, аварійні ситуації визначаються алгоритмом керування системою електропостачання. Існує декілька різновидів з'єднання джерел електроенергії у єдину гібридну систему [20]. Наприклад, з'єднання елементів системи електроживлення на стороні постійного струму – найбільш поширений і відомий спосіб. Загальну схему наведено на рис. 1.1, а.

У наведеній схемі електроживлення сонячні батареї через контролер заряду PWM (Pulse-Width Modulation, широтно-імпульсна модуляція) або MPPT (Maximum Power Point Tracking, відстежування точки відбору максимальної потужності) заряджають акумуляторні батареї. Далі постійний струм від сонячних батарей і акумуляторів перетворюється у інверторі в змінний з напругою 220В/

380В, яким живиться навантаження.

До недоліків наведеної системи можна віднести:

– кілька ступенів перетворення сонячної енергії (контролер, інвертор) на стороні низької напруги постійного струму.

– необхідність досить складної організації системи, якщо потрібно надати пріоритет для сонячних батарей щодо мережі централізованого електропостачання.

А такий пріоритет дуже бажаний, оскільки без цього дорогі сонячні батареї будуть працювати вхолосту за наявності напруги у мережі. Для того, щоб в першу чергу використовувати енергію від сонячних батарей, необхідно встановити в систему ББЖ (блок безперебійного живлення), який може відключатися від входу змінного струму (мережі) при напрузі на акумуляторах вище заданого значення.

Наступним різновидом спільної роботи джерел електроенергії є їх з'єднання на стороні змінного струму, схема якого наведена на рис. 1.1,б.

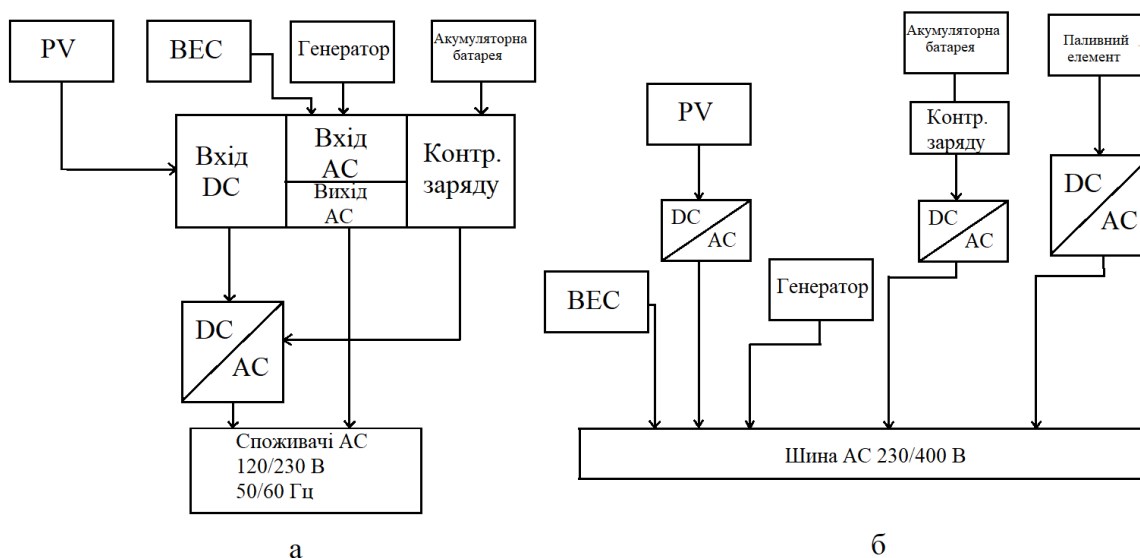


Рис. 1.1. Схема з'єднання елементів системи на стороні постійного струму та змінного струму.

З'єднання елементів системи на стороні змінного струму характеризується найбільшою гнучкістю і можливістю зміни і нарощування системи в подальшому.

Таким чином, не зважаючи на структуру автономних генеруючих систем, усі вони як правило у більшості випадків містять у своєму складі фотоелектричні

елементи, акумуляторні батареї, контролери заряду, інвертори, вітрові електрогенеруючі системи, паливні елементи, що призводить до змін тарифів на електроенергію в процесі їх експлуатації.

Загальновідомо, що комбінація двох або більше різних типів джерел електроенергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з точки зору ціни, ефективності й надійності [21, 22, 24, 25]. 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 [21, 23, 25]. Згідно принципів Microgrid існує можливість поєднувати наведені вище системи у єдиний електротехнічний комплекс.

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 [25]. Такі локальні системи енергозабезпечення також повинні мати можливість реалізації технології Plug & Play, відповідно до якої, пристрої (РДЕ, система зберігання енергії або кероване навантаження), можуть бути додані до існуючої системи Microgrid, не вимагаючи її ре конфігурації при виконанні своєї визначеної функції. Можна виділити наступні особливості гібридних систем Microgrid, які роблять їх високоефективними і конкурентоспроможними [21, 24, 25]:

- 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 відновлюваних джерел енергії (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 [24 – 27]. У таких гібридних системах в одній локальній мережі об'єднані дизель-генераторні установки (ДГУ), що працюють на органічному паливі, вітрові електростанції (ВЕС) та сонячні електростанції (СЕС). Структурна схема типової гібридної Microgrid на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та дизель-генератора (ДГ) наведено на рис. 1 [25 – 27].

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 (PV) відрізняється від величини напруги з іншого джерела, скажемо, біопалива, що викликає локальний потік циркулюючої потужності.

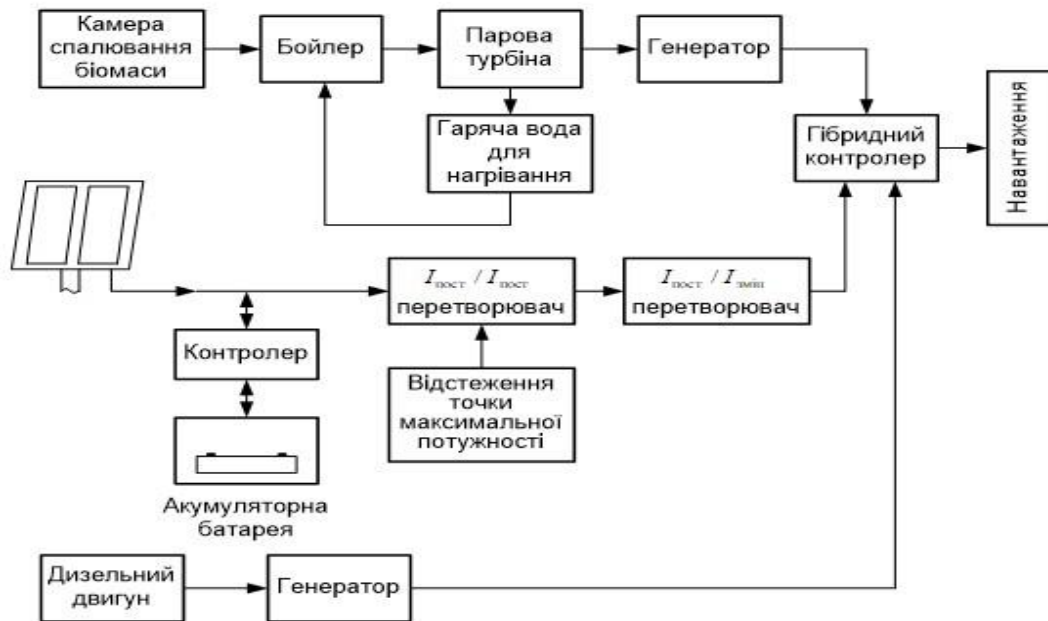


Рис.1.2. Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ

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 РДЕ, 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 [21, 23, 25, 26].

До основних переваг ДГ 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 [26 –

28]. В автономних системах енергозабезпечення, що працюють незалежно від мережі централізованого електропостачання, досить часто використовуються два і більше дизель-генератора. Крім підвищення надійності системи електропостачання, багатоагрегатна 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 дизель-електростанцію (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 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.

1.2. Автономні енергогенеруючі системи. Віртуальні електростанції.

Автономні енергогенеруючі системи можуть забезпечувати необхідні параметри електричної енергії, виконання функцій керування і мінімізації витрати енергетичних ресурсів, що може бути ефективно враховано при створенні гнучкої динамічної тарифікації електроенергії для таких систем.

Досить часто автономні енергогенеруючі системи є занадто малими для конкурентної участі у енергетичному ринку, тому для реалізації умов конкуренції створено концепцію віртуальних електростанцій (VpES).

Проникнення розосереджених енергетичних ресурсів у вигляді автономних енергогенеруючих систем швидко зростає в усьому світі, що в основному пов'язано, перш за все, з тенденцією сталої енергетичної системи до зменшення екологічних проблем, більш диверсифікованих енергетичних ресурсів та підвищення енергоефективності [29]. Тим часом, розосереджена генерація активізує другу тенденцію, яка полягає у розвитку процесу лібералізації ринку електроенергії, тобто переходу від монопольної системи до конкурентних ринкових структур [30]. У контексті цих двох тенденцій, робота великої кількості автономних енергогенеруючих систем у ринкових умовах є неминучою, що наразі створює нові завдання, які повинні бути вирішені, а саме:

Забезпечення участі у ринку малих джерел живлення. Існуючі модульні джерела живлення, технології накопичення електроенергії і керовані навантаження [31] розосереджених генераторів, як правило, заборонені для включення в поточний ринок електроенергії [32]. Об'єднання малих джерел живлення у віртуальні електростанції вирішує питання їх участі у ринку.

Переривчастий характер надання електроенергії в загальну електроенергетичну систему. Оскільки багато технологій розподіленої генерації, таких як сонячні батареї і вітроустановки залежать від погоди, їх вихідні коливання вважаються не під'єднуваними, це не лише обмежує їх внесок у роботу загальної системи, але також викликає економічні санкції, пов'язані з появою дисбалансів. Віртуальні електростанції також вирішують цю проблему.

Автономність, яка обумовлена формою власності. Багато локальних генеруючих систем працюють ізольовано через їх різні форми власності. Часто бракує співпраці та комунікації між сусідніми блоками розосередженої генерації; таким чином, можливість локальних систем обмежена задоволенням місцевих потреб, а не всієї мережі. Це питання також вирішується за допомогою віртуальної електростанції.

Таким чином, одним зі способів вирішення означених вище проблем є агрегування низки автономних енергогенеруючих систем у віртуальні електростанції. У цьому об'єднанні, група розосереджених генераторів матиме таку саму спостережність, керованість і функціональність на ринку як звичайні електростанції [33].

В залежності від призначення та умов функціонування ВрЕС може характеризуватися різними визначеннями. У концепції проекту «FENIX» ВрЕС визначається таким чином: «Віртуальна електростанція – це агрегатний потенціал багатьох різних локальних систем, який створює єдиний операційний профіль з поєднання параметрів, що характеризують кожен розосереджений генератор і може включати в себе вплив мережі на сукупний обсяг виробництва електроенергії. ВрЕС є гнучким представленням сукупності локальних генеруючих систем, які можуть пропонувати свої послуги системному оператору» [34].

Отже, можна стверджувати, що віртуальна електростанція – це кластер розосереджених генераторних агрегатів, керованих навантажень і систем акумулювання, що працює в якості єдиної електростанції. Генератори можуть використовувати як викопні, так і відновлювані джерела енергії. Серцем ВрЕС є система керування електроенергією, що керує потоками енергії від генераторів, керованих навантажень і акумуляторів.

Ідеальна віртуальна електростанція використовує такі технології як: технології генерації, зберігання енергії, інформаційно-комунікаційні технології.

1. *Технології генерації* та види енергогенеруючих систем, що розраховані для інтеграції у ВрЕС [35]:

– ТЕЦ (теплоелектроцентралі);

- генератори на основі біомаси та біогазу;
- малі електростанції (газові турбіни, дизелі, і т.д.);
- малі ГЕС;
- вітрогенератори;
- сонячні батареї

З цього погляду всі автономні енергогенеруючі системи можуть бути поділені на два класи [36]:

Перший. Побутовий розосереджений генератор DDG (Decentralized Distributed Generation) – це невеликий пристрій, який служить індивідуальному споживачу для житлових, комерційних або промислових потреб. Вироблена надлишкова потужність може бути введена в мережу власником DDG, а її дефіцит може бути компенсований мережею. Метою власників DDG є забезпечення економічних, електричних і, ймовірно, потреб опалення, а також для сприяння надійності послуг. Зазначимо, що у більшості випадків власники не інформовані про правила енергетичного бізнесу.

Другий. Відкритий розподілений генератор PDG, (Powerhouse Distributed Generation) – це пристрій, який не належить індивідуальному споживачу, і його основною метою є введення виробленої електроенергії в мережу. Взагалі, як DDG так і PDG можуть бути оснащені накопичувачем енергії. DDG називається генератором з навантаженням і, ймовірно, зберіганням енергії, який може бути приєднаний лише до розподільної мережі з низькою напругою. З іншого боку, PDG називають генератором, здатним до зберігання енергії, який може бути підключений лише до розподільної мережі із середньою напругою. Метою власників PDG є продаж своєї енергетичної продукції до мережі клієнтів.

Взагалі, потужності генерації DDG малі в порівнянні з PDG. Таким чином, DDG ніколи не будуть в змозі брати участь у ринку електроенергії незалежно, в якості окремого учасника, але PDG може використати свій шанс на ринку електроенергії.

2. *Технології зберігання енергії.* На сьогодні системи зберігання енергії можна розглядати як нову адаптацію варіації попиту на існуючому рівні виробництва

електроенергії. У контексті використання відновлюваних джерел, можуть бути використані, наприклад: гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) [37], вітротурбінні автономні гідроакумулюючі електростанції (ВАГЕС) [38], накопичувачі сонячної енергії [39]. У якості традиційних систем зберігання зазвичай використовуються: хімічні акумулятори [40], напівпровідникові магнітні акумулятори [41].

3. *Інформаційно-комунікаційні технології.* Важливими вимогами до ВЕС є комунікаційні технології та інфраструктура. У різних комунікаціях для зв'язку в системах управління енергією можуть бути розглянуті медіа-технології, диспетчерське управління та збір даних і розподілений диспетчерський центр DCC (Distribution Capacity Contract) [42].

Завдяки концепції ВрЕС окремі автономні енергогенеруючі мережі можуть отримати доступ і видимість у енергетичних ринках, та максимально використовувати вигоду від ринкової інформації ВрЕС для оптимізації своєї позиції і можливості отримання прибутку. Системні операції можуть отримати вигоду з оптимального використання всіх наявних можливостей і підвищення ефективності роботи. З огляду на велику кількість різних систем генерації та накопичення електроенергії необхідні розробки і впровадження динамічної тарифікації.

1.3. Динамічна тарифікація

Для автономних енергогенеруючих систем, таких як комбіновані системи на базі відновлювальних джерел енергії у поєднанні із дизельними генераторами, які об'єднуються у віртуальні електростанції задля участі у загальному енергоринку, прийнята наразі концепція тарифікації є такою, що не відображає дійсну вартість електроенергії [43]. Тому актуальним завданням є створення гнучкої динамічної тарифікації для автономних енергогенеруючих систем.

1.3.1. Моделі динамічної тарифікації

Вперше динамічні моделі тарифів були представлені у загальному теоретичному вигляді як спот – ціни [44], які враховують питання зворотного зв'язку із промисловими споживачами і вплив впровадження динамічних тарифів

на динаміку зміни корисного навантаження. Для впровадження динамічної тарифікації споживачам необхідно мати здатність гнучкої та динамічної відповіді, яка визначається на основі постійного контролю впливу зворотного зв'язку між постачальником та споживачами електроенергії на зміну значень параметрів навантаження. Хоча наразі обладнання для цього легко доступне, теоретичні моделі і програмне забезпечення досі відсутні. В результаті досліджень [44, 45] були розроблені інтегровані моделі реагування споживачів та теорія прогнозування тарифної ціни в динамічних умовах, що створюються за допомогою динамічного ціноутворення на електроенергію. Інтегровані моделі включені до структури орієнтованих інженерних моделей, які забезпечують реалізацію ціноутворення в режимі реального часу [45]. Потенціали і обмеження для більш широкого застосування динамічних тарифів можуть бути оцінені за допомогою інтегрованих моделей. Вони також демонструють необхідність створення складних алгоритмів реагування з метою отримання максимального прибутку. Незважаючи на безсумнівну корисність наведених моделей, яка проілюстрована на прикладі промислових підприємств, вони не враховують час старту і зупинки енергогенератора, що призводить до виникнення похибок при зміні рівня генерації.

Добре відомо [46], що з огляду на мережу, реальні потоки енергії якої обмежені, резерви додаткової генерації повинні просторово розташовуватися таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень енергії у екстремальних режимах. У роботі [47] представлено алгоритм планування обмежень, що накладаються із міркувань безпеки мережі, які включають в себе один базовий випадок неушкодженої системи і перелік можливих екстремальних обставин (лінійне перевищення, втрата блоку, зростання навантаження) системи. Дотримуючись процедури мінімізації витрат, потужність і резерви виділяються просторово для комбінованих енергетичних і резервних ринків. Із застосуванням множників Лагранжа, отриманий алгоритм планування демонструє тіньові локальні ціни для резервів енергії. На відміну від інших методів, де ціноутворення зазвичай тимчасове і засноване на інженерних рішеннях і досвіді, запропонований метод краще працюватиме в реструктурованих ринках, коли ринкова потужність є

потенційною проблемою. Згаданий метод оптимального перетоку потужності може бути застосований для тарифікації у режимі реального часу.

У роботі [48] наведена математична модель планування системи розподілу, що включає в себе три варіанти планування розширення системи. Запропоновані варіанти відповідають вимогам зростання навантаження за «розумною ціною», а також системним проблемам якості електроенергії. Представлена у роботі [49] схема тарифікації електротехнічної системи у реальному часі базується на актуальних станах системи, що прогнозовані у щогодинних сценаріях, та розрахованих тарифних цінах для цих станів. Даний підхід не враховує короткотривалі перехідні процеси при зміні режиму роботи електротехнічної системи. Також недоліком наведених моделей є їх лінійність, що відзначається авторами [45].

Підхід до реалізації гнучкого формування тарифної ціни, який враховує роботу автономної енергогенеруючої системи у складі Microgrid (групи взаємопов'язаних навантажень та розподілених енергетичних ресурсів з чітко окресленими електричними межами, які по відношенню до мережі виступають як один контрольований об'єкт [50]), представлено як стратегію централізованого керування за допомогою ціноутворення в реальному часі [51]. Інший підхід до створення тарифікації у реальному часі полягає у визначенні механізму ціноутворення на загальному рівні енергосистеми, аби спростити підтримку і вимоги до об'єднаної групи різних видів розосередженої генерації і об'єднаної групи різних видів споживачів відповідно [52]. Формування тарифної ціни повинне базуватись на динамічних моделях, які включатимуть динамічний характер регулювання потужності системи і стимулювання відповідних бажаних дій. Підхід базується на лінійній квадратичній регуляції, що використовується для моделювання фізичних процесів енергогенеруючої системи, лінеаризованих у околі робочої точки. Такий підхід має ряд обмежень, серед яких можна відмітити наявність мертвих зон і жорстких заборон, наприклад, лінійного наближення фізичних характеристик, а також наявність екстремальних обставин, що є джерелом помилок.

Для подальшого розвитку моделей [44 – 49, 51, 52] необхідно враховувати нелінійність і дискретний характер електротехнічних процесів генераторів.

Дослідження щодо створення і впровадження динамічної тарифікації останнім часом інтенсифікувалися.

Наприклад, у [53] представлені загальні теоретичні моделі динамічних тарифів. Для розробки і дослідження застосування алгоритмів динамічної тарифікації виникає необхідність у відповідному програмному забезпеченні. У роботі [54] представлено програмний інструмент, PSS™ LMP1 (Power System Simulator), що використовується для імітації умов експлуатації енергоринку, інтегрований з інструментом планування передачі електроенергії Siemens PTI, що дозволяє виконувати повне моделювання мережі. За допомогою PSS™ LMP1 аналізується вплив умов мережі і визначається встановлення граничних цін у кожному вузлі. Основною функцією PSS™ LMP1 є 24-годинне моделювання граничних цін, заснованих на аналізі ринку електроенергії та прогнозуванні цін на енергоносії. Результати моделювання отримуються у вигляді таблиць, що відображаються на діаграмі мережі, або у вигляді часових графіків. PSS™ LMP1 використовує доповнений метод Лагранжевих релаксацій для розв'язання задачі оптимізації, яку можна розділити на два етапи: а) вибір складу генеруючого обладнання, з урахуванням системних обмежень та б) розподіл навантаження з урахуванням обмежень по надійності. Загалом, програмний продукт дозволяє проводити симуляцію роботи енергогенеруючої системи у складі енергоринку та отримати часові діаграми пікових цін на інтервалах часу від однієї до 24-х годин, а також графіки навантаження на інтервалі декількох тижнів.

У роботі [45] представлено спосіб прогнозування спотових цін на біржі електроенергії. Описана практика обміну електроенергією у енергосистемі Фінляндії, наведено короткий огляд різних контрактів або вироблених електропродуктів, доступних на ринку спотових цін. Представлена структура моделі прогнозування на основі аналізу періодів часу, а її надійність перевіряється з використанням реальних даних, отриманих з реєстру фінського ринку електроенергії. Модель прогнозування спотової ціни є частиною більш великої

комп'ютерної системи для керування розосередженим енергоспоживанням (DEM, Distributed Energy Management) на нерегульованому ринку електроенергії. Відмічено питання необхідності короткочасного прогнозування ціни, аби учасники ринку мали можливість оптимізувати свої дії, щоб досягти балансу електроенергії. Запропонований метод прогнозування базується на спільному використанні серій модульованих інтервалів часу і регресійного аналізу та дозволяє здійснювати щогодинне прогнозування тарифної ціни.

У новому нерегульованому енергетичному ринку, із урахуванням стимулів, що надходять від технічних і економічних областей, доцільно розглянути розосереджену генерацію (DG, Distributed Generation) в якості життєздатного варіанта вирішення проблем перебоїв електричного живлення. У роботі [55] наведено коливання навантаження і ринкової ціни на електроенергію в залежності від часового періоду, а також вплив розміщення розосередженої генерації на покращення параметрів системи. Для вирішення запропонованої математичної моделі використано пакет програмного забезпечення, розроблений на основі взаємодії MATLAB і GAMS.

Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаний електроенергетичній системі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції [56]. Рішення полягає в тому, щоб розширити традиційну статичну стратегію ціноутворення за допомогою щогодинної тарифікації, де пікові ціни визначені, аби впливати на поведінку споживачів щодо використання електроенергії. Однак заснована на часі стратегія тарифного ціноутворення не є справді динамічною, і енергоресурси не можуть бути оптимально використані у режимі реального часу.

У роботі [57] розглянуто маркетингові стратегії деяких відновлюваних DER (Distributed Energy Resource, розосереджені енергоресурси) – головним чином сонячної батареї (Photovoltaic, PV) і вітрогенератора. Участь цих двох відновлюваних DER разом з мікротурбіною, дизель-генератором, паливними елементами і т.ін. створюють ринковий комплекс.

Відхід від тарифікації на добу наперед може мати певні переваги. У роботі [58] наведене моделювання системи, що може отримувати нове значення тарифної вартості, відмінне від прогнозованого на добу вперед. Описана мінімізація вартості електроенергії для споживача, забезпеченого сонячною батареєю, що пов'язана із Microgrid. Призначена для користувача оптимізація досягнута за допомогою належного використання акумулюючої системи батарей. Розроблено цінове керування для скорочення витрат споживача. У ціновому керуванні точка відбору потужності батарей визначається на основі тарифної ціни так, щоб отримати найнижчу ціну для споживача. Після впровадження запропонованого алгоритму на моделі системі в PSCAD отримано адаптивне цінове керування, яке може оперувати змінами тарифної ціни. У моделюванні спочатку передбачалося, що тарифні ціни є постійними величинами, які формуються протягом кожного дня, алгоритм працює на основі фіксованих даних про ціни на електроенергію. Але, фактично, іноді Microgrid може змінити вартість електроенергії через високі вимоги в певний період. Таким чином, система з інтелектуальними пристроями для повідомлення може отримати сигнал нової тарифної ціни. Отже, актуальним завданням є знаходження рішення, яке в результаті може скоротити загальну вартість електроенергії для споживача.

У роботі [59] представлено стратегію централізованого керування енергогенеруючою системою у складі Microgrid, за допомогою ціноутворення в реальному часі. Запропонований підхід визначає графік ціноутворення у Microgrid на добу наперед, з метою максимізації прибутку. Щоб досягти даної мети, навантаження умовно вважається гнучким і здатним миттєво змінюватися. Отримані результати операційних витрат Microgrid і прибутку були зрівняні до і після використання наведеної стратегії керування. Для подальшого розвитку моделі необхідно врахувати нелінійність базових параметрів, таких як енергія вітру і сонячна. Крім того, необхідно враховувати динамічну зміну навантаження і відповідні перехідні процеси.

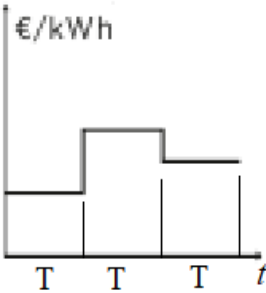
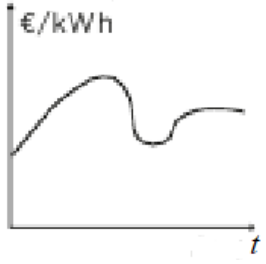
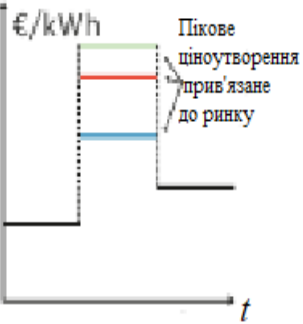
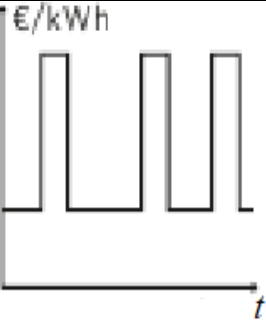
Програми, що базуються на поінтервальному розрахунку ціни на електроенергію, потребують вдосконаленої інфраструктури вимірювання

(застосування Smart-лічильників, як зазначається у [60]). У таблиці 1.1 представлено огляд варіантів ціноутворення на основі реагування на попит [61].

У роботі [62] вивчається проблема динамічного визначення вартості електроенергії для системи інтелектуальної мережі, де постачальник послуг може адаптивно визначати ціну на електроенергію відповідно до рівня навантаження споживачів та оптової ціни. Розроблено алгоритм динамічного ціноутворення на основі навчання, який забезпечує ефективне динамічне ціноутворення, не вимагаючи апріорі досконалої інформації про динаміку системи. Для вирішення існуючих недоліків звичайного алгоритму навчання можуть бути запропоновані два вдосконалення: визначення приблизного стану на основі споживання енергії та прийняття оновлення віртуального досвіду в звичайному алгоритмі Q-навчання. Чисельні результати демонструють, що підсилення динамічного ціноутворення на основі навчання досягає більш високих довгострокових показників порівняно з підходом до короткотермінової оптимізації, особливо в системі, де споживачі мають високий рівень відставання попиту. Результати також демонструють, що запропонований алгоритм покращує швидкість навчання завдяки альтернативному визначенню стану та віртуальному досвіду. Це означає, що даний алгоритм динамічного ціноутворення може бути застосований до практичної інтелектуальної мережі.

Оскільки запропонований метод динамічного визначення вартості, як і перелічені вище методи і алгоритми, розроблений без урахування динамічної зміни параметрів енергогенеруючої системи, необхідним завданням є створення динамічної тарифікації електроенергії, яка враховуватиме перехідні процеси при зміні параметрів енергогенеруючої системи.

Таблиця 1.1. Види тарифікації

Тип тарифу	Характер ціноутворення	Характер зміни вартості	Особливості
Статичне ціноутворення на базі часу використання	Статичне		Використовується протягом великих часових інтервалів T , на яких вартість електроенергії незмінна.
Ціноутворення у реальному часі	Динамічне		Вартість електроенергії визначається в реальному часі, наприклад, щогодинно.
Ціноутворення за змінними піками	Комбінація статичного та динамічного		Періоди ціноутворення визначаються заздалегідь, але вартість, встановлена на піковий період, залежить від ринкових умов.
Ціноутворення на базі критичних піків споживання	Комбінація статичного та динамічного		Вартість електроенергії значно зростає протягом декількох днів за рік. Як правило, в часи пікового навантаження вартість є найвищою.

1.3.2. Розумний лічильник

Розумний лічильник, smart energy meter (SEM) - це електричний пристрій, що має мікросхему лічильника для вимірювання спожитої електроенергії та бездротовий протокол для передачі даних. У цьому лічильнику відповідна кількість витраченої електроенергії буде відображатися на LCD - дисплеї безперервно і передаватися на контрольну базову станцію. Відгуки користувачів допомагають визначити замовлення між авторизованими та неавторизованими користувачами, що допомагає контролювати крадіжку електроенергії.

Зв'язок між користувачем/домогосподарством та підстанцією здійснюється за допомогою Zigbee. Мережа GSM використовується для надсилання SMS до місцевих органів влади щодо випадків крадіжок. Цей лічильник може працювати як лічильник з передплатою або післяплатою. Запропонована система замінює традиційні методи зчитування лічильників та забезпечує віддалений доступ до існуючого лічильника енергії постачальником енергії. Також існує можливість регулярно контролювати показники лічильників без відвідування кожного будинку [63].

У статті [64] представлено розумний лічильник електроенергії для автоматичної системи обліку та виставлення рахунків. Інтеграція мікропроцесора Arduino та GSM служби коротких повідомлень (SMS) надає системі зчитування лічильника деякі автоматичні функції, які визначені заздалегідь. Запропонована система лічильника електроенергії може поєднуватися з вбудованим контролером та GSM - модемом для передачі даних, таких як спожита енергія в кВт·год, сформований рахунок, послуги безпеки (лінія відключення/увімкнення) через мобільну мережу GSM, а потім дані можуть подаватися та інтегруватися в існуючу систему управління електроенергією, розташовану в енергетичних компаніях або організаціях, для надання послуг серед споживачів без персоналу.

Для реалізації можливості застосування динамічної тарифікації із врахуванням наявності перехідних процесів при зміні обсягу генерованої електроенергії та врахування умови економічного балансу актуальним є

застосування концепції пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії.

Висновки до першого розділу

1. Проведений огляд існуючих рішень щодо тарифікації електричної енергії свідчить про необхідність розробки способів динамічної тарифікації для локальних генеруючих систем, що забезпечить адекватну вартість електроенергії в різних режимах роботи.

2. Актуальним завданням є розроблення моделі динамічної тарифікації на основі рівняння економічного балансу, що надасть змогу враховувати вартість первинного носія енергії в залежності від рівня генерованої та енергії, що споживається у поточному часі.

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

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТАРИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ БАЛАНСУ

2.1. Створення динамічної електро-вартісної моделі ізольованої електротехнічної системи

В рамках впровадження гнучкої тарифікації необхідне створення динамічної електро-вартісної моделі, яка поєднує енергетичні та економічні показники замкненої енергогенеруючої системи, за допомогою якої можливо досліджувати вплив перехідних процесів при зміні параметрів енергогенеруючої системи на зміну її вартісних показників, а також вираховувати адекватну тарифну ціну для виробників та споживачів електроенергії [8].

Тривалість перехідних процесів генератора має безпосередній вплив на економічні параметри ізольованої системи, тобто на відхилення реальної тарифної ціни електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого у існуючій моделі щогодинної тарифікації. Постає питання дослідження способів коригування швидкості зміни рівня виробленої електроенергії та їх впливу на динамічну зміну тарифної ціни.

Система «виробник – споживач електроенергії» може бути представлена як замкнена макроекономічна система [65], яка поєднує динамічну та економічну частини ізольованої 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 [66]:

$$M \cdot V = C \cdot Q, \quad (2.1)$$

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:

$$M \cdot V = S + C_W \cdot W. \quad (2.2)$$

Оскільки 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:

$$M \cdot V = S + (C_W + \Delta C_W) \cdot (W + \Delta W), \quad (2.3)$$

де $\Delta C_W = (M \cdot V - S - C_W \cdot W - C_W \cdot \Delta W - \Delta C_W \cdot \Delta W) / W$ - відповідна зміна вартості електроенергії при зміні рівня її генерації. Значення $\Delta C_W \cdot \Delta W$ не враховується, як величина другого порядку малості.

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:

$$\frac{dC_W}{dt} = \frac{M \cdot V - S}{W \cdot \Delta t} - \frac{C_W \cdot (1 + \frac{\Delta W}{W})}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

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, може бути алгебраїчним або диференціальним. У поєднанні із економічним рівнянням балансу енергогенеруючої системи можуть бути отримані такі електро-вартісні моделі:

$$\begin{cases} \frac{dC_W}{dt} = \frac{M \cdot V - S}{W} - C_W \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right) \\ W + \frac{dW}{dt} = \eta_g \cdot W_S \end{cases} \quad (2.5)$$

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

$$\begin{cases} \frac{dC_W}{dt} = \frac{M \cdot V - S}{W} - C_W \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right) \\ \frac{dW}{dt} = -W + \eta_g \cdot W_S \end{cases} \quad (2.6)$$

Тобто, можуть бути отримані математичні моделі, які поєднують електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи та дозволяють розраховувати динамічну зміну тарифної ціни при зміні рівня генерованої електроенергії, або навпаки [9, 67].

2.2. Побудова математичної моделі визначення вартості електроенергії системи з дизель-генератором

Використаний раніше підхід по представленню системи «виробник – споживач електроенергії» як замкненої макроекономічної системи застосуємо для створення математичної електро-вартісної моделі для визначення вартості електроенергії при щосекундній тарифікації. Модель поєднує дві складові: економічну та технічну (2.5), (2.6).

Для розрахунку щосекундної (хвилинної, годинної) вартості генерованої енергії в праву частину виразу (2.2) можуть бути включено всі витрати, пов'язані з генерацією енергії, такі як витрати на матеріали, амортизацію, заробітну плату та інші, визначені особливостями експлуатації генеруючого обладнання [68]. Для спрощення виразу (2.2) були залишені лише витрати на паливо, яке необхідне для виробництва електроенергії певним генератором на базі двигуна внутрішнього згорання.

Приймаючи за базову величину частину енергії, виражену в [Вт·сек], рівняння Фішера переписано у вигляді:

$$M \cdot V = C_B \cdot B + C \cdot W, \quad (2.7)$$

де: C, C_B – вартість енергії і одиниці палива; W, B – кількість енергії і палива.

Для подальшого оперування з вартістю електроенергії введемо коефіцієнт $\sigma = C_B/C$, рівняння (2.7) перепишемо із приростами Δ відносно змінних M, C, B, W . Нехтуючи членами другого порядку малості, отримано:

$$(M + \Delta M) \cdot V = C \cdot \sigma \cdot B + C \cdot \sigma \cdot \Delta B + \Delta C \cdot \sigma \cdot B + C \cdot W + \dots \\ \dots + C \cdot \Delta W + \Delta C \cdot W. \quad (2.8)$$

Віднімаючи від рівняння (2.8) рівняння (2.7), отримаємо:

$$\Delta C \cdot (W + \sigma \cdot B) = V \cdot \Delta M - C \cdot \sigma \cdot \Delta B - C \cdot \Delta W. \quad (2.9)$$

Переходячи від оператора Δ до d/dt для приростів у малому функцій $C(t)$ і $W(t)$ та привівши ліву і праву частини рівняння до однакової розмірності враховуючи час зміни приростів, отримаємо:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{V \cdot \Delta M}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau} - \frac{C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau} - \frac{C(t)}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot \frac{dW(t)}{dt}, \quad (2.10)$$

де τ – час відхилення величин електроенергії та її вартості від обраних значень W_0 і C_0 відповідних точки спокою.

Якщо розглядати роботу генеруючої системи протягом деякого інтервалу часу T , коли прирости $\frac{dC(t)}{dt}$, $\frac{dW(t)}{dt} \neq 0$, отримаємо наступний вираз:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau} - \frac{C(t)}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot \frac{dW(t)}{dt}. \quad (2.11)$$

Виконавши алгебраїчні перетворення, можемо записати;

$$\frac{1}{C(t)} \cdot dC(t) = \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau \cdot C(t)} \cdot dt - \frac{1}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot dW(t). \quad (2.12)$$

Для розв'язання рівняння виконаємо інтегрування:

- 1) лівої частини у межах від $C(t)$ до C_0 ;
- 2) першого доданка правої частини від 0 до T , другого доданка від $W(t)$ до W_0 , де $W(t)$ і $C(t)$ – значення рівня генерованої електроенергії та її вартості у досліджуваній момент часу, W_0 – значення рівня генерованої електроенергії у точці спокою а C_0 – її вартості, T – досліджуваний інтервал часу. Таким чином отримаємо:

$$\int_{C(t)}^{C_0} \frac{1}{C(t)} \cdot dC(t) = \int_0^T \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau \cdot C(t)} \cdot dt - \int_{W(t)}^{W_0} \frac{1}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot dW(t). \quad (2.13)$$

Введено наступні заміни:

$(V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B) = A$; $((W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot C(t)) = B$. Якщо значення функцій $W(t), B(t), C(t)$ взяті усередненими на інтервалі $[0; T]$, то має місце рівність

$$\int_0^T \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot \tau \cdot C(t)} \cdot dt = \int_0^T \frac{A}{B \cdot \tau} \cdot dt. \quad (2.14)$$

У випадку, коли тривалість досліджуваного інтервалу $T = \tau$, визначений інтеграл дорівнює: $\frac{A \cdot T}{B \cdot T} - \frac{A \cdot 0}{B \cdot T} = \frac{A}{B}$.

А згідно з рівнянням (2.13) тривалість інтервалу $[0; T]$ саме має бути рівною τ , так як за цей час і відбуваються відхилення величин рівня генерованої електроенергії та вартості її одиниці від значень у точці спокою.

Виконаємо заміну: $\frac{A}{B} = D$. Тоді із рівняння (2.14) отримаємо:

$$\int_{C(t)}^{C_0} \frac{1}{C(t)} \cdot dC(t) = D - \int_{W(t)}^{W_0} \frac{1}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot dW(t), \quad (2.15)$$

і відповідно:

$$\ln(C_0) - \ln(C(t)) = -(\ln(W_0 + \sigma \cdot B(t)) - \ln(W(t) + \sigma \cdot B(t))) + D, \quad (2.16)$$

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_0}\right) = \ln\left(\frac{W_0 + \sigma \cdot B(t)}{W(t) + \sigma \cdot B(t)}\right) - \ln(e^D), \quad (2.17)$$

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_0}\right) = \ln\left(\frac{W_0 + \sigma \cdot B(t)}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot e^D}\right). \quad (2.18)$$

Виконавши потенціювання обох частин рівняння (2.18) отримано вираз (2.19), що визначає динамічну зміну вартості одиниці електроенергії при зміні рівня її генерації:

$$C(t) = \frac{W_0 + \sigma \cdot B_0}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot e^{D \cdot T}} \cdot C_0. \quad (2.19)$$

Повертаючись до виконаних заміни, з урахуванням $T = \tau$:

$$C(t) = \frac{W_0 + \sigma \cdot B_0}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot e^{\frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot C(t)}}} \cdot C_0. \quad (2.20)$$

Враховуючи, що значення функцій $W(t), B(t), C(t)$ взяті усередненими на досліджуваному інтервалі, функція (2.20) матиме вигляд:

$$C(t) = const \cdot \frac{1}{e^x}, \quad (2.21)$$

де $const = \frac{(W_0 + \sigma \cdot B_0) \cdot C_0}{(W(t) + \sigma \cdot B(t))}$, $x = \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{(W(t) + \sigma \cdot B(t)) \cdot C(t)}$ є константами. Враховуючи, що $\sigma = \frac{C_B}{C}$, в точці спокою $C = C_0$, а у досліджуваній момент часу $C = C(t)$ отримано:

$$const = \frac{W_0 \cdot C_0 + C_B \cdot B_0}{W(t) + \sigma \cdot B(t)}, x = \frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t)}.$$

Повертаючись до виконаних заміни отримано вираз (2.22):

$$C(t) = \frac{W_0 \cdot C_0 + C_B \cdot B_0}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot e^{-\frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t)}}. \quad (2.22)$$

Для перевірки правильності отриманої рівності (2.22) було проведено ділення лівої і правої частин на $C(t)$:

$$1 = \frac{W_0 \cdot C_0 + C_B \cdot B_0}{W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t)} \cdot e^{-\frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t)}}.$$

Для виконання отриманої рівності необхідно, аби:

$$W_0 \cdot C_0 + C_B \cdot B_0 = W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t), \quad (2.23)$$

до того ж:

$$\frac{V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B}{W(t) \cdot C(t) + C_B \cdot B(t)} = 0. \quad (2.24)$$

Рівність (2.23) справедлива, якщо усереднені значення функцій $W(t), B(t), C(t)$ на інтервалі $[0; T]$ дорівнюють значенням відповідних функцій у точці спокою. Рівність (2.24) буде справедливою, якщо $V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B = 0$.

Із рівняння Фішера з урахуванням приростів $\Delta M, \Delta C, \Delta B, \Delta W$, нехтуючи членами вищого порядку малості, отримано:

$$V \cdot \Delta M - C_B \cdot \Delta B = C \cdot \Delta W + \Delta C \cdot W. \quad (2.25)$$

Відповідно, рівність (2.25) виконуватиметься, якщо відхилення $\Delta B, \Delta W, \Delta C = 0$. В такому випадку сумарне відхилення грошової маси $\Delta M = 0$, і умова економічного балансу виконується.

Якщо приростів обсягів палива, рівня генерованої електроенергії та вартості її одиниці не відбувалось, то рівність (2.25) є справедливою.

Отже, при перевірці отриманого виразу (2.22) підтверджено необхідність виконання умови того, що добуток приросту грошової маси на її оборотність

$V \cdot \Delta M$ дорівнює добутку приросту обсягу палива на її вартість $C_B \cdot \Delta B$, що дає змогу перейти від рівняння (2.12) безпосередньо до рівняння $\frac{dC(t)}{C(t)} = -\frac{dW(t)}{W(t)+\sigma \cdot B(t)}$.

Таким чином перевірено, що прирости $\frac{dC(t)}{dt}$, $\frac{dW(t)}{dt}$ мають дорівнювати нулю, і розрахунок $C(t)$ повинен проводитись у стані спокою.

У стані спокою, коли $\frac{dC(t)}{dt} = 0$; і $\frac{dW(t)}{dt} = 0$; $V \cdot \Delta M = C_B \cdot \Delta B$, що відповідає умові економічного балансу, яка описана рівнянням Фішера.

Візьмемо до уваги, що величина енергії малих генеруючих станцій при незначних відхиленнях генерованої енергії від деякого стану спокою практично не впливає на рівняння балансу. Отримаємо рівняння:

$$\frac{dC(t)}{C(t)} = -\frac{dW(t)}{W(t)+\sigma \cdot B(t)}, \quad (2.26)$$

Здійснено інтегрування обох частин рівняння (2.26) у межах від $C(t)$, $W(t)$ до C_0 , W_0 , де $W(t)$ і $C(t)$ – рівень генерованої електроенергії та вартості її одиниці у досліджуваній момент часу; W_0 – значення рівня виробленої генератором електроенергії у точці спокою; C_0 – вартість її одиниці:

$$\int_{C(t)}^{C_0} \frac{1}{C(t)} \cdot dC(t) = -\int_{W(t)}^{W_0} \frac{1}{W(t)+\sigma \cdot B(t)} \cdot dW(t), \quad (2.27)$$

і відповідно:

$$\ln(C_0) - \ln(C(t)) = -(\ln(W_0 + \sigma \cdot B(t)) - \ln(W(t) + \sigma \cdot B(t))). \quad (2.28)$$

Виконавши потенціювання обох частин рівняння (2.28), отримано вираз (2.29), що визначає динамічну зміну вартості одиниці електроенергії при зміні її рівня:

$$C(t) = \frac{W_0 + \sigma \cdot B_0}{W(t) + \sigma \cdot B(t)} \cdot C_0. \quad (2.29)$$

При малих відхиленнях $B(t)$ від рівня B_0 у формулі (2.29) достатньо враховувати у знаменнику тільки величину $W(t)$, яка незначним чином відхиляється від стану спокою. Як наслідок отримано розрахунковий вираз для оцінки вартості одиниці електроенергії при невеликих відхиленнях відносно точки спокою. Застосування виразу (2.29) передбачає попереднє розбиття діапазону зміни енергії на зони, всередині яких відбувається розрахунок відносно точки W_0 з вартістю C_0 .

На рис. 2.1. наведено розбиття діапазону зміни генерованої електроенергії на n частин. Для кожної з частин вираз (2.29) матиме вигляд:

$$C(t) = \frac{W_{0i} + \sigma \cdot B_{0i}}{W(t) + \sigma \cdot B_{0i}} \cdot C_{0i} \Big|_{W_{0i} \in \Delta W_{0i}}, \quad (2.30)$$

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.

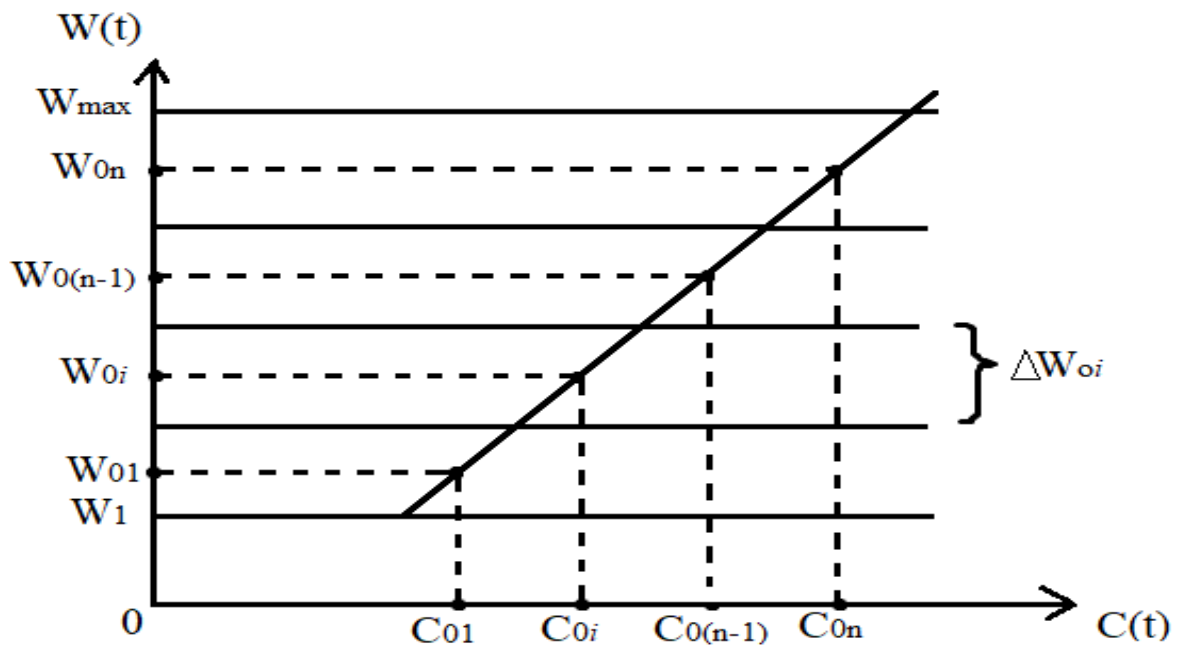


Рис. 2.1. Зворотна залежність вартості одиниці електроенергії від зміни її рівня

Приклад застосування.

Визначення вартості одиниці електроенергії може бути продемонстровано на прикладі її розрахунку для малих відхилень від деякого статичного рівня генерованої електроенергії на виході автономного дизель – генератора типу Teksan TJ138PE5C [69], а саме при відхиленнях на 5 % від режиму генерації 50% від номінальної потужності. Дизель – генератор розраховано на номінальну потужність 137,5 кВт. При генерації 50% від номінальної потужності витрати

палива складають $B_{0i} = 15,9$ л/год, що при врахуванні лише ринкової вартості дизельного палива [70] коштує $27,34 \cdot 15,9 = 434,7$ грн, а рівень отриманої електроенергії за проміжок часу одну годину становить $W_{0i} = 68,75$ кВт · год. Тоді вартість одиниці електроенергії з врахуванням $C_{0i} = \frac{434,7}{68,75} = 6,32 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$, тоді коефіцієнт $\sigma = \frac{C_B}{C_{0i}} = \frac{27,34}{6,32} = 4,32$.

Для прикладу було розраховано $C(t)$ за виразом (2.30), тобто без урахування відхилення витрат палива $B(t)$ від його рівня B_{0i} , та з урахуванням нерівності $B(t) \neq B_{0i}$, тобто згідно виразу (2.29).

Величини витрати палива й рівень електроенергії на вході генератора матимуть значення, наведені у табл. 2.1. Також у табл. 2.1 наведено результати розрахунків вартості одиниці електроенергії у точці W_{0i} , яка відповідає рівню генерованої електроенергії 50% від номінального режиму генерації та при відхиленні на 5% від обраного значення. Наведені величини відповідають трьом дослідженим рівням генерованої електроенергії $W(t)$, що визначаються у відсотках від номінального значення W_H : 1) 45%, 2) 50%, 3) 55%. Також розраховано процентне відхилення між результатами розрахунку обома методами (див. стовпець « Δ , (%)» табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Дані розрахунків

$W(t)$	Розрахунок за виразом (2.30)				Розрахунок за виразом (2.29)				Δ , (%)	
	$\frac{W(t)}{W_H}$, (%)	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

З наведених 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 підвищенні величини енергії. З урахуванням того, що час виходу дизель-генератора на режим роботи більший інтервалу в 1с та похибка між розрахунками динамічної зміни $C(t)$ двома методами менша 3%, у подальшому доцільно виконувати розрахунок лише за виразом (2.30).

Однак необхідно враховувати, що розрахунок вартості енергії буде точнішим при відслідковуванні тренду зміни кількості палива, що споживається. Тому при щосекундній тарифікації, якщо вихід генератора на режим становить 6...10с [71], доцільним є відслідковування трендів зміни навантаження та кількості палива і перенесення точки C_{0i} кожні 5...10с. Відносно нового значення C_{0i} й буде проводитись розрахунок.

2.3. Система динамічної тарифікації у електротехнічній системі енергоострову

Продемонструємо необхідність використання динамічної оцінки вартості електроенергії на прикладі системи електроживлення певного локального об'єкту як електротехнічного комплексу, наприклад енергоострову, генерація якого обмежена сотнею чи декількома сотнями кВт.

Нехай будинки загальною кількістю n під'єднані до власних генераторів і можуть обмінюватись даними. Цей обмін здійснюється за допомогою протоколу, який містить інформацію про номер мережі N_i , час роботи відповідного генератора t_i , обсяг генерованої електроенергії W_i , об'єм спожитого палива B_i і розраховану вартість одиниці електроенергії C_i , де $0 < i \leq n$. Всі ці параметри обмежені за величиною для кожного окремого користувача (будинку).

Загалом, кожен споживач має пристрій розрахунку (ПР_{*i*}) (рис. 2.2), під'єднаний до власного мікроконтролера, який у асинхронному режимі обмінюється даними із підсумовуючим пристроєм (ПР _{Σ}). Загальний

мікроконтролер (МК), під'єднаний до нього, регулює виконання умови економічного балансу у системі, яка описується рівнянням Фішера [66], відсилаючи необхідні дані до кожного PP_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 PP_{Σ} і мікроконтролером МК, реалізується виконання умови економічного балансу у локальній системі з певної кількості генераторів і споживачів.

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

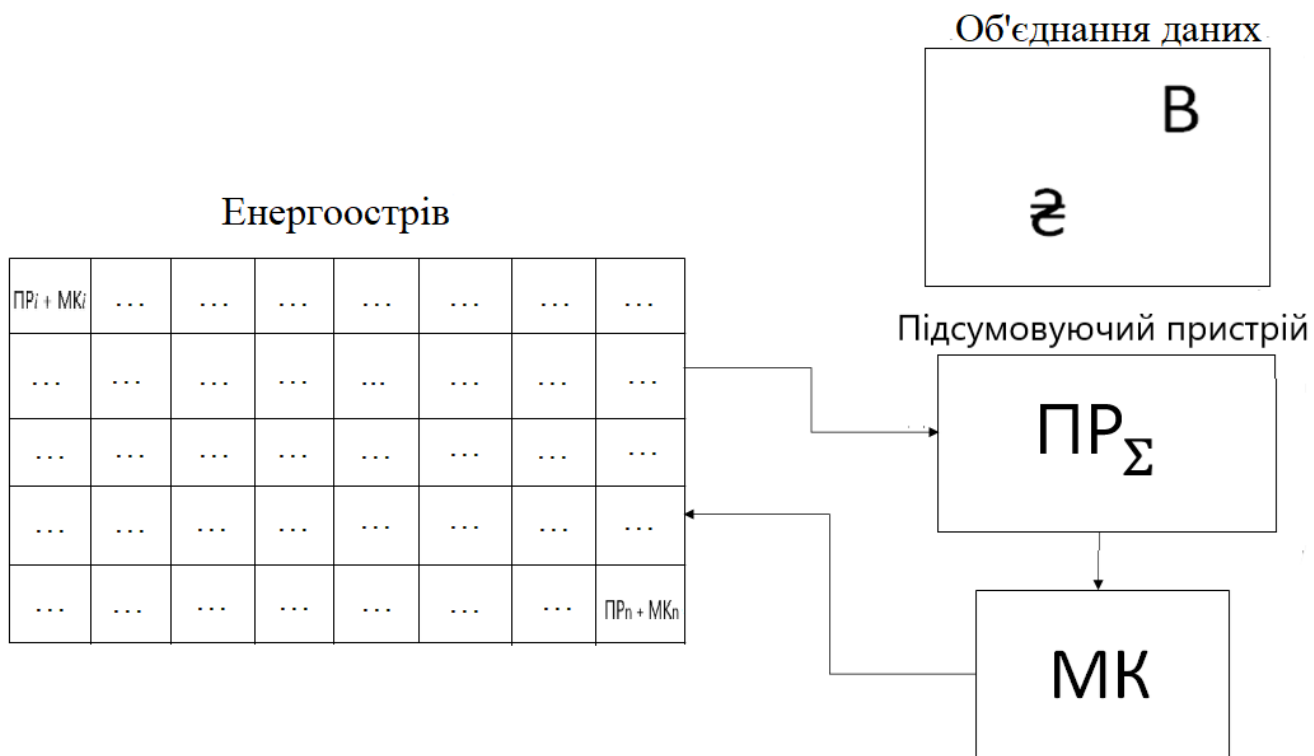


Рис. 2.2 Спрощена структурна схема зав'язків пристроїв розрахунку енергоострову

Обсяг коштів у розмірі $C_B \cdot V$ повинен враховуватися при перевірці виконання умови економічного балансу на інтервалі $[0;T]$. І якщо умова балансу не виконується, то 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.

Для випадку, коли сплата за спожиту енергію відбувається по завершенню деякого періоду часу, великого відносно кожного досліджуваного інтервалу (Наприклад, досліджуваний інтервал $T = 1$ год, а розрахунковий період часу дорівнює добі, тобто $24 \cdot T$). Або сплата здійснюється наприкінці місяця чи календарної чверті, а тривалість кожного інтервалу становить хвилину, годину, добу – задача врахування відхилень вартості на кожному відносно малому інтервалі і перенесення її на наступний інтервал є актуальною. Оскільки протягом всього періоду накопичене сумарне відхилення може бути суттєвою величиною.

На рис. 2.3. наведено приклад певного періоду часу тривалістю 24 год, по завершенню якого споживачі мають розрахуватися за отриману електроенергію.

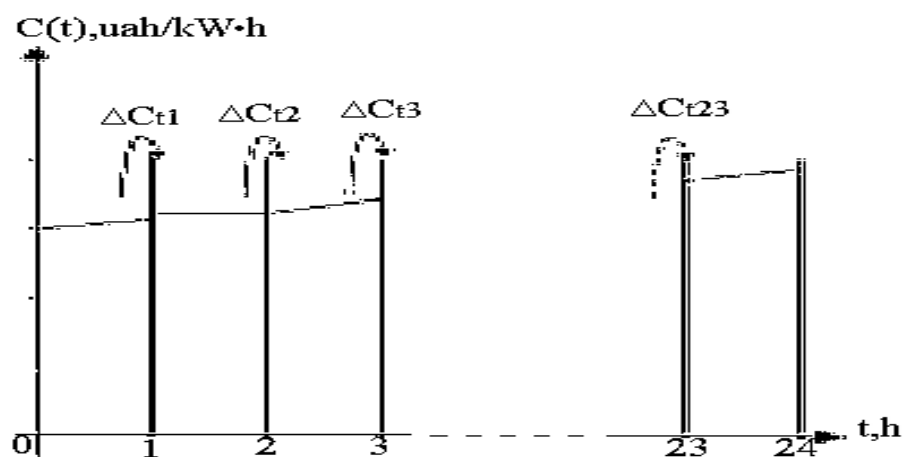


Рис. 2.3. Схема зміни вартості одиниці електроенергії генератора на протязі доби

Кожну годину розраховується різниця вартості на початку та на кінці даного інтервалу часу. Ця різниця додається до вартості на початку наступної години. Така операція здійснюється наприкінці кожного інтервалу, малого відносно загального

періоду часу. Як наслідок в кінці розрахункового періоду вартість одиниці електроенергії може суттєво відрізнятись від її значення на попередньому періоді, в залежності від додатного чи від'ємного значення кожної різниці ΔC_t у більшу чи меншу сторону. Таким чином, очевидно є необхідність виконання перерахунку вартості енергії, яка виробляється генератором, при кожному її відхиленні від встановленого на досить малому інтервалі часу значення. Нехай це відхилення буде незначним, але при дослідженні великої кількості базових інтервалів за один розрахунковий період часу сумарне накопичене відхилення може призвести до суттєво відмінної кількості сплачених споживачами коштів порівняно із прогнозованою за даний інтервал. А це означає, що встановлена наразі концепція тарифікації із фіксованою вартістю електроенергії у $\frac{\text{грн}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ може виявитися збитковою за наявності економічного дисбалансу на кожному інтервалі часу малому відносно розрахункового періоду, на прикінці якого споживач здійснює розрахунок за отриману електроенергію.

Кроки реалізації завдання динамічного визначення вартості одиниці електроенергії.

1. Отримуємо дані про вироблену кожним i -м генератором енергію за допомогою пристрою розрахунку PP_i наприкінці інтервалу часу T .

2. Розраховуємо середнє значення генерованої за досліджуваній інтервал часу T електроенергії W_{0i} . На основі відомого значення W_{0i} визначаємо обсяг використаного палива B_{0i} , вартості C_{0i} та коефіцієнт σ .

3. Розраховуємо сумарний обсяг електроенергії $W_{\Sigma i}$ виробленої кожним генератором. Визначаємо сумарний обсяг електроенергії W_{Σ} , генерованої усіма генераторами на інтервалі часу T .

4. Розраховуємо ваговий коефіцієнт вартості електроенергії генератора $C_{\text{ваг}i} = W_{\Sigma i} / W_{\Sigma}$. Ваговий коефіцієнт впливає на вартість одиниці електроенергії конкретного i -го генератора.

5. Розраховуємо вартості електроенергії i -го генератора C_i ,

$$C_i = C_{\text{вар}i} \cdot \frac{W_{0i} + \sigma \cdot B_{0i}}{W(t) + \sigma \cdot B_{0i}} \cdot C_{0i}. \quad (2.31)$$

6. Переходимо до наступного генератора $i = i + 1$, повторення для нього кроків 1 – 5. Перевірка, чи $i \leq N$, де N – загальна кількість генераторів у складі енергоострову. Якщо $i > N$ завершення процесу алгоритму.

7. Перевірка, чи $t <$ розрахункового періоду часу. $t = t + 1$, повторюємо усі попередні кроки протягом нового інтервалу часу t . По завершенні розрахункового періоду часу визначаємо сумарну вартість енергії.

На рис. 2.4 наведено блок-схему алгоритму розрахунку вартості одиниці електроенергії двох генераторів, кожен з яких постачає електроенергію своєму споживачу, а також сумарної вартості одиниці електроенергії.

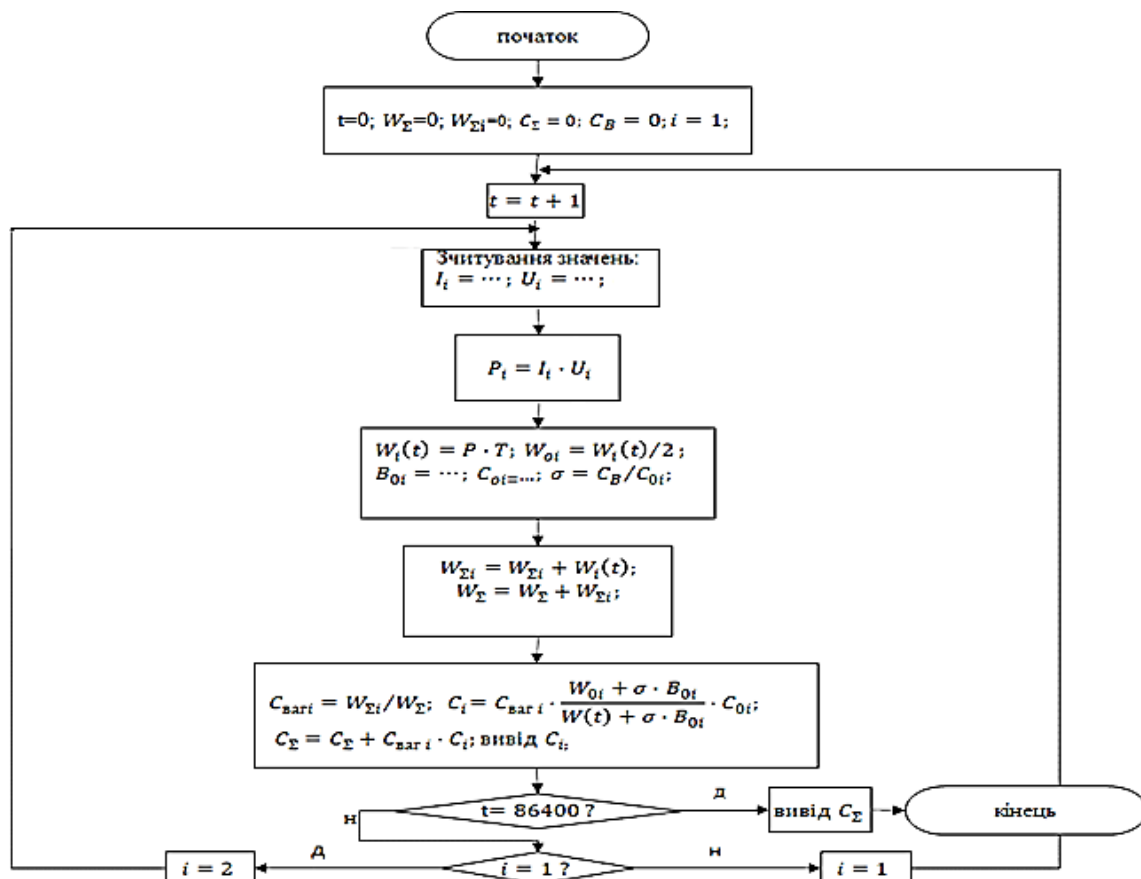


Рис. 2.4 Алгоритм щосекундного розрахунку C_i на протязі доби

Розрахунок виконується на кінці кожного інтервалу часу T , протягом 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 завершенні досліджуваного періоду, тобто коли $t = 86400$ с розрахунок завершується. Тарифікація може бути також і щогодинна. В такому випадку інтервал часу $T = 1$ год. Розрахунок має завершуватися, якщо змінна $t = 24$.

Даний алгоритм використано у авторському творі [14], див. додаток Д.

Висновки до другого розділу

1. Створено математичну електро-вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи, що враховує як динамічну зміну рівня генерованої електроенергії, так і динамічну зміну вартості одиниці електроенергії і дозволяє розраховувати адекватний щосекундний або щогодинний тариф електроенергії.
2. 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%.
3. Показано що визначення динамічної вартості електроенергії локального об'єкту, енергоострову, з урахуванням щогодинного розрахунку різниці вартості на початку та кінці інтервалу часу, з додаванням її до вартості на початку наступної години дозволяє точніше визначати вартість при динамічній тарифікації електроенергії.
4. Розроблено алгоритм розрахунку вартості електроенергії двох генераторів, які працюють на загальну мережу, з урахуванням вагових коефіцієнтів завантаження, що дозволяє розраховувати вартість електроенергії для окремих каналів і проводити відповідно окрему динамічну як щосекундну, так і щогодинну тарифікацію.

РОЗДІЛ 3

ТАРИФІКАЦІЯ В ІЗОЛЬОВАНІЙ СИСТЕМІ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ЧАСТИНИ

3.1. Динамічна електро-вартісна модель системи із автономним дизель-генератором

Розглянемо побудову динамічної електро-вартісної моделі спрощену схему якої у вигляді «виробник – споживач електроенергії» представлено на рис. 3.1.

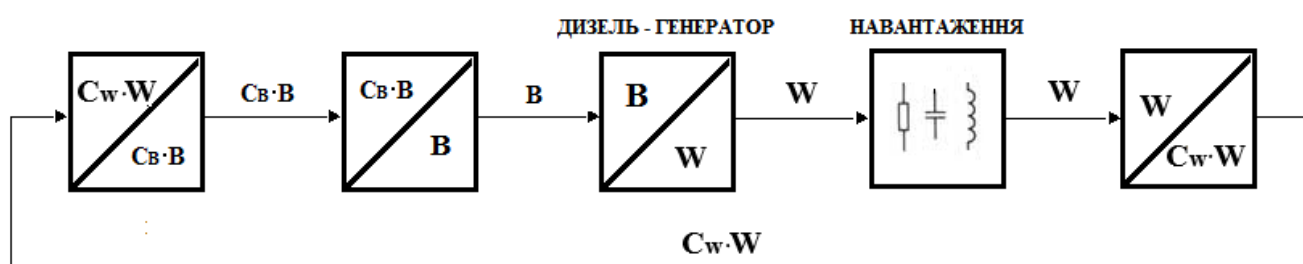


Рис. 3.1. Спрощена схема «виробник – споживач електроенергії»

У цій системі споживач отримує електроенергію, рівень якої дорівнює W , і сплачує її вартість $S_W = C_W \cdot W$, при цьому витрачається певна кількість отриманих коштів $C_B \cdot B$ на закупівлю палива та на власні потреби.

Математична модель, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором може бути отримана аналогічно до продемонстрованої у другому розділі. Тоді рівняння для приросту вартості одиниці електроенергії матиме вигляд:

$$\frac{dC_W}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{W \cdot \Delta t} - \frac{C_W \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right)}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

яке описує динамічну зміну C_W в залежності від рівня генерованої електроенергії, що забезпечує щосекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ с.

Рівняння приросту рівня електроенергії для дизель-генератора можна отримати із виразу для перетворення енергії згораючого палива у вироблену енергію. Із виразу для ККД дизель-генератора отримаємо:

$$\frac{W}{\tau} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot W_T, \quad (3.2)$$

де η_B – ККД генератора; τ – стала часу генератора; W_T – енергія згораючого палива. Приймавши приріст рівня генерованої електроенергії за одну секунду як $\frac{\Delta W}{\Delta t}$ та виразивши енергію згораючого палива через його кількість B , отримуємо:

$$\frac{W}{\tau} + \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B, \quad (3.3)$$

де γ – коефіцієнт перетворення палива у генеровану електроенергію.

Здійснивши заміну різницевого виразу на похідну, запишемо рівняння приросту рівня електроенергії для дизель-генератора:

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \quad (3.4)$$

Рівняння (3.1) та (3.4) складають динамічну електро-вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{W} - C_w \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right); \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B, \end{cases} \quad (3.5)$$

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

Для відображення зміни вихідного рівня генерованої енергії у отриманій електро-вартісній моделі використовується складова ΔB , при тому, що величини M і V незмінні. Система (3.5) матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V - \beta \cdot C_w \cdot W - C_B \cdot \Delta B}{W} - C_w \cdot \left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right), \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot \left(\beta \cdot \frac{C_w}{C_B} \cdot W + \Delta B\right). \end{cases} \quad (3.6)$$

Прийнято, що $\frac{\Delta B}{W}$ – кількість палива ΔB_W , необхідна для переходу електротехнічної системи на новий, заданий рівень; перше рівняння системи (3.6) запишемо у вигляді

$$\frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \Delta B_W \cdot C_B \quad (3.7)$$

Аналогічно, для другого рівняння системи (3.6)

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau} \quad (3.8)$$

У результаті рівняння (3.7) і (3.8) складають систему (3.9), у якій $\Delta B_w \cdot C_B$ та $\frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – відповідні впливи, що задають величину динамічного приросту вартості одиниці електроенергії та рівня генерованої електроенергії.

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \Delta B_w \cdot C_B, \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Таким чином, як і у 2-му розділі, отримано математичну модель, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором та дозволяє розраховувати динамічну зміну вартості одиниці електроенергії при динамічній зміні рівня генерованої електроенергії, або навпаки [9, 67].

У результаті моделювання макроекономічної системи, після завершення перехідних процесів повинна виконуватися умова балансу, яка після виконаних перетворень матиме вигляд:

$$M \cdot V = \beta \cdot C_w \cdot W + C_w \cdot W. \quad (3.10)$$

Можемо стверджувати, що при обмеженні приростів величин W та C_w енергосистема знаходиться у стані, який відповідає балансу.

Табл. 3.1 демонструє значення параметрів такої системи. Значення усталених режимів для обох змінних W і C_w , підставлені у рівняння (3.10), продемонструють виконання системою умови балансу:

$$M \cdot V = 10000. \quad (3.11)$$

Таблиця 3.1. Параметри системи для моделювання

Параметр	τ	η_B	γ	C_B	M	V	ΔB	β	W	C_w
Значення	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{л}}$	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	10000 грн	1	0 л	1	10000 Вт · с	0.5 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$

Моделювання перехідних процесів у системі, коли відбувається зміна вартості одиниці електроенергії C_w та обсягу генерованої електроенергії W відносно

відомих початкових значень, при параметрах, наведених у табл. 3.2, показує, що задля зберігання умови балансу макроекономічної системи, при зниженні (зростанні) рівня генерованої електроенергії, вартість одиниці електроенергії буде відповідно зростати (зменшуватися).

Таблиця 3.2. 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	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$

За 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 наведено на рис. 3.2.

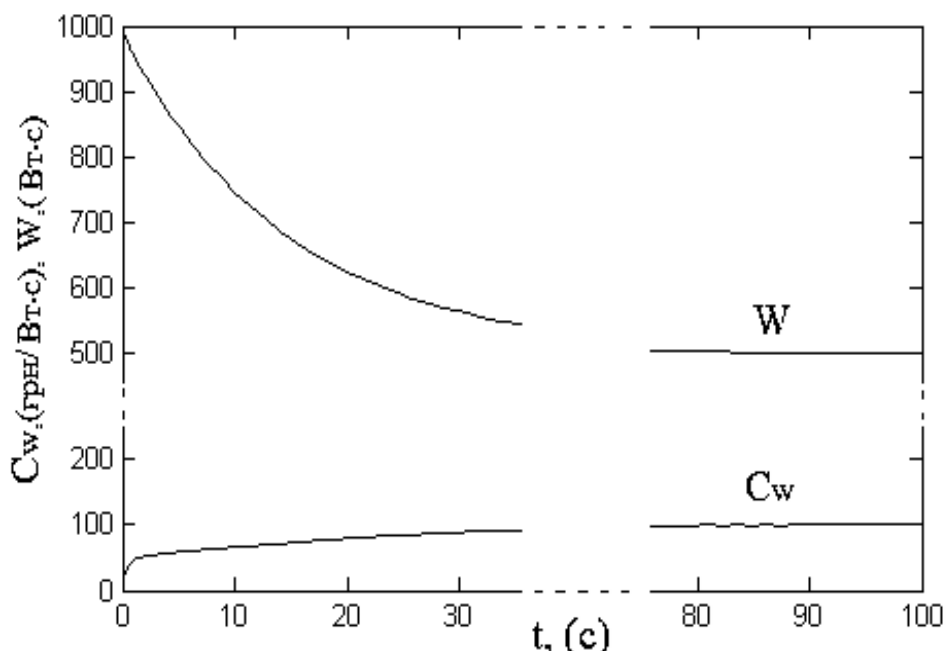


Рис. 3.2. Перехідні процеси у системі за відсутності обмежень для приростів

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 (3.10) і показує виконання цього рівняння, при параметрах, наведених у табл. 3.2.

Таким чином, продемонстровано виконання математичною моделлю умови макроекономічного балансу після завершення перехідних процесів при зміні рівня генерованої електроенергії.

Після завершення перехідних процесів також існує можливість розрахування усталеного значення вартості одиниці електроенергії C_w , коли прирости $\frac{dC_w}{dt}$ і $\frac{dW}{dt}$ дорівнюють нулю.

Запишемо вираз для C_w із рівняння балансу (3.10):

$$C_w = \frac{M \cdot V}{W \cdot (\beta + 1)}, \quad (3.12)$$

і, підставивши вираз (3.12) у друге рівняння системи (3.9), з урахуванням рівності нулю приросту $\frac{dW}{dt}$, отримаємо рівняння:

$$W = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot M \cdot V}{C_B \cdot (\beta + 1)} + \eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B, \quad (3.13)$$

яке дозволяє визначити величину рівня генерованої електроенергії в усталеному режимі. Після завершення перехідного процесу величини W і C_w відповідають умові економічного балансу.

Отримані рівняння складають систему:

$$\begin{cases} C_w = \frac{M \cdot V}{W \cdot (\beta + 1)}, \\ W = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot M \cdot V}{C_B \cdot (\beta + 1)} + \eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B, \end{cases} \quad (3.14)$$

яка є математичною моделлю для визначення величин вартості одиниці електроенергії та рівня генерованої електроенергії після завершення перехідних процесів цих величин.

3.2. Перехідні процеси при зміні рівня генерованої електроенергії

Наведена раніше динамічна електро-вартісна модель ізольованої енергогенеруючої системи дозволяє дослідити зміни вартості одиниці електроенергії при виході генератора на новий режим роботи. Параметри моделі для дослідження перехідних процесів при виході на різні режими роботи наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Параметри моделювання виходу генератора на різні режими роботи

Параметр	τ	η_B	γ	C_B	M	V	ΔB	β	W_0	C_{w0}
Випадок 1	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	100000 грн	1	0 л	1	100 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$
Випадок 2	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	100000 грн	1	800 л	1	100 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$
Випадок 3	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	100000 грн	1	800 л 0 л, якщо $W \geq 500$ Вт · с	1	100 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$

Випадок 1 (рис. 3.3) демонструє заданий режим роботи дизель-генератора, у якому не використовується додаткова кількість палива ΔB , а тільки базова його величина B .

Випадок 1 (рис. 3.4) демонструє стрибок вартості одиниці електроенергії C_w , спричинений перехідним процесом рівня генерованої електроенергії W при виході на заданий режим.

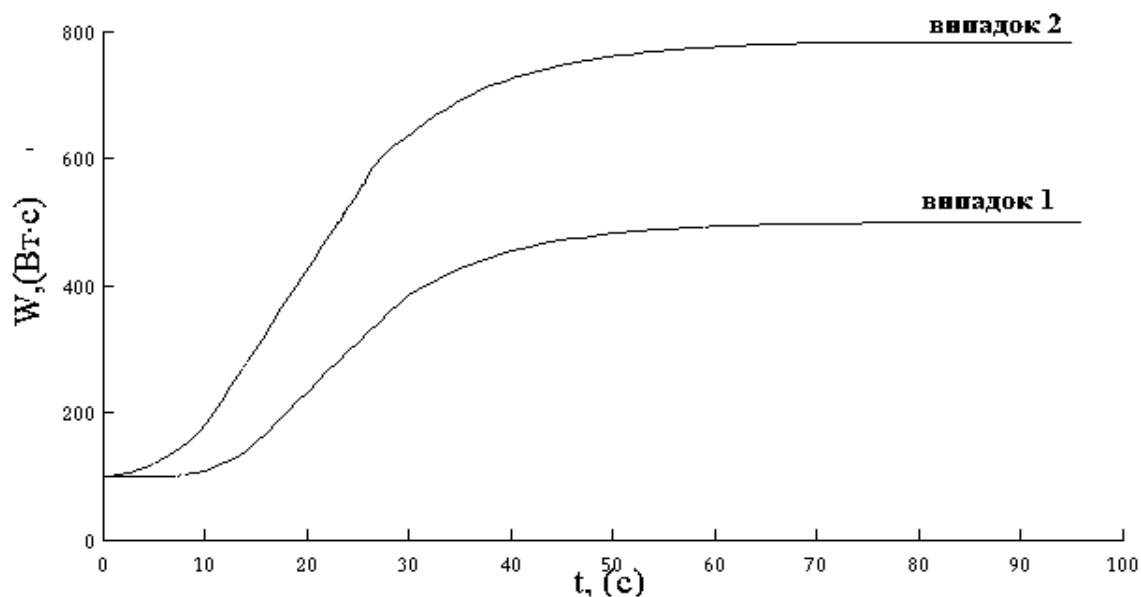


Рис. 3.3. Перехідні процеси при виході генератора на усталений режим

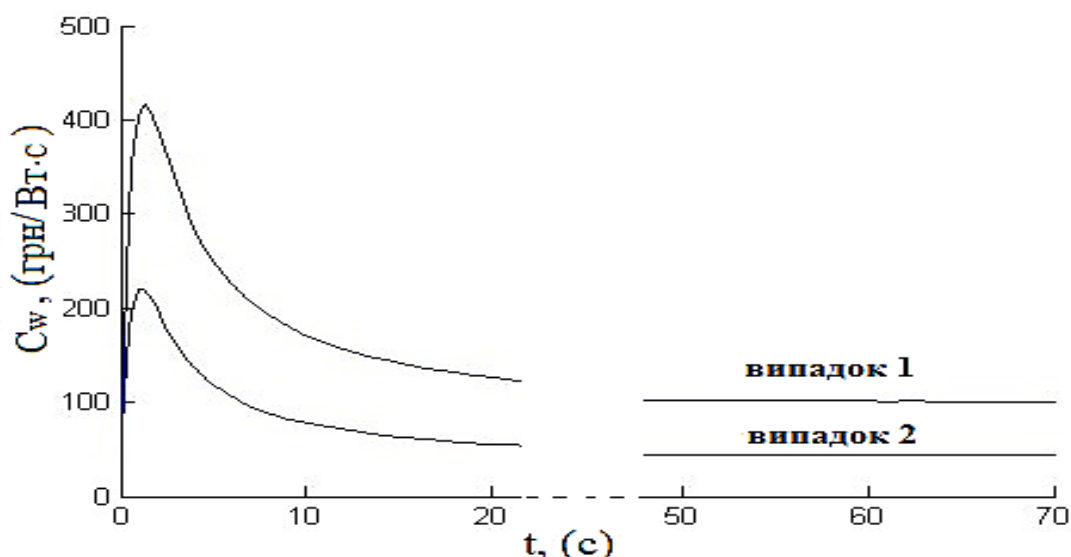


Рис. 3.4. Перехідні процеси вартості одиниці електроенергії

Як видно із результатів моделювання випадку 1, представлених на графіках рис. 3.3 та 3.4, перехідний процес при зміні рівня генерованої електроенергії викликає значне відхилення вартості її одиниці. Тому очевидним є дослідження способів скорочення тривалості перехідного процесу та прискореного виходу на заданий робочий режим. Одним із методів є використання додаткової кількості палива задля виходу на більш високий рівень генерованої електроенергії, що дозволяє скоротити тривалість перехідного процесу.

Припустимо, що необхідно збільшити рівень електроенергії на 50%. Для цього використовується додаткова кількість палива ΔB . Параметри моделювання наведено у випадку 2 табл. 3.3. Рис. 3.3 та 3.4 демонструють графіки перехідних процесів рівня електроенергії W та вартості одиниці електроенергії C_w для випадку 2. Як видно з графіків, наведених на рисунках, час виходу на режим у другому випадку менший, також менший стрибок вартості одиниці електроенергії на початку перехідного процесу.

У третьому випадку виконано вихід на режим 700 Вт·с, але подача палива була зупинена при досягненні рівня генерованої електроенергії 500 Вт·с. Параметри моделювання наведені у табл. 3.3, випадок 3. Рис. 3.5 демонструє порівняння двох способів виходу на режим генерації рівня електроенергії 500 Вт·с, із використанням додаткової кількості палива та без неї. Система (3.9) для даного випадку матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_w}{W} & 0 \leq t \leq t_1; \Delta B = 800; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_p \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau} & t_1 \leq t \leq T; \Delta B = 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

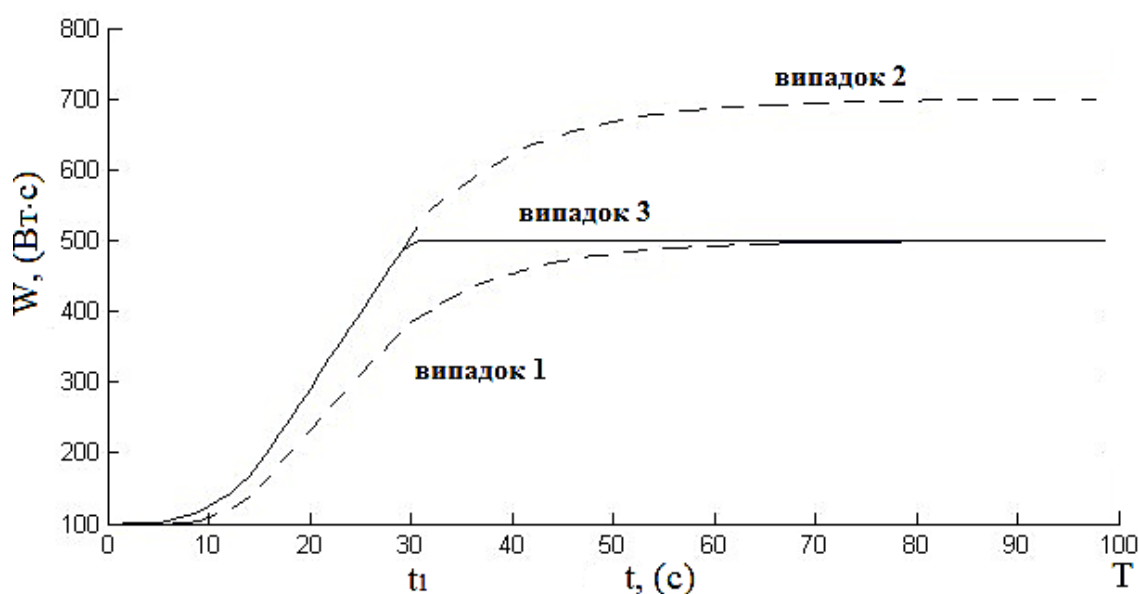


Рис. 3.5. Прискорений вихід генератора на ustalений режим

На рис. 3.6 наведено графік перехідного процесу вартості одиниці електроенергії при використанні додаткової кількості палива ΔW_p , для прискореного виходу на режим рівня генерованої електроенергії $500 \text{ Вт} \cdot \text{с}$. Як видно з рисунку, при використанні даного режиму стрибок вартості одиниці електроенергії виявляється меншим, ніж при звичайному виході на режим $500 \text{ Вт} \cdot \text{с}$. Також, після завершення перехідного процесу усталене значення вартості одиниці електроенергії таке саме, як і у випадку 1.

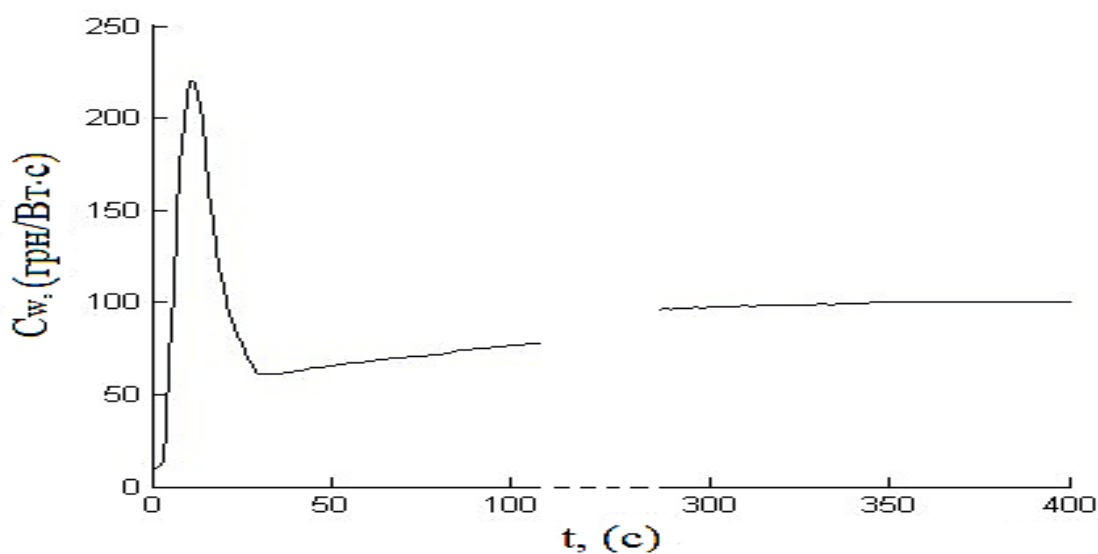


Рис. 3.6 Стрибок вартості одиниці електроенергії у випадку прискореного виходу на режим

Як видно при порівнянні першого і третього випадків, у третьому випадку досягається більш швидкий вихід на заданий режим рівня генерованої електроенергії, при меншому відхиленні вартості одиниці електроенергії.

Після завершення перехідних процесів визначено значення величин вартості одиниці електроенергії та рівня генерованої електроенергії. $C_w = 100 \frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$, $W = 500 \text{ Вт} \cdot \text{с}$. Підставлення параметрів у рівняння (3.14) показує його адекватність.

3.3. Зв'язок макроекономічних параметрів системи з її електротехнічними параметрами

Отримана у результаті модель дозволяє досліджувати зв'язок між макроекономічними параметрами ізольованої системи та зміною її вартісних показників при зміні рівня генерованої електроенергії, враховуючи наявність перехідних процесів у генераторі.

Розглянемо випадок, коли існує можливість змінювати величину грошової маси M та швидкість її обертання V . Приймаючи вартість палива сталою величиною $\Delta C_B = 0$ рівнянню балансу прийме вигляд:

$$(M + \Delta M) \cdot (V + \Delta V) = C_B \cdot (B + \Delta B) + (C_w + \Delta C_w) \cdot (W + \Delta W), \quad (3.16)$$

Розкривши дужки та знехтувавши величинами другого порядку малості, отримаємо рівність (3.16), яка набуває вигляду:

$$\Delta M \cdot V + M \cdot \Delta V + M \cdot V = \Delta W \cdot C_w + W \cdot C_w + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B, \quad (3.17)$$

Тоді для приросту оборотності грошової маси ΔV можемо записати:

$$\Delta V = \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B - \Delta M \cdot V - M \cdot V}{M}. \quad (3.18)$$

Припустивши, що грошова маса M змінилась незначним чином:

$$\Delta V = \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B}{M} - V. \quad (3.19)$$

$\frac{dV}{dt} \cdot \Delta t = \Delta V$, звідки:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \Delta B \cdot C_B + B \cdot C_B}{M \cdot \Delta t} - \frac{V}{\Delta t}, \quad (3.20)$$

де $\Delta t = 1\text{с}$.

Прийнято, що $B \cdot C_B = \beta \cdot W \cdot C_w$, де $1/\beta$ – коефіцієнт прибутку системи:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \Delta B \cdot C_B + \beta \cdot W \cdot C_w}{M} - V. \quad (3.21)$$

Як зазначалось раніше, приріст рівня генерованої електроенергії дизель-генератора визначається рівнянням (3.4).

Із рівняння Фішера, з урахуванням заміни $B \cdot C_B = \beta \cdot W \cdot C_w$ отримано:

$$M \cdot V = B \cdot C_B + \frac{B \cdot C_B}{\beta}, \quad (3.22)$$

або:

$$B = \frac{M \cdot V}{C_B \cdot (1 + \frac{1}{\beta})}. \quad (3.23)$$

Тоді, враховуючи зміну кількості палива ΔB :

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V}{C_B \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot \tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}; \quad (3.24)$$

а система рівнянь прийме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -V + \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \beta \cdot W \cdot C_w}{M} + \frac{\Delta B \cdot C_B}{M}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V}{C_B \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot \tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (3.25)$$

де $\frac{\Delta B \cdot C_B}{M}$ та $\frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – впливи.

Тобто, отримано математичну модель, яка поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором та дозволяє досліджувати динамічну залежність між макроекономічним параметром оборотності грошової маси й електротехнічним параметром рівня генерованої електроенергії.

Аналогічним чином виведено систему рівнянь для дослідження залежності між макроекономічним параметром величини грошової маси M та рівнем генерованої електроенергії W :

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = -M + \frac{\Delta W \cdot C_w + W \cdot \Delta C_w + W \cdot C_w + \beta \cdot W \cdot C_w}{V} + \frac{\Delta B \cdot C_B}{V}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot M \cdot V}{C_B \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot \tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (3.26)$$

Щоб дослідити зміну оборотності грошової маси під час перехідних процесів у електротехнічній системі виконано моделювання у системі MATLAB 2010, використовуючи різні значення параметрів динамічної моделі. Параметри моделі наведено у табл. 3.4, а результати моделювання – на рис. 3.7 – 3.9.

Таблиця 3.4. Параметри моделювання перехідних процесів при різному значенні макроекономічних параметрів системи

Параметр	V_0	M	W_0	ΔC_w	β	ΔB	C_B	η_B	γ	τ
Випадок 1	10	10000 грн	500 Вт·с	$5 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	1	100 л	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	15 с
Випадок 2	10	100 грн	500 Вт·с	$5 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	1	100 л	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	15 с
Випадок 3	10	100 грн	500 Вт·с	$5 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	1	500 л	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	15 с

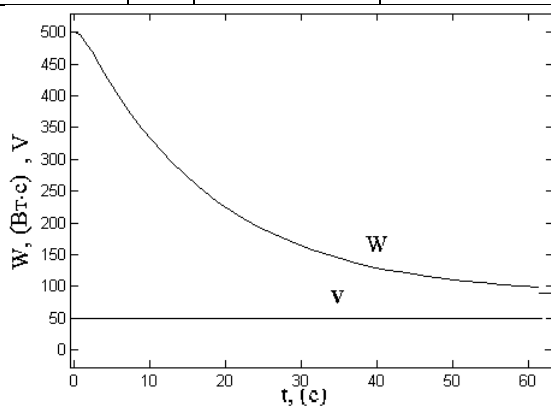


Рис. 3.7. Перехідний процес

генерованої електроенергії при $V =$

const.

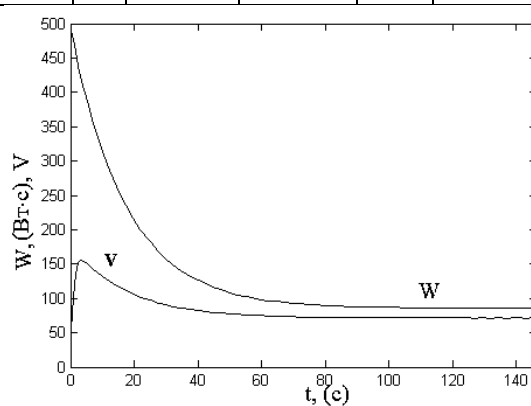


Рис. 3.8. Перехідний процес

генерованої електроенергії при $V =$

var.

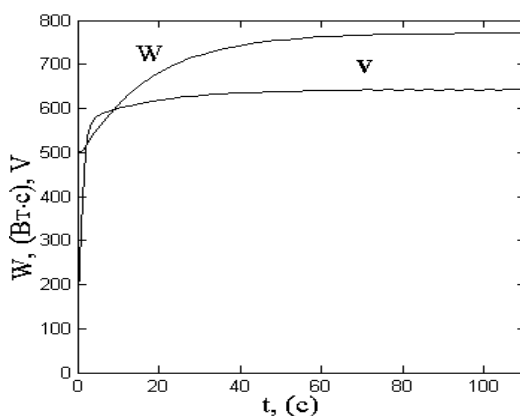


Рис. 3.9. Перехідні процеси при $M =$ const.

У перших двох випадках (табл. 3.4) відбувається перехідний процес генерованої електроенергії під час зменшення її рівня до величини холостого ходу

генератора, що підтримується за рахунок фіксованого обсягу палива. Видно, що зменшення величини грошової маси M призводить до збільшення оборотності V , що відповідає умові балансу рис. 3.7 – 3.8. У третьому випадку відбувається підвищення рівня генерованої електроенергії за рахунок збільшення подачі палива ΔB . При цьому оборотність V також зростає, оскільки грошова маса лишається сталою. Результати моделювання наведено на рис. 3.9. Параметри моделювання наведені у табл. 3.5, результати – на рис. 3.10 – 3.12.

Таблиця 3.5. Параметри моделювання залежності макроекономічних та електротехнічних параметрів системи

Параметр	M_0	V	W_0	ΔC_w	β	ΔB	C_B	η_B	γ	τ
Випадок 1	1000 грн	10	500 Вт · с	5 $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$	1	0 л	50 $\frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	1 $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{л}}$	15 с
Випадок 2	1000 грн	10	500 Вт · с	5 $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$	1	100 л	50 $\frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	1 $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{л}}$	15 с
Випадок 3	1000 грн	10	500 Вт · с	5 $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$	1	1000 л	50 $\frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	1 $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{л}}$	15 с

У першому випадку (табл. 3.5) замкнена макроекономічна система знаходиться у стані рівноваги, тому при сталому значенні оборотності падіння рівня електроенергії до нуля спричинить відповідне падіння грошової маси до нуля. У другому випадку (табл. 3.5) генератор переходить у режим холостого ходу, відповідно грошова маса зменшується до величини, необхідної для забезпечення дизель-генератором рівня генерації електроенергії холостого ходу. У третьому

випадку, наведеному в табл. 3.5, демонструється вплив збільшення подачі палива на зростання рівня електроенергії генератора і відповідне зростання грошової маси.

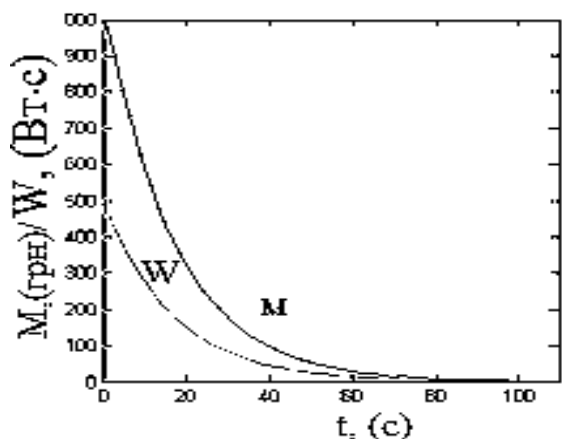


Рис. 3.10. Зв'язок між рівнем генерованої електроенергії і грошовою масою

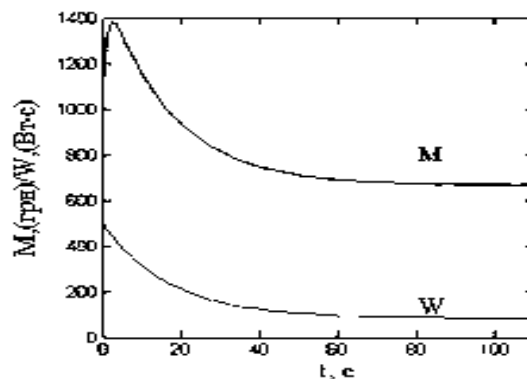


Рис. 3.11. Зв'язок між рівнем генерованої електроенергії і грошовою масою

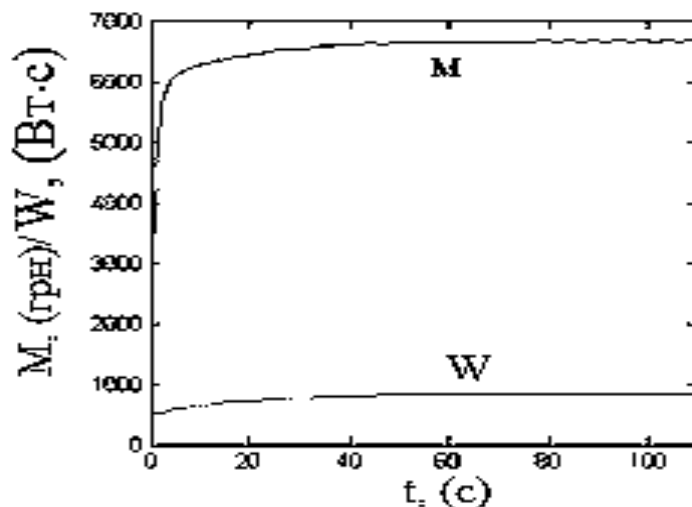


Рис. 3.12. Зв'язок між рівнем генерованої електроенергії і грошовою масою

Запропоновані зміни у динамічній електро-вартісній математичній моделі ізольованої генеруючої системи дозволяють досліджувати зв'язок між макроекономічними параметрами системи та її електротехнічними параметрами, враховуючи наявність перехідних процесів при зміні режимів роботи генератора.

3.4 Перехідні процеси у малому

3.4.1. Для дослідження перехідних процесів у малому використано спрощений запис системи (3.9) в якому виконано заміну:

$$M \cdot V = A; \quad (3.27)$$

$$1 + \beta + \frac{\Delta W}{W} = B; \quad (3.28)$$

$$\frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B} = F; \quad (3.29)$$

$$\Delta K_B = \Delta B \cdot C_B; \quad (3.30)$$

$$\Delta W_\tau = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \quad (3.31)$$

тоді система рівнянь (3.9) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{A}{W} - C_w \cdot B - \Delta K_B \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + C_w \cdot W \cdot F + \Delta W_\tau. \end{cases} \quad (3.32)$$

Для дослідження в малому використано лінеаризацію рівнянь за допомогою розкладення нелінійностей відносно точок спокою W_0 і $C_w \cdot W$. При розкладенні нелінійності $\frac{1}{W}$ в околі певної точки W_0 у ряд Тейлора [72], з урахуванням лише лінійних складових ряду, отримано:

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_0} - \frac{W - W_0}{W_0^2}. \quad (3.33)$$

Нелінійність $C_w \cdot W$ апроксимована лінійним виразом $C_w \cdot W = a \cdot C_w + b \cdot W$, де a, b – константи, значення яких можна отримати, маючи значення C_w та W після завершення перехідних процесів. Наприклад, для параметрів системи, наведених у табл. 3.6, $C_w = 100$, $W = 50$ (див. рис. 3.13). Тоді $a=10$, $b=80$.

Із другого рівняння системи (3.32), з урахуванням проведених замін та розкладання нелінійностей, отримано:

$$\frac{dW}{dt} = a \cdot F \cdot C_w + b \cdot F \cdot W - \frac{W}{\tau} + \Delta W_\tau, \text{ звідки } C_w = \frac{\frac{dW}{dt} + \frac{W}{\tau} - \Delta W_\tau - b \cdot F \cdot W}{a \cdot F}. \quad (3.34)$$

Здійснвши перехід до $\frac{dC_w}{dt} = \frac{d^2W}{dt^2} \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F}\right) + \frac{dW}{dt} \cdot \left(\frac{1}{\tau \cdot a \cdot F} - \frac{b}{a}\right)$ та підставивши вираз для C_w та $\frac{dC_w}{dt}$ у перше рівняння системи (3.32), отримаємо лінійне диференційне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами.

$$\frac{d^2W}{dt^2} \cdot a_1 + \frac{dW}{dt} \cdot a_2 + W \cdot a_3 + a_4 = 0, \quad (3.35)$$

де

$$a_1 = \frac{1}{\alpha \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}} \quad (3.36)$$

$$a_2 = \frac{1 + \beta}{\alpha \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}} \quad (3.37)$$

$$a_3 = \frac{1 + \beta}{\alpha \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}} - \frac{b \cdot (1 + \beta)}{a} + \frac{M \cdot V}{W_0^2}, \quad (3.38)$$

$$a_4 = \frac{1}{\tau \cdot \alpha \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}} - \frac{b}{a} - \frac{2 \cdot M \cdot V}{W_0} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B \cdot (1 + \beta)}{\tau \cdot \alpha \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}} + \Delta B \cdot C_B. \quad (3.39)$$

Корені характеристичного рівняння $\lambda_{1,2} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1}$ при параметрах системи, наведених у табл. 3.6, є дійсними, тому розв'язком рівняння відносно W є вираз:

$$W = C_1 \cdot e^{t \cdot \left(\frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1}\right)} + C_2 \cdot e^{t \cdot \left(\frac{-a_2 - \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1}\right)} - \frac{a_4}{a_3}. \quad (3.40)$$

Продиференціювавши праву частину виразу для W у співвідношенні (3.40) по t , та підставивши отримані значення W та $\frac{dW}{dt}$ у друге рівняння системи (3.32), та виразивши C_w , отримано:

$$C_w = C_1 \cdot \left(\frac{\lambda_1}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_1} + C_2 \cdot \left(\frac{\lambda_2}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_2} - \left(\frac{a_4}{\tau \cdot a_3 \cdot a \cdot F} + \frac{\Delta W_\tau}{a \cdot F} - \frac{b \cdot F \cdot a_4}{a_3 \cdot a \cdot F}\right). \quad (3.41)$$

Отримане рівняння необхідно сприймати як оцінку впливу електротехнічних параметрів системи на можливе відхилення вартості одиниці електроенергії, що може бути використана власником генеруючої системи для зміни поточного тарифу.

Для порівняння лінеаризованої динамічної моделі та нелінійної моделі виконаємо розрахунок перехідних процесів у системі за допомогою нелінійної моделі. Параметри системи наведені у табл. 3.6, результати моделювання представлено на рис. 3.13.

Таблиця 3.6. Параметри системи при використанні нелінійної моделі для симуляції перехідних процесів

Параметр	M	V	W	C_w	β	ΔB	C_B	η_B	γ	τ
Значення	1000 грн	10	500 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	1	0 л	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	15 с

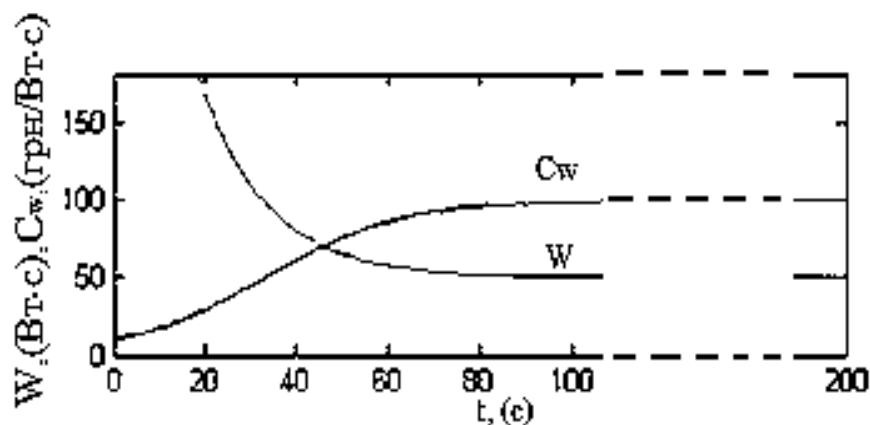


Рис. 3.13. Перехідні процеси у динамічній моделі

Лінеаризація диференціальних рівнянь виконана у околі трьох точок, обраних на початку перехідного процесу (W_{01}) та $\pm 10\%$ від початкового значення, (W_{02}, W_{03}). У результаті розв'язання рівнянь отримані наступні дійсні корені, що визначають експоненційно затухаючий перехідний процес при відповідних параметрах:

$$W_{01} = 500 \text{ Вт} \cdot \text{с}: \lambda_1 = -0.0148, \lambda_2 = -1.9852; W_{02} = 550 \text{ Вт} \cdot \text{с}: \lambda_1 = 0.0191, \\ \lambda_2 = -1.9809; W_{03} = 450 \text{ Вт} \cdot \text{с}: \lambda_1 = -0.0219, \lambda_2 = -1.9781.$$

За допомогою отриманих рівнянь визначаються параметри системи, що призводять до виникнення коливань у перехідному процесі. Наявність коливань вказує зв'язок тарифної вартості з додатковими витратами палива, а також на відхилення реальних економічних параметрів системи від прогнозованих.

Необхідно правильно оцінити вплив зміни економічних параметрів на коливання у перехідному процесі. Відомо, що комплексно-спряжені корені характеристичного рівняння відповідають експоненційному перехідному процесу із коливальними складовими. Із рівняння (3.35) видно, що для наявності комплексних коренів дискримінант $D = a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3$ повинен бути меншим нуля. Враховуючи введені раніше заміни, отримаємо:

$$\left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{W_0^2}\right)\right) < 0, \quad (3.42)$$

$$\text{де } B = 1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}, F = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}, A = M \cdot V.$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{W_0^2}\right)\right) &= \left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{B \cdot t_0^2 - b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot t_0^2 + A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot W_0^2}\right) = \\ &= \frac{B^2 \cdot \tau \cdot W_0^2 - 4 \cdot B \cdot W_0 + 4 \cdot b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot W_0^2 - 4 \cdot A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot W_0^2}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Оскільки $(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot W_0^2 = \left(a \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}\right)^2 \cdot \tau \cdot W_0^2 > 0$, то має місце наступна нерівність:

$$(1 + \beta)^2 \cdot \tau \cdot W_0^2 + \frac{4 \cdot b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot W_0^2}{C_B} < 4 \cdot (1 + \beta) \cdot W_0 + \frac{4 \cdot M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{C_B}. \quad (3.44)$$

При виконанні даної умови корені характеристичного рівняння є комплексними. Із нерівності (3.44) отримано вираз для максимальної величини конкретних економічних параметрів системи, перевищення якої призведе до наявності коливань у перехідному процесі. Приймаючи M_{max} як максимально допустиму величину грошової маси, при якій дискримінант $D = 0$ та перехідний процес ще залишається експоненційно затухаючим отримано:

$$M_{max} = \frac{(1 + \beta) \cdot W_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}. \quad (3.45)$$

Аналогічним чином можна отримати рівняння для граничного значення оборотності грошової маси V . Із нерівності (3.44) отримаємо максимально допустиму величину оборотності V_{max} :

$$V_{max} = \frac{(1 + \beta) \cdot W_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot M \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}. \quad (3.46)$$

Для системи із параметрами, наведеними у табл. 3.6:

$M_{max} = 2956500$ грн., для випадку лінеаризації у околі точки $W_{03} = 450$ Вт · с.

При перевищенні цієї величини корені характеристичного рівняння є комплексними. Наприклад, прийнявши грошову масу $M = 5006500$ грн., отримано корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = -1,0000 + 0,8215i$, $\lambda_2 = -1,0000 - 0,8215i$. Бажаний перехідний процес величини W повинен має вигляд, наведений на рис. 3.14.

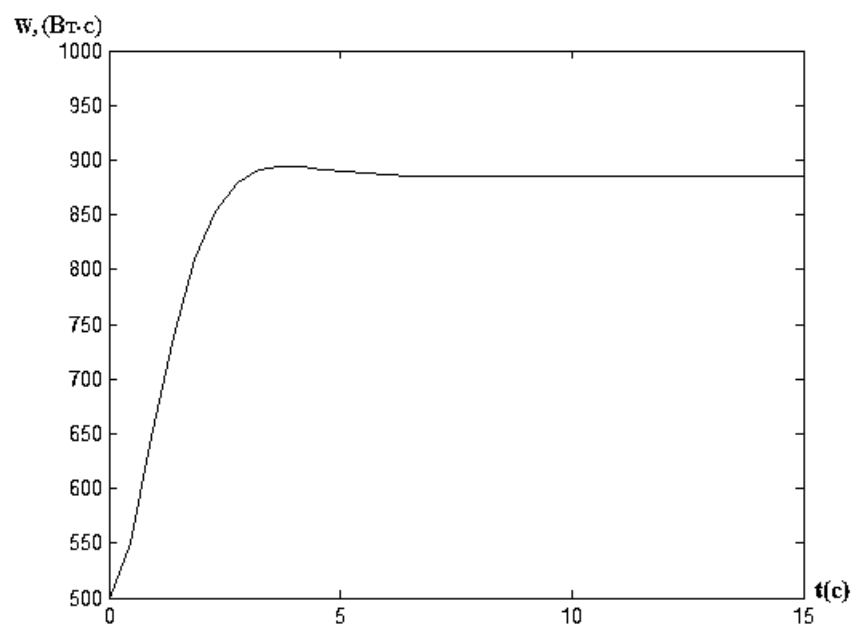


Рис. 3.14. Бажаний перехідний процес рівня генерованої електроенергії

Із результату моделювання видно, що зростання грошової маси M призводить до появи коливальної складової перехідного процесу, а отже і до незапланованих витрат палива, що, в свою чергу, погіршує ефективність роботи системи, оскільки вартість електроенергії повинна бути скоригована відповідно. У випадку, коли параметри системи не дозволяють повністю позбутися коливань у перехідному процесі, доцільним є зменшення коливальності, тобто амплітуди і кількості коливань під час затухання перехідних процесів. Критерій коливальності μ [73] визначається наступним чином:

$\mu = \left| \frac{Im(\lambda_1)}{Re(\lambda_1)} \right|$, для випадку двох комплексно-спряжених коренів. Тобто як відношення уявної частини до дійсної частини у найближчому комплексно-спряженому корені.

При збільшенні μ зростає коливальність системи

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B) \pm \sqrt{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1+\beta) - b \cdot (1+\beta)) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{W_0^2}}}{2}, \quad (3.47)$$

$$Re(\lambda)_1 = \frac{-(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2}, \quad (3.48)$$

$$Im(\lambda_1) = \frac{\sqrt{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1+\beta) - b \cdot (1+\beta)) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{W_0^2}}}{2}. \quad (3.49)$$

Параметри β , τ та C_B вважаються сталими, так як змінювати їх під час роботи системи не має можливості. Із рівняння (3.45) видно, що зниження економічних параметрів, а саме грошової маси M або оборотності V , викличе зменшення уявної частини комплексного кореня, що призведе до зменшення коливальності перехідного процесу і відповідного зменшення витрат палива.

Для демонстрації впливу збільшення величини грошової маси M на зростання коливань перехідного процесу проведено моделювання із параметрами $M = 1500$ грн (рис. 3.15, випадок 1) та $M = 5000$ грн (рис. 3.15, випадок 2). Значення інших параметрів системи наведено у табл. 3.7.

Таблиця 3.7. Параметри системи крім величини грошової маси

Параметр	V	W_0	C_w	β	ΔB	C_B	η_B	γ	τ
Значення	10	500 Вт · с	10 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$	1	0 л	50 $\frac{\text{грн}}{\text{л}}$	0,5	1 $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{л}}$	1 с

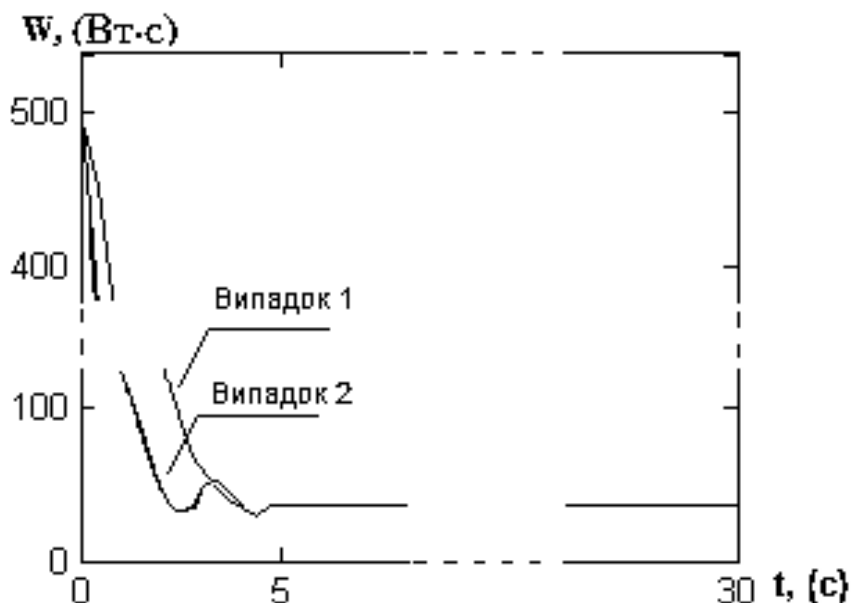


Рис. 3.15. Коливання у перехідному процесі рівня генерованої електроенергії

Графічні результати демонструють залежність коливальності від величини грошової маси, а саме її збільшення при збільшенні величини M . При параметрах, наведених у табл. 3.7, збільшення величини грошової маси у три рази викликає виникнення коливання.

3.5. Зв'язок економічних параметрів з тривалістю перехідного процесу

За допомогою отриманих коренів характеристичних рівнянь можна оцінити зв'язок економічних параметрів системи з тривалістю перехідного процесу при зміні рівня генерованої електроенергії. Тривалість перехідних процесів генератора має безпосередній вплив на економічні параметри ізолюваної системи, тобто на відхилення реальної вартості одиниці електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого у існуючій моделі щогодинної тарифікації [74].

Тривалість перехідного процесу t_p обернено пропорційна величині критерію η та визначається за формулою $t_p \leq \frac{1}{\eta} \cdot \ln \frac{1}{\Delta}$, де Δ – половина ширини області, при потраплянні в яку перехідний процес вважається завершеним. За інших рівних умов від системи вимагають збільшення η і зниження μ .

Для випадку дійсних коренів характеристичних рівнянь досліджуваної лінеаризованої системи критерій η чисельно дорівнює найменшому за модулем кореню із пари, тобто $\eta = \lambda_1$. Враховуючи виконані заміни:

$$\eta = \left| \frac{-(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1+\beta) - b \cdot (1+\beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{W_0^2})}}{2} \right|. \quad (3.50)$$

Із отриманого виразу (3.50) видно, що зростання величини економічних параметрів M та V викликає відповідне збільшення величини критерія η , а отже і зменшення тривалості перехідного процесу. На рис. 3.16 наведено бажаний графік перехідного процесу для рівня електроенергії W при двох різних значеннях грошової маси M .

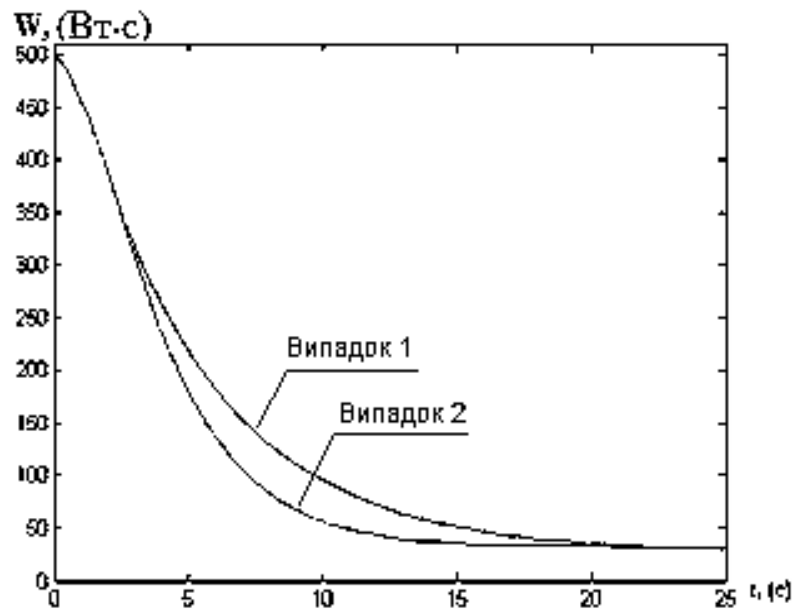


Рис. 3.16. Бажаний графік перехідного процесу рівня електроенергії

Прийнято, що у випадку 1 грошова маса $M = 300$ грн, а у випадку 2 $M = 1000$ грн.

Наведені дані свідчать, що збільшення величини грошової маси, при інших сталих параметрах, призводить до зменшення тривалості перехідного процесу. Аналогічні висновки можна зробити і про залежність тривалості перехідного процесу від оборотності.

У випадку комплексних коренів характеристичного рівняння величина критерію η буде дорівнювати дійсній складовій комплексної величини λ_1 .

$$\eta = \operatorname{Re}\left(\frac{-(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1+\beta) - b \cdot (1+\beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2}\right) = \frac{(1+\beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2}. \quad (3.51)$$

У цьому випадку на тривалість перехідного процесу будуть мати вплив лише такі економічні параметри системи як вартість палива C_B та коефіцієнт, обернений до прибутку системи, β . Отже, отримані результати демонструють вплив економічних параметрів M та V на характер перехідного процесу.

Проведені дослідження впливу економічних параметрів системи на тривалість перехідних процесів демонструють, що при зміні економічних параметрів системи необхідно дотримуватися балансу між втратами, що викликані коливальними складовими та втратами, пов'язаними із тривалістю перехідних процесів.

3.6. Перехідні процеси зміни вартості при зміні рівня генерованої електроенергії

3.6.1. Лінійна функція зміни генерованої електроенергії. Перше рівняння системи (3.9) описує динамічну зміну C_w в залежності від рівня електроенергії :

Покладемо, що рівень електроенергії W є функцією, що лінійно залежить від часу t та може бути представлена у вигляді:

$W = k \cdot t$, де k – певний коефіцієнт. В такому випадку рівняння приросту вартості одиниці електроенергії з (3.9) має вигляд:

$$\frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{k \cdot t} - C_w \cdot (1 + \beta) - \Delta B_w \cdot C_B, \quad (3.52)$$

та є неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку:

$$y' + p(x) \cdot y = q(x), \text{ причому } p(x) = \text{const.}$$

Виконаємо заміну:

$$dC_w = y, t = x, W = k \cdot x, M \cdot V = a, (1 + \beta) = b, \Delta B_w \cdot C_B = K_B;$$

$$y' + b \cdot y = \frac{a}{k \cdot x} - K_B. \quad (3.53)$$

Отримане неоднорідне рівняння розв'язується за допомогою методу Бернуллі [73]. Нехай $y = u \cdot v$, де u та v – невідомі функції від x . В такому випадку $y' = u' \cdot v + u \cdot v'$, а рівняння (3.53) приймає вигляд:

$$u' \cdot v + u \cdot (v' + b \cdot v) = \frac{a}{k \cdot x} - K_B. \quad (3.54)$$

Для простоти розв'язання рівняння було розглянуто випадок, коли $v' + b \cdot v = 0$, тоді рівняння (3.54) матиме вигляд:

$u' \cdot v = \frac{a}{k \cdot x} - K_B$. В результаті була отримана система однорідних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} v' + b \cdot v = 0 \\ u' \cdot v = \frac{a}{k \cdot x} - K_B \end{cases} \quad (3.55)$$

Із першого рівняння системи (3.55):

$$v' = -b \cdot v. \quad (3.56)$$

Виконавши перехід від запису похідної функції у вигляді v' до $\frac{dv}{dx}$, помноживши обидві частини рівняння на dx та здійснивши інтегрування:

$$\int dv = -b \cdot v \cdot \int dx, \quad (3.57)$$

отримано вираз:

$$\ln|v| = -b \cdot x. \quad (3.58)$$

Представивши праву частину виразу (3.58) у вигляді $\ln|e^{-b \cdot x}|$ та виконавши потенціювання обох частин отримаємо рівняння:

$$v = e^{-b \cdot x}. \quad (3.59)$$

Підставивши результат у друге рівняння системи (3.56), отримаємо:

$$u' \cdot e^{-b \cdot x} = \frac{a}{k \cdot x} - K_B. \quad (3.60)$$

Виконавши перехід від запису похідної функції у вигляді u' до $\frac{du}{dx}$, помноживши обидві частини рівняння на dx та здійснивши інтегрування:

$$du = \left(\frac{a \cdot e^{b \cdot x}}{k \cdot x} - K_B \cdot e^{b \cdot x} \right) \cdot dx, \quad (3.61)$$

$$u = \frac{a}{k} \cdot \int \frac{e^{b \cdot x}}{x} \cdot dx - K_B \cdot \int e^{b \cdot x} \cdot dx. \quad (3.62)$$

Повертаючись до заміни:

$$y = \left(\frac{a}{k} \cdot \int \frac{e^{b \cdot x}}{x} \cdot dx - K_B \cdot \int e^{b \cdot x} \cdot dx \right) \cdot e^{-b \cdot x}. \quad (3.63)$$

Виконавши інтегрування та спростивши вираз отримано:

$$y = \left(\frac{a}{k} \cdot Ei(b \cdot x) + C_1 - \frac{K_B}{b} \cdot e^{b \cdot x} - C_2 \right) \cdot e^{-b \cdot x} = \frac{a}{k \cdot e^{b \cdot x}} \cdot Ei(b \cdot x) - \frac{K_B}{b} + \frac{C_3}{e^{b \cdot x}}, \quad (3.64)$$

звідки, повертаючись до попередніх замін:

$$C_w = \frac{M \cdot V}{k \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} \cdot Ei((1 + \beta) \cdot t) - \frac{K_B}{(1+\beta)} + \frac{C_3}{e^{(1+\beta) \cdot t}}. \quad (3.65)$$

Невідома константа C_3 визначається за допомогою початкової умови, у якості якої зазвичай виступає відоме значення змінної у початковий момент часу $t = 0$: $C_w(0) = C_{w0}$. Однак, завдяки наявності інтегральної показникової функції у рівнянні (3.65), у момент часу $t = 0$ константа C_3 дорівнює нескінченності, а графік функції C_w має розрив. В такому випадку, для чисельного розв'язання рівняння (3.65), у якості початкової умови доцільно прийняти значення змінної C_w у інший момент часу, що слугуватиме початком відліку. Наприклад, нехай $C_w(1) = C_{wx.x}$, де $C_{wx.x}$ – вартість одиниці електроенергії холостого ходу генератора. Тоді, приймаючи $t = 1$ та виразивши невідому константу з рівняння (3.65) отримано:

$$C_3 = -\frac{M \cdot V}{k} \cdot Ei(1 + \beta) + \frac{K_B \cdot e^{(1+\beta)}}{(1+\beta)} + C_{wx.x} \cdot e^{(1+\beta)}. \quad (3.66)$$

Підставляючи вираз для C_3 у рівняння (3.65) та провівши спрощення отримано рівняння:

$$C_w = \frac{M \cdot V}{k \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} \cdot Ei((1 + \beta) \cdot t) - \frac{K_B}{(1+\beta)} - \frac{M \cdot V}{k \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} \cdot Ei(1 + \beta) + \frac{K_B \cdot e^{(1+\beta-t)}}{(1+\beta)} + C_{wx.x} \cdot e^{(1+\beta-t)} = \frac{M \cdot V \cdot (Ei((1+\beta) \cdot t) - Ei(1+\beta))}{k \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} + \frac{K_B \cdot (e^{(1+\beta-t)} - 1)}{(1+\beta)} + C_{wx.x} \cdot e^{(1+\beta-t)}. \quad (3.67)$$

При роботі генеруючої системи рівень генерованої електроенергії якої змінюється від певної величини холостого ходу $W_{x.x}$ до величини усталеного режиму $W_{y.p}$. Тривалість та амплітуда перехідного процесу вартості одиниці електроенергії C_w при цьому залежить від економічних параметрів системи, а також від зміни W . Враховуючи лінійну залежність генерованої електроенергії від часу t , виражену за допомогою коефіцієнта k , доцільним є дослідження впливу цього коефіцієнта на перехідний процес вартості одиниці електроенергії.

На рис. 3.18 наведено графічні результати моделювання перехідного процесу вартості одиниці електроенергії при відповідній зміні рівня генерованої електроенергії від $W_{x.x.}$ до $W_{y.p.}$. Графік зміни рівня електроенергії наведено на рис. 3.17. Параметри моделювання наведені у Випадку 1 табл. 3.8. У Випадку 2 та Випадку 3 коефіцієнт k змінено. В залежності від цього змінювалась залежність часу виходу генератора на режим $W_{y.p.}$, а також тривалість та амплітуда перехідного процесу C_w . Параметри моделювання наведено у Випадку 2 та Випадку 3 табл. 3.8. Графічні результати моделювання наведено на рис. 3.17–3.22 відповідно.

Таблиця 3.8. Параметри моделювання

Параметр	M	V	β	K_B	$C_{wx.x.}$	k	$W_{x.x.}$	$W_{y.p.}$
Випадок 1	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	0.1	0.1 Вт·с	1000 Вт·с
Випадок 2	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	1	0.1 Вт·с	1000 Вт·с
Випадок 3	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	10	0.1 Вт·с	1000 Вт·с

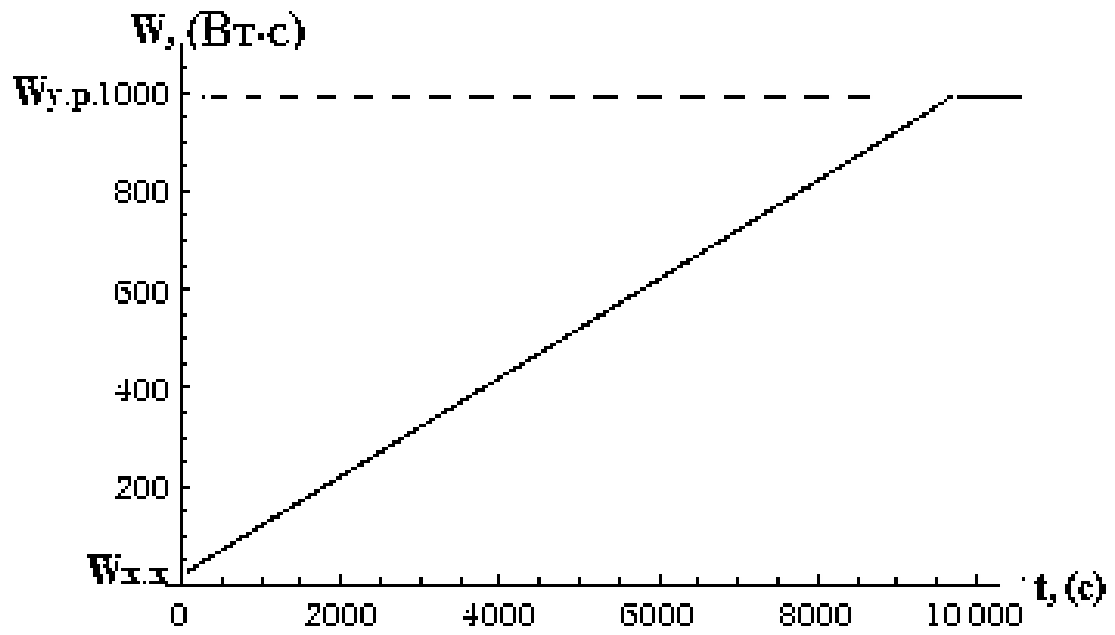


Рис. 3.17 Випадок 1. Зміна рівня генерованої електроенергії

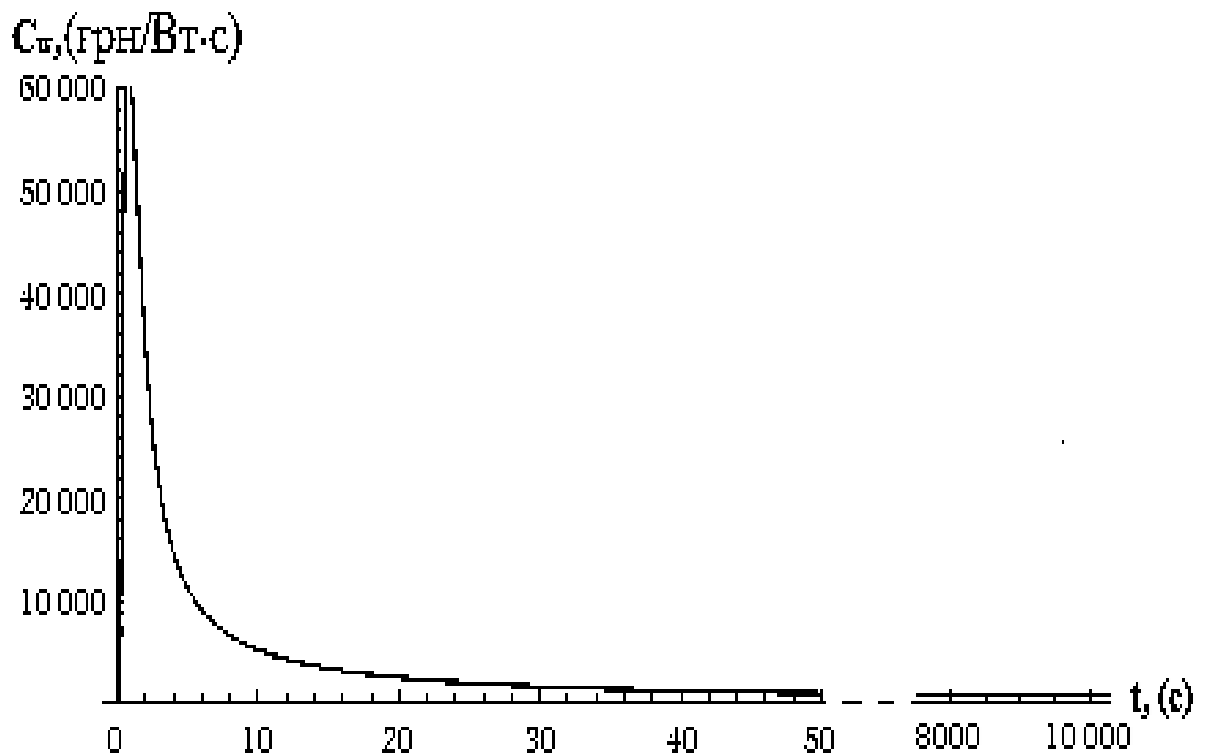


Рис. 3.18 Випадок 1. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії

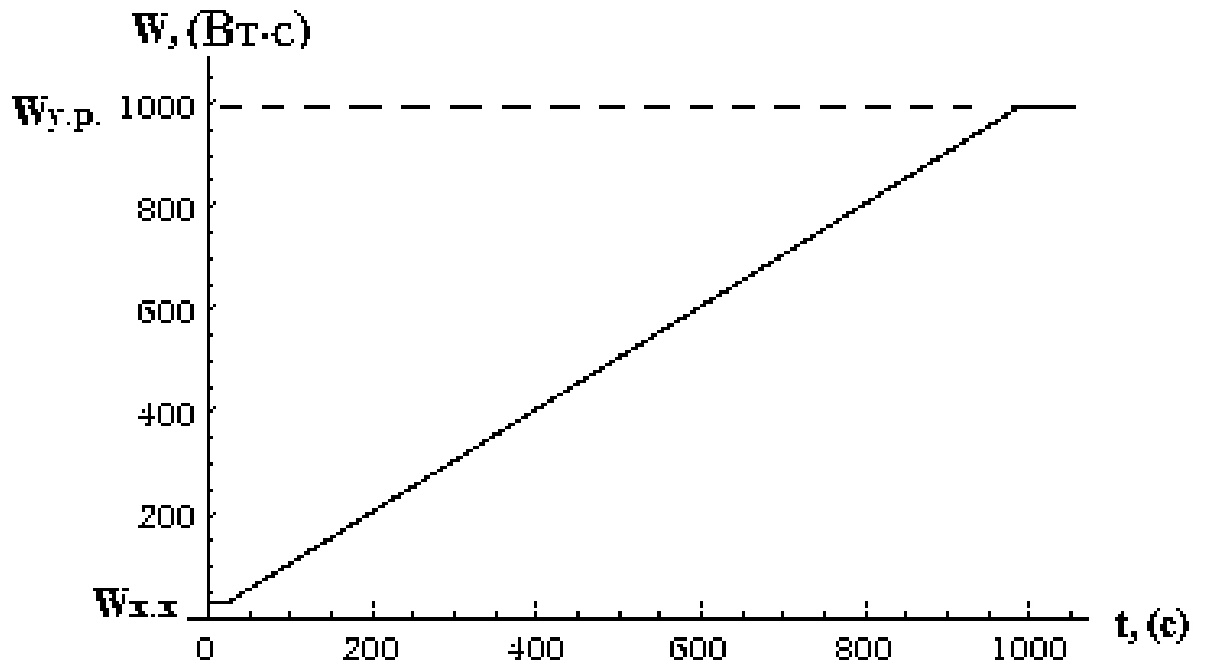


Рис. 3.19 Випадок 2. Зміна рівня генерованої електроенергії

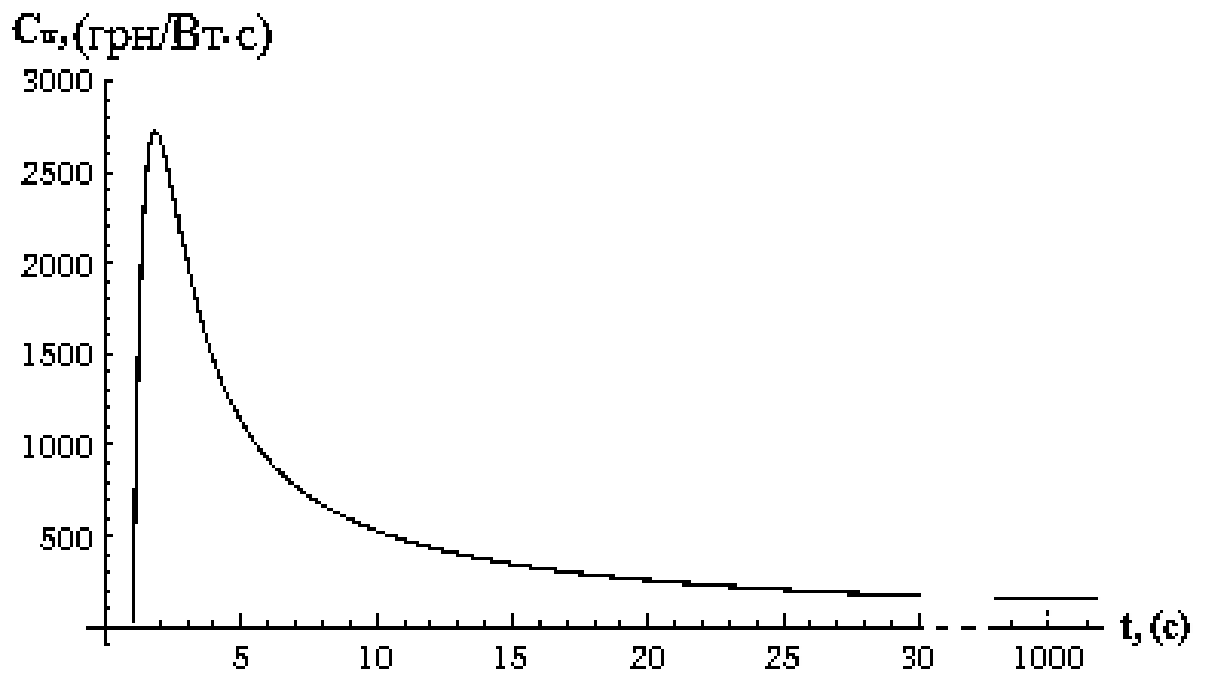


Рис. 3.20 Випадок 2. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії

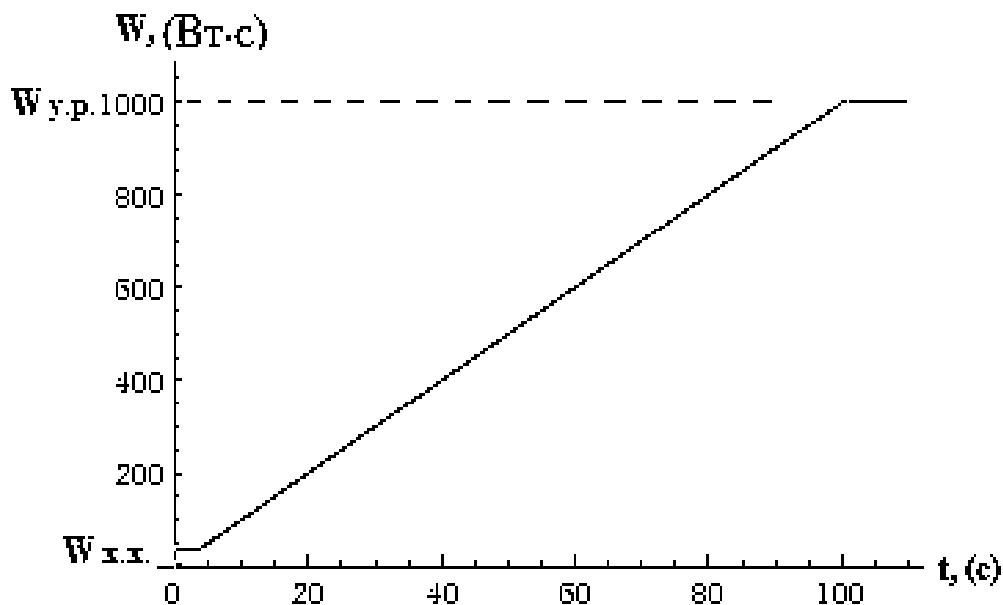


Рис. 3.21 Випадок 3. Зміна рівня генерованої електроенергії

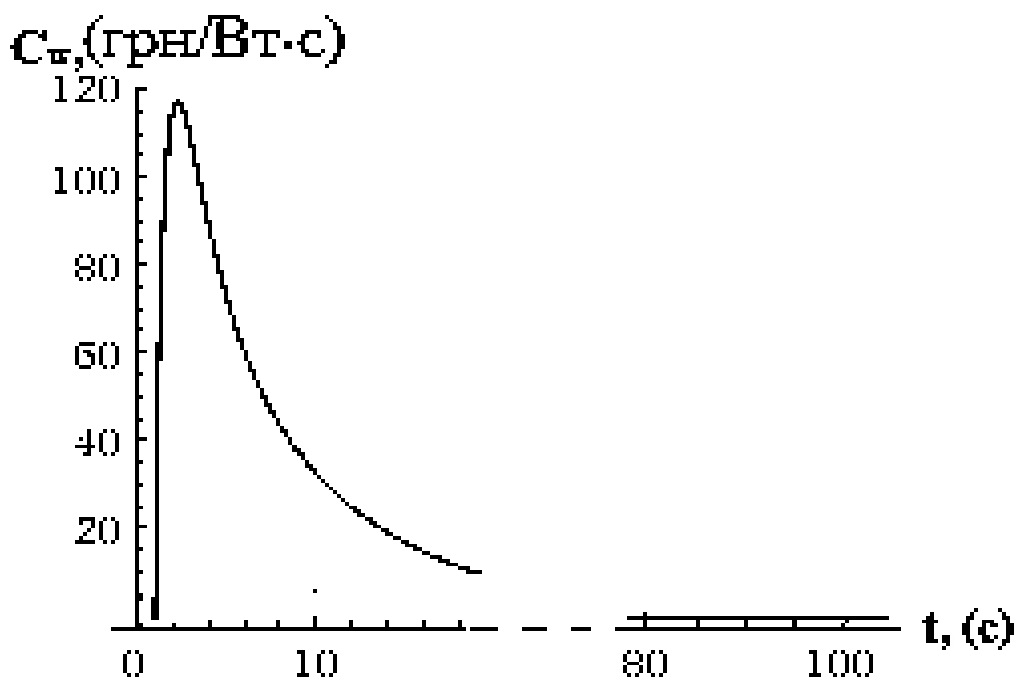


Рис. 3.22 Випадок 3. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії

На рис. 3.17 – 3.22 показано, що стрибок вартості одиниці електроенергії у 120, 14, 5 разів більший за усталене значення при відповідному значенні тривалості виходу генератора на заданий режим роботи, яке дорівнює 10000 с, 1000 с, 100 с.

Із результатів моделювання видно, що при зменшенні часу виходу генератора на заданий режим потужності також зменшується стрибок вартості одиниці електроенергії і тривалість перехідного процесу при її зміні. Подібні результати були отримані при дослідженні пришвидшення виходу генератора на режим із використанням динамічної електро-вартісної моделі [9]. Однак, при збільшенні коефіцієнта k для відповідного пришвидшення виходу генератора на режим, необхідно також враховувати зміну питомої ефективної витрати палива E_x . Питома ефективна витрата палива залежить від числа обертів n двигуна (об/хв), та є одним із вагомих параметрів при побудові системи на основі дизель-генератора. Для прикладу на рис. 2.23 наведено залежність $E_x = f(n)$ дизельного генератора HATZ 1D90-Supra [76].

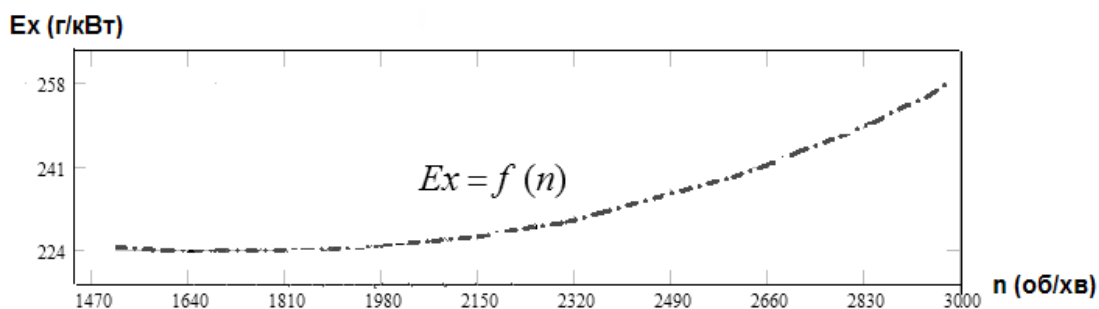


Рис. 2.23 Питома витрата палива дизельного двигуна HATZ 1D90-Supra

Очевидно, що для швидкого досягнення генератором заданого рівня потужності, та відповідно прискорення виходу на новий режим генерації електроенергії, необхідно збільшувати кількість обертів n , що, в свою чергу, призведе до зростання питомої витрати палива. Тобто, як було зазначено при створенні динамічної математичної моделі, приріст рівня генерованої електроенергії ΔW викликатиме приріст обсягу палива ΔB , спричинений збільшенням кількості обертів n .

3.6.2. Експоненційна функція зміни генерованої електроенергії. У загальному випадку залежність генерованої електроенергії W від часу представимо у вигляді експоненційної функції $W = Z \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$, де Z та k - певні коефіцієнти. У такому випадку рівняння (3.53) матиме вигляд:

$y' + b \cdot y = \frac{a}{Z \cdot (1 - e^{-k \cdot x})} - K_B$, та може бути розв'язане аналогічним чином, методом Бернуллі [75]. Тоді:

$$u' \cdot v + u \cdot (v' + b \cdot v) = \frac{a}{Z \cdot (1 - e^{-k \cdot x})} - K_B, \quad (3.68)$$

Для спрощення розв'язання рівняння розглянемо частковий випадок, коли $v' + b \cdot v = 0$, тоді

$$\begin{cases} v' + b \cdot v = 0 \\ u' \cdot v = \frac{a}{Z \cdot (1 - e^{-k \cdot x})} - K_B \end{cases} \quad (3.69)$$

З першого рівняння системи (3.69), виразивши v' та виконавши перехід від запису похідної функції у вигляді v' до $\frac{dv}{dx}$, помноживши обидві частини рівняння на dx та здійснивши інтегрування, а потім, представивши праву частину отриманого виразу у вигляді $\ln|e^{-b \cdot x}|$ та виконавши потенціювання обох частин, отримано рівняння:

$$v = e^{-b \cdot x}, \quad (3.70)$$

підставивши результат у друге рівняння системи (3.69), отримано:

$$u' \cdot e^{-b \cdot x} = \frac{a}{Z \cdot (1 - e^{-k \cdot x})} - K_B. \quad (3.71)$$

Виконавши перехід від запису похідної функції у вигляді u' до $\frac{du}{dx}$, помноживши обидві частини рівняння на dx та розділивши на $e^{-b \cdot x}$, здійснивши інтегрування отримано:

$$u = a \cdot \int \frac{e^{b \cdot x}}{Z \cdot (1 - e^{-k \cdot x})} dx - K_B \cdot \int e^{b \cdot x} \cdot dx = -\frac{a \cdot e^{(b+k) \cdot x} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{b+k}{k}, 2 + \frac{b}{k}, e^{k \cdot x}\right)}{Z \cdot (b+k)} + C_1 - \frac{K_B \cdot e^{b \cdot x}}{b} - C_2, \quad (3.72)$$

де ${}_2F_1\left(1, \frac{b+k}{k}, 2 + \frac{b}{k}, e^{k \cdot x}\right)$ – гіпергеометрична функція [77].

Повертаючись до попередніх замін:

$$y = \left(-\frac{a \cdot e^{(b+k) \cdot x} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{b+k}{k}, 2 + \frac{b}{k}, e^{k \cdot x}\right)}{Z \cdot (b+k)} + C_1 - \frac{K_B \cdot e^{b \cdot x}}{b} - C_2 \right) \cdot e^{-b \cdot x} =$$

$$-\frac{a \cdot e^{k \cdot x} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{b+k}{k}, 2 + \frac{b}{k}, e^{k \cdot x}\right)}{Z \cdot (b+k)} - \frac{K_B}{b} + \frac{C_3}{e^{b \cdot x}}. \quad (3.73)$$

Враховуючи першу заміну:

$$C_w = -\frac{M \cdot V \cdot e^{k \cdot t} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{(1+\beta+k)}{k}, 2 + \frac{(1+\beta)}{k}, e^{k \cdot t}\right)}{Z \cdot (1+\beta+k)} - \frac{K_B}{(1+\beta)} + \frac{C_3}{e^{(1+\beta) \cdot t}}. \quad (3.74)$$

Для чисельного розв'язання необхідно визначити константу C_3 , виходячи із початкової умови: $C_w(0) = C_{wx.x}$. Однак, як і у попередньому випадку, у момент часу $t_0 = 0$ функція C_w матиме розрив, оскільки за такої умови гіпергеометрична функція ${}_2F_1\left(1, \frac{(1+\beta+k)}{k}, 2 + \frac{(1+\beta)}{k}, 1\right)$ дорівнює нескінченності. У якості початкової умови доцільно обрати вартість одиниці електроенергії у інший момент часу. Для зручності обрано $t_0 = 1$ с. Тоді, приймаючи $t = 1$ та виразивши невідому константу C_3 з рівняння (3.74) отримано:

$$C_3 = \frac{M \cdot V \cdot e^{(1+\beta+k)} \cdot {}_2F_1\left(1, \frac{(1+\beta+k)}{k}, 2 + \frac{(1+\beta)}{k}, e^k\right)}{Z \cdot (1+\beta+k)} + \frac{K_B \cdot e^{(1+\beta)}}{(1+\beta)} + C_{wx.x} \cdot e^{(1+\beta)}. \quad (3.75)$$

Підставляючи вираз для C_3 у рівняння (3.71) та провівши спрощення отримано рівняння:

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

$$+ \frac{K_B \cdot e^{(1+\beta) \cdot (1-t)}}{(1+\beta)} + C_{wx.x} \cdot e^{(1+\beta) \cdot (1-t)}. \quad (3.76)$$

На рис. 3.24 наведено графік зміни рівня генерованої електроенергії від $W_{x.x}$ до $W_{y.p}$. Параметри моделювання наведені у табл. 3.9. Перехідний процес зміни вартості одиниці електроенергії C_w , викликаний зміною рівня генерованої електроенергії, наведено на рис. 3.25.

Таблиця 3.9. Параметри моделювання перехідних процесів

Параметр	Z	k	M	V	β	K_B	$C_{wx.x.}$	$W_{x.x.}$	$W_{y.p.}$
Випадок 4	100 л	0.2	1000 грн	10	1	1 грн	$0.25 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	0.1 Вт· с	500 Вт· с
Випадок 5	100 л	0.5	1000 грн	10	1	1 грн	$0.25 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	0.1 Вт· с	500 Вт· с
Випадок 6	100 л	2	1000 грн	10	1	1 грн	$0.25 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	0.1 Вт· с	500 Вт· с
Випадок 7	100 л	5	1000 грн	10	1	1 грн	$0.25 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	0.1 Вт· с	500 Вт· с

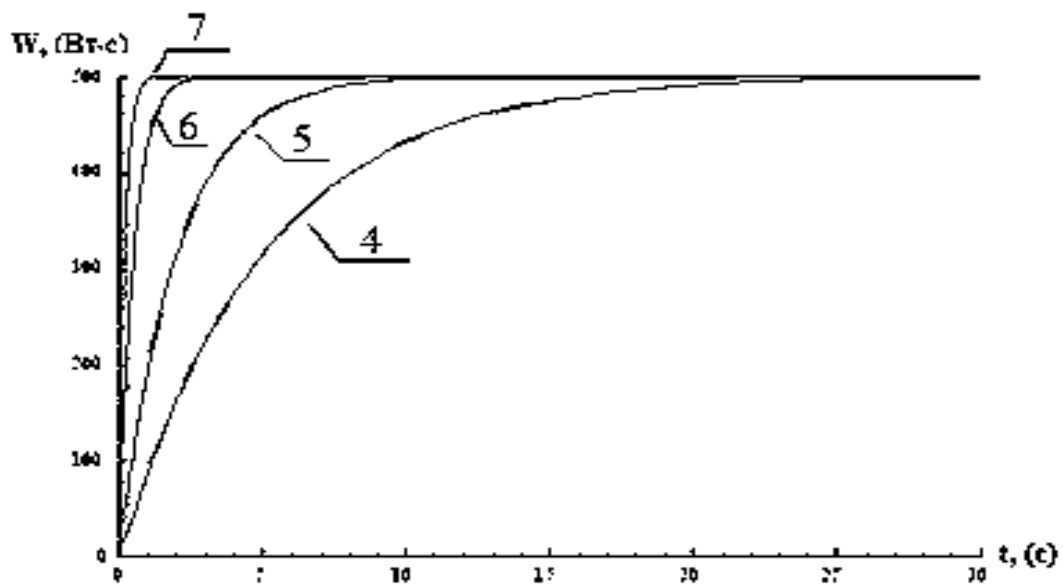


Рис. 3.24. Зміна рівня генерованої електроенергії: 4 – Випадок 4; 5 – Випадок 5; 6 – Випадок 6; 7 – Випадок 7

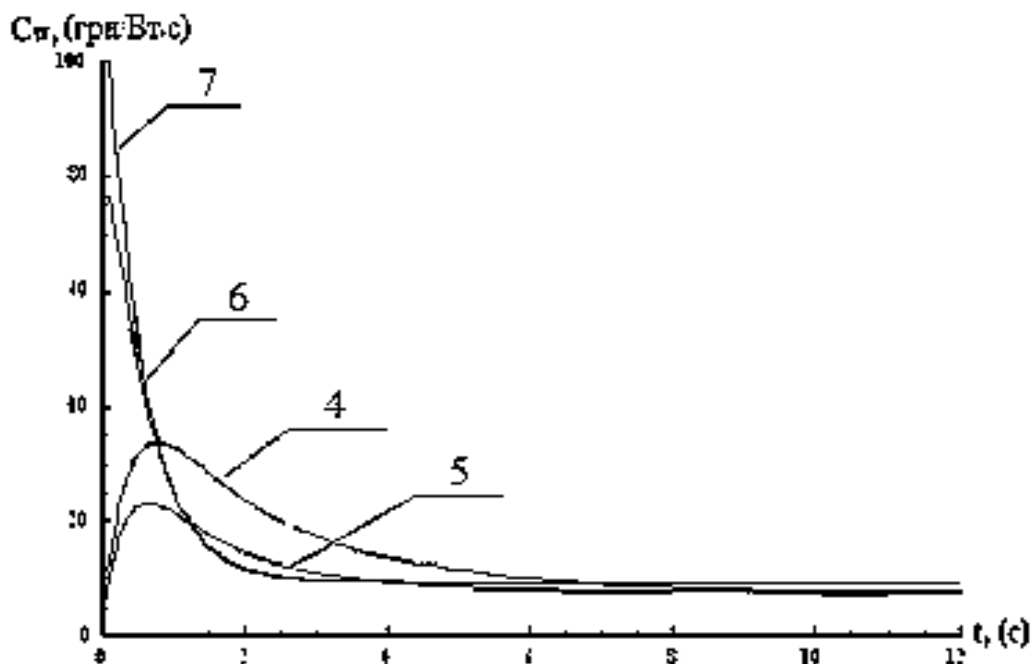


Рис. 3.25. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії: 4 – Випадок 4;
5 – Випадок 5; 6 – Випадок 6; 7 – Випадок 7

На рис. 3.24 – 3.25 показано, що стрибок вартості одиниці електроенергії у 10, 7.6, 3, 2 рази більший за усталене значення при відповідному значенні тривалості виходу генератора на заданий режим роботи, яке дорівнює 29 с, 15 с, 6 с, 3 с.

Для того, щоб експоненційна функція $W = Z \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$ була наближена до реальної зміни рівня електроенергії, яка генерується дизель-генератором, коефіцієнти Z та k можна отримати із розв'язку диференційного рівняння приросту рівня електроенергії дизель-генератора (3.4):

$$W = B \cdot \gamma \cdot \eta_B - (B \cdot \gamma \cdot \eta_B - W_{x.x.}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.77)$$

де $W_{x.x.}$ – рівень електроенергії, що генерується на холостому ході, взятий у якості початкової умови у момент часу $t_0 = 0$. При коефіцієнтах $Z = B \cdot \gamma \cdot \eta_B$ та $k = \frac{1}{\tau}$ експоненційна крива $W = Z \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$ є наближеною до приросту рівня генерованої енергії дизель-генератора. В такому випадку:

$$C_w = - \frac{M \cdot V \cdot e^{\frac{t}{\tau}} \cdot {}_2F_1\left(1, \left(1 + \beta + \frac{1}{\tau}\right) \cdot \tau, 2 + (1 + \beta) \cdot \tau, e^{\frac{t}{\tau}}\right)}{B \cdot \gamma \cdot \eta_B \cdot (1 + \beta + k)} + \frac{M \cdot V \cdot e^{\left(1 + \beta + \frac{1}{\tau}\right) \cdot \tau} \cdot {}_2F_1\left(1, \left(1 + \beta + \frac{1}{\tau}\right) \cdot \tau, 2 + (1 + \beta) \cdot \tau, e^{\frac{1}{\tau}}\right)}{B \cdot \gamma \cdot \eta_B \cdot \left(1 + \beta + \frac{1}{\tau}\right) \cdot e^{(1 + \beta) \cdot t}} +$$

$$+ \frac{K_B \cdot (e^{(1 + \beta) \cdot (1 - t)} - 1)}{(1 + \beta)} + C_{wx.x.} \cdot e^{(1 + \beta) \cdot (1 - t)}. \quad (3.78)$$

У наведеній математичній моделі ізольованої енергогенеруючої системи амплітуда та тривалість перехідного процесу вартості одиниці електроенергії залежить від економічних параметрів системи, а також від наступних електротехнічних параметрів, що мають вплив на зміну рівня генерованої електроенергії: кількості згораючого палива B , коефіцієнта перетворення палива у електроенергію γ , ККД генератора η_B а також механічної сталої часу генератора τ . Зазвичай єдиний із цих параметрів, що може бути змінений під час роботи дизель-генератора є кількість палива B .

3.7. Зв'язок між рівнем генерованої електроенергії і зміною вартості одиниці електроенергії

У попередньому випадку рівень електроенергії збільшувався від деякого фіксованого значення холостого ходу $W_{x.x.}$. Однак, при роботі генератора виникає необхідність збільшувати або зменшувати рівень генерованої електроенергії від початкової величини W_1 до кінцевої W . В такому випадку лінійна функція, що апроксимує реальну функцію приросту електроенергії, може бути представлена у двох варіантах: $W = W_1 + k \cdot t$ – для випадку збільшення її рівня від певного значення W_1 , або $W = W_1 - k \cdot t$ – для випадку зниження. Рівняння (3.53) розв'язується окремо для кожного випадку.

При збільшенні рівня генерованої електроенергії:

$$y' + b \cdot y = \frac{a}{W_1 + k \cdot x} - K_B. \quad (3.79)$$

Виконавши перетворення рівняння, операції інтегрування та потенціювання та повертаючись до виконаних заміни отримано вираз:

$$C_w = \left(\int \frac{a \cdot e^{b \cdot x}}{W_1 + k \cdot x} \cdot dx - K_B \cdot \int e^{b \cdot x} \cdot dx \right) \cdot e^{-b \cdot x} =$$

$$\frac{M \cdot V \cdot e^{-\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} - (1+\beta) \cdot t} Ei\left(\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} + (1+\beta) \cdot t\right)}{k} - \frac{K_B}{(1+\beta)} + \frac{C_3}{e^{(1+\beta) \cdot t}};$$

(3.80)

Константа C_3 визначається за допомогою початкової умови: $C_w(0) = C_{w0}$ у початковий момент часу $t = 0$.

$$C_w = \frac{M \cdot V \cdot e^{-\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} - (1+\beta) \cdot t} Ei\left(\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} + (1+\beta) \cdot t\right)}{k} - \frac{K_B}{(1+\beta)} - \dots$$

$$\dots - \frac{M \cdot V \cdot e^{-\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} - (1+\beta) \cdot t} Ei\left(\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k}\right)}{k} + \frac{K_B}{(1+\beta) \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} + \frac{C_{w0}}{e^{(1+\beta) \cdot t}}.$$

(3.81)

У даному випадку функція $C_w(t)$ не має розриву у момент часу $t = 0$, та визначає зміну вартості одиниці електроенергії при зростанні рівня генерованої електроенергії від певної величини W_1 до кінцевої W . Параметри моделювання наведено у табл. 3.10.

Таблиця 3.10. Параметри моделювання при лінійному збільшенні чи зменшенні рівня генерованої електроенергії

Параметр	M	V	β	K_B	$C_{wx.x.}$	k	W_1	W
Випадок 8	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$	10	100 Вт · с	1000 Вт · с
Випадок 9	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$	10	500 Вт · с	1000 Вт · с
Випадок 10	1000 грн	10	1	1 грн	0.25 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт} \cdot \text{с}}$	10	1000 Вт · с	100 Вт · с

На рис. 3.26 – 3.29 наведено моделювання перехідних процесів C_w при різних значеннях початкового рівня W_1 .

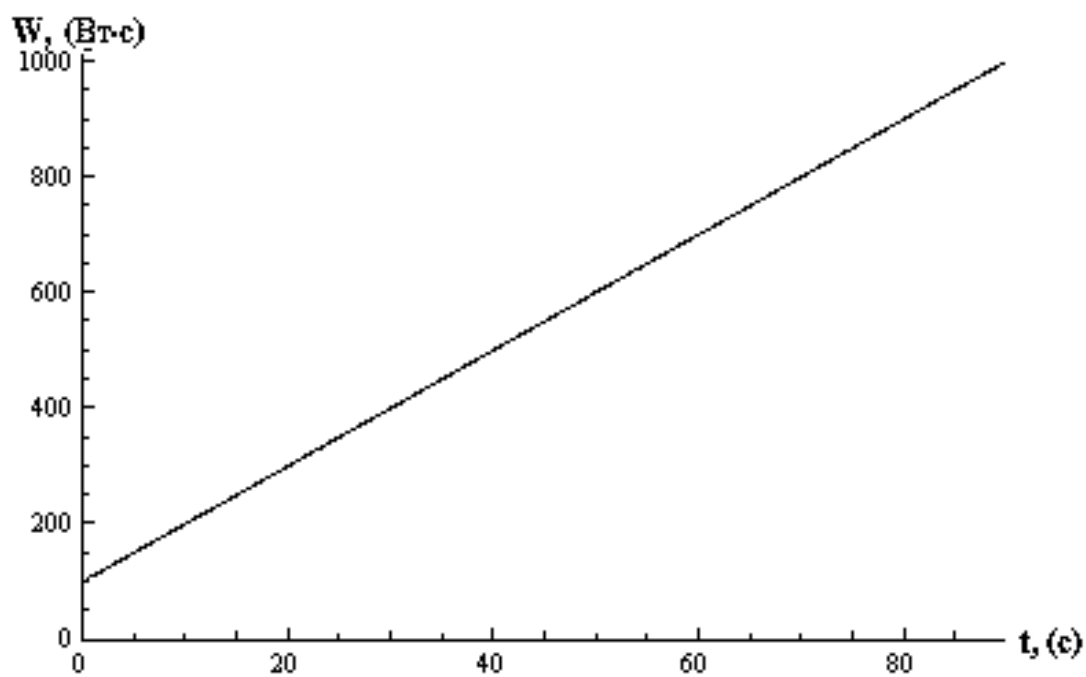


Рис. 3.26 Випадок 8. Зміна рівня генерованої електроенергії

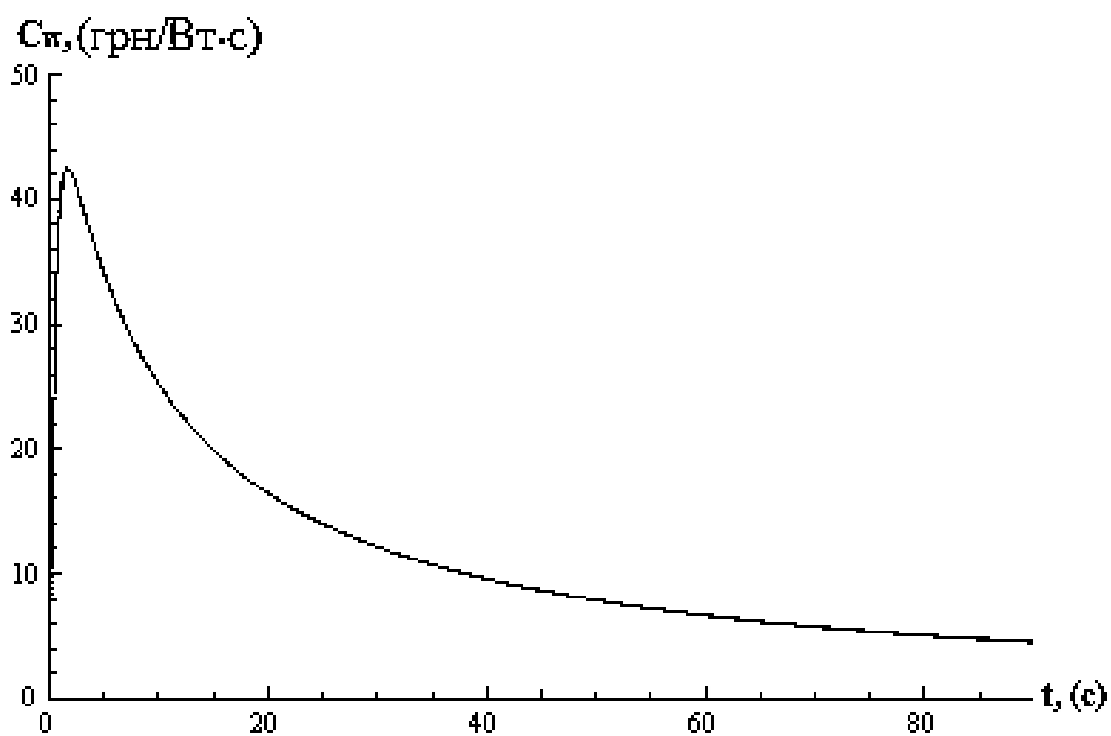


Рис. 3.27 Випадок 8. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії

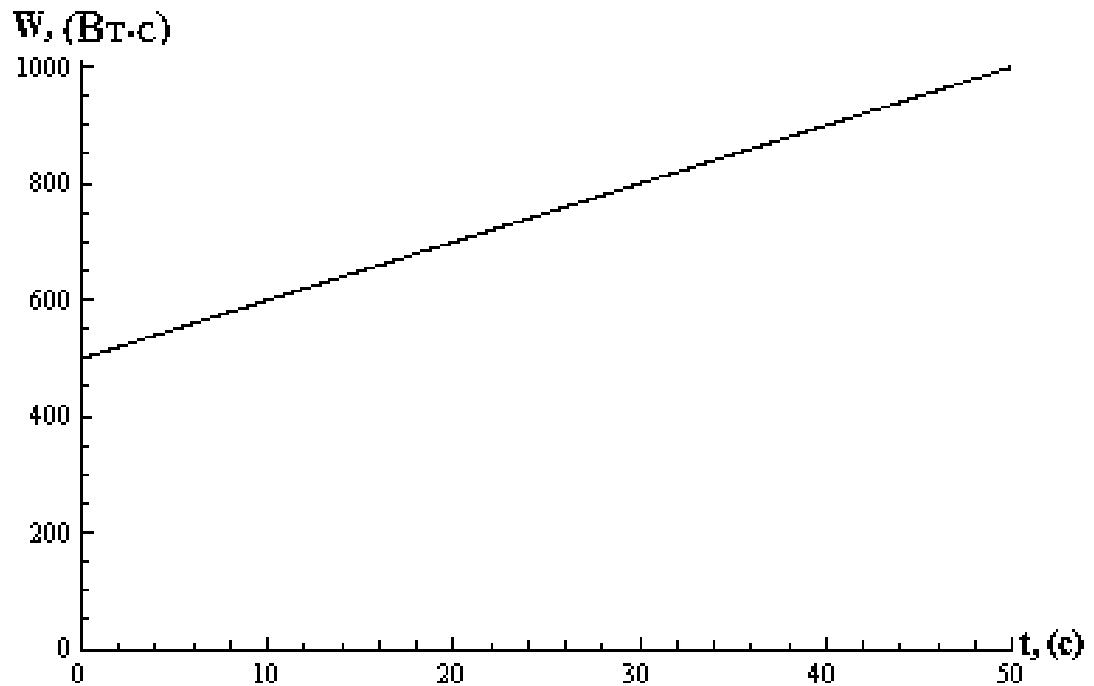


Рис. 3.28 Випадок 9. Зміна рівня генерованої електроенергії

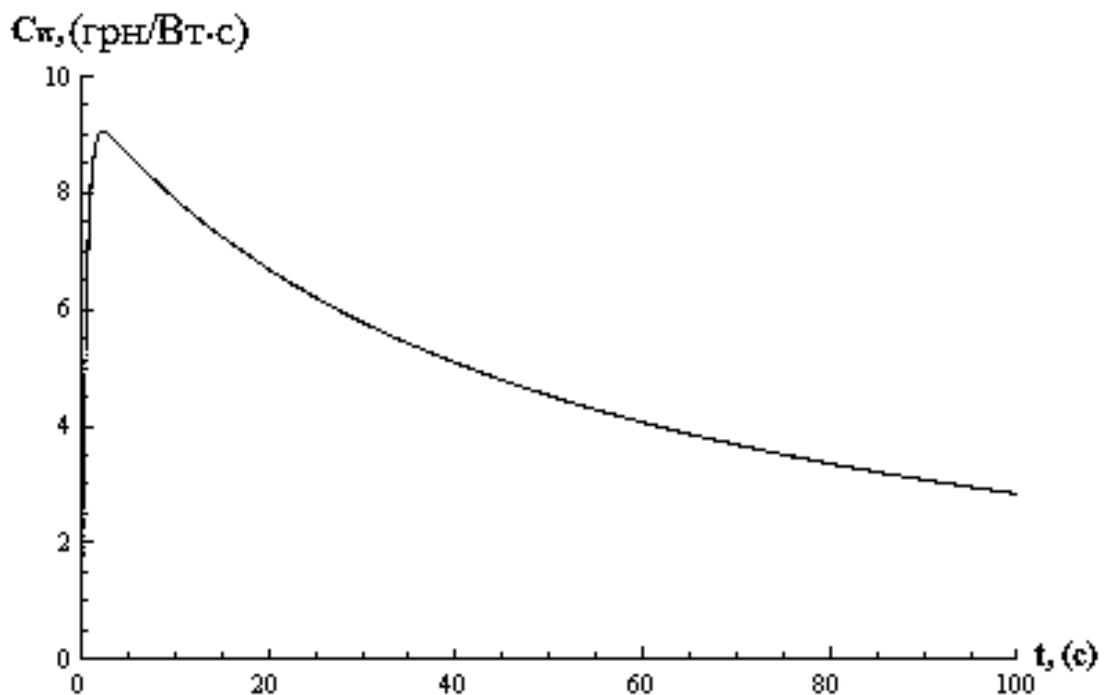


Рис. 3.29 Випадок 9. Перехідний процес вартості одиниці електроенергії

Із результатів моделювання видно, що стрибок вартості одиниці електроенергії залежить не тільки від часу виходу генератора на режим, а і від

початкового рівня генерації електроенергії W_1 . При зменшенні часу виходу на режим, а також зменшенні різниці між початковим і кінцевим рівнями електроенергії вдається досягти зменшення амплітуди перехідного процесу вартості одиниці електроенергії C_w .

Для випадку зниження рівня генерованої електроенергії розв'язок рівняння (3.65) матиме наступний вигляд:

$$C_w = - \frac{M \cdot V \cdot e^{\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} - (1+\beta) \cdot t} Ei \left(- \frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} + (1+\beta) \cdot t \right)}{k} - \frac{K_B}{(1+\beta)} + \dots$$

$$\dots + \frac{M \cdot V \cdot e^{\frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} - (1+\beta) \cdot t} Ei \left(- \frac{(1+\beta) \cdot W_1}{k} \right)}{k} + \frac{K_B}{(1+\beta) \cdot e^{(1+\beta) \cdot t}} + \frac{C_{w0}}{e^{(1+\beta) \cdot t}} \quad (3.82)$$

На рис. 3.30, 3.31 наведено графік зміни рівня генерованої електроенергії та перехідний процес вартості одиниці електроенергії відповідно. Параметри моделювання наведені у табл. 3.10, Випадок 10.

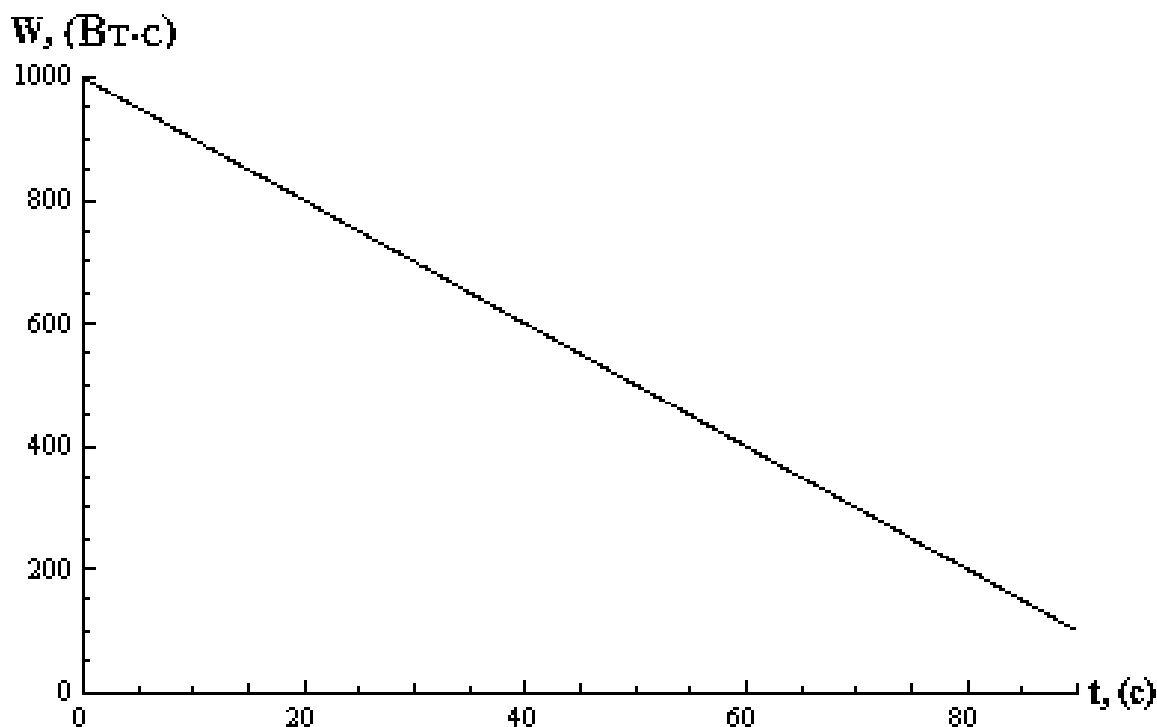


Рис. 3.30 Зміна рівня генерованої електроенергії. Випадок 10.

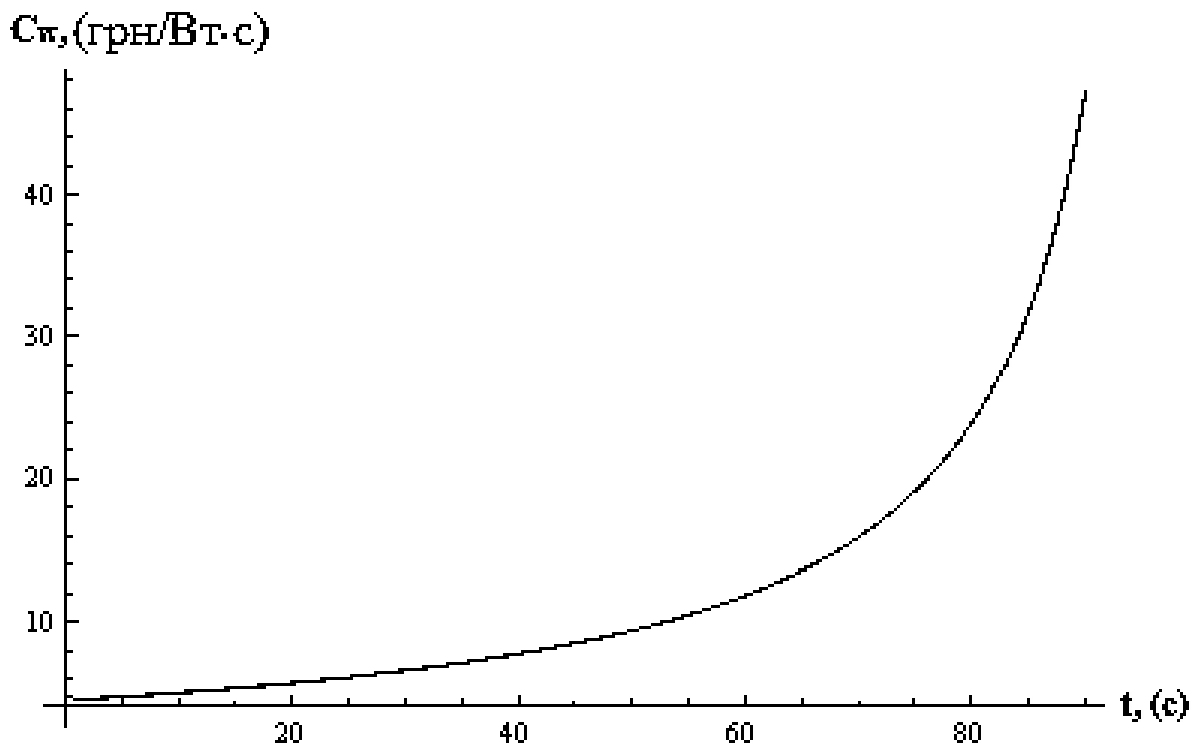


Рис. 3.31 Перехідний процес вартості одиниці електроенергії. Випадок 10.

Отримані рівняння (3.81) та (3.82) дозволяють здійснювати моделювання перехідних процесів вартості одиниці електроенергії при збільшенні або зменшенні рівня генерованої електроенергії. Під час роботи генеруючої системи зміна рівня генерованої електроенергії зазвичай відбувається періодично, протягом години, доби тощо. Для того, аби оцінити вплив перехідних процесів вартості одиниці електроенергії на відхилення її реального середнього значення від встановленого, проведено моделювання циклічного зростання та зменшення рівня генерованої електроенергії на певному проміжку часу, та відповідних змін вартості одиниці електроенергії. На рис. 3.32, 3.33 наведено відповідні графіки зміни рівня генерованої електроенергії та вартості одиниці електроенергії. Припущено, що за умовний період часу генеруюча система двічі збільшувала рівень генерованої електроенергії до пікового значення 500 кВт·год, а також зменшувала його до напівпікового рівня 100 кВт·год. Час виходу на піковий режим дорівнює t_1 , інтервал між змінами рівня – t_2 , час зменшення рівня до напівпікового – t_3 . Параметри моделювання наведені у Випадку 11 табл. 3.11.

Таблиця 3.11. Параметри моделювання

Параметр	M	V	β	K_B	C_{w1}	C_{w2}	k	t_1	t_2	t_3	W_1	W_2
Випадок 11	1000 грн	0	1	1 грн	50 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	10 $\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	10	40 с	100 с	40 с	100 Вт·с	500 Вт·с

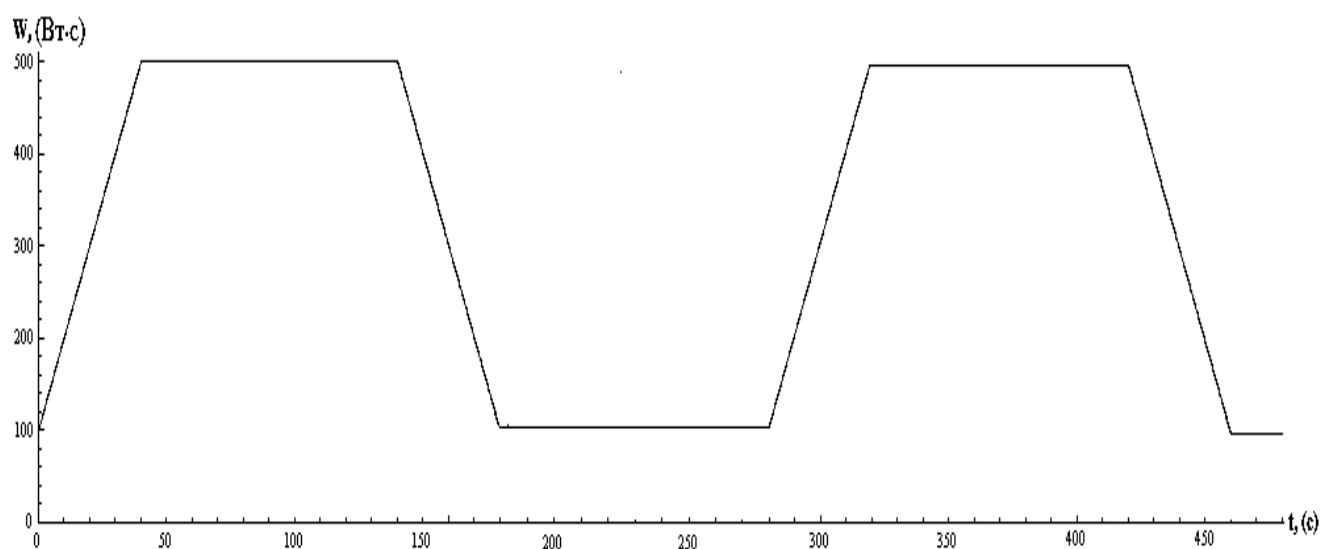


Рис. 3.32 Випадок 7. Зміна рівня генерованої електроенергії

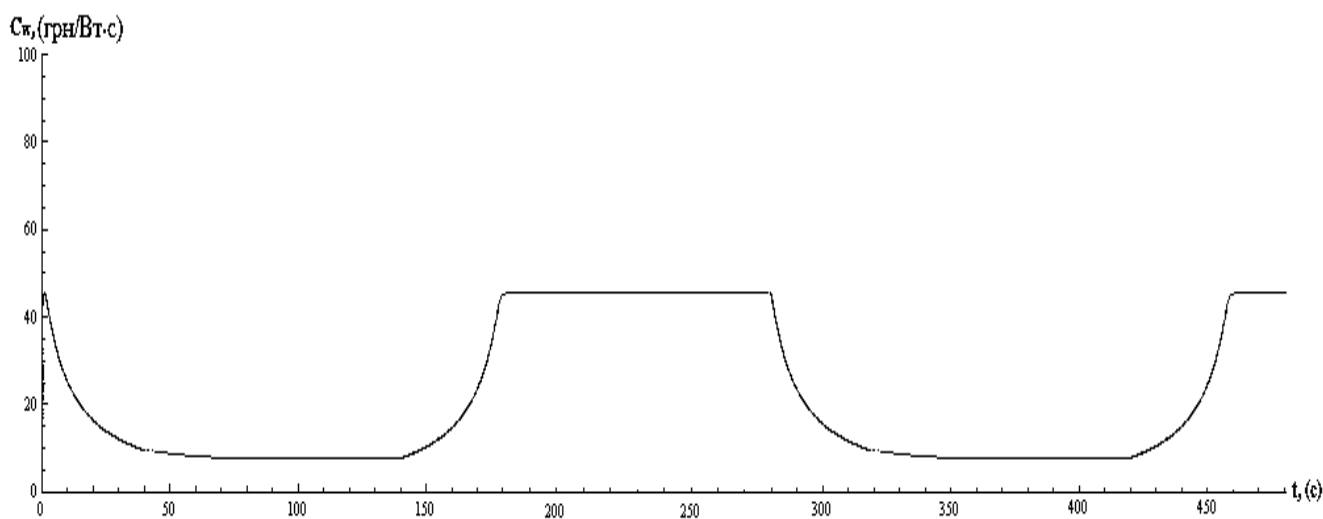


Рис. 3.33 Випадок 7. Перехідні процеси вартості одиниці електроенергії

3.8. Врахування акумулятора у вартісній моделі

В системі може мати місце неспівпадіння графіків генерації та споживання електроенергії. З метою усунення провалів напруги енергія, що генерується системою електроживлення, відбирається не лише від дизель-генератора, але й від додаткового джерела живлення. В якості такого може використовуватись акумуляторна батарея [78], яка працює в двох основних режимах: 1) заряду; 2) розряду. Тривалість роботи акумулятора в режимі розряду має бути вибрана таким чином, щоб забезпечити потрібну якість електроживлення для навантаження і уникнути значного перевищення запасу потужності дизеля. Збільшення подачі палива ΔB дозволяє більш швидко вивести дизель-генератор на необхідний робочий режим. Після цього моменту обсяг витрат палива зменшується до величини, яка визначається заданим рівнем електроенергії W . Акумуляторна батарея характеризується деякими значеннями ККД заряду η_z і розряду η_p . В загальному випадку сумарна кількість палива, що витрачається для зарядження акумулятора визначається нелінійною залежністю і апроксимується виразом вигляду [79]:

$$B_{n.z.} = B_0 + k \cdot (W_{\Sigma z})^\alpha \quad (3.83)$$

де W_z – електроенергія, необхідна для заряду акумулятора; $W_{\Sigma z} = \frac{P_z}{\eta_z}$ – повна кількість електроенергії заряду (з урахуванням ККД); B_0 – кількість палива, необхідна для холостого ходу генератора; η_z, η_p – ККД заряду та розряду акумулятора відповідно.

Задля заряду акумулятора до необхідного рівня W_z протягом деякого часу від $t = 0$ до $t = t_z$ відбувається подача додаткової кількості палива $B_{n.z.}$. Система диференціальних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta W}{W}\right) - \frac{(\Delta B + B_{n.z.}) \cdot C_B}{W}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot W)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot B_{n.z.}}{\tau}. \end{cases} \quad (3.84)$$

У момент часу $t = t_z, B_{n.z.} = 0$. Акумулятор заряджено.

На рис. 3.34 наведено моделювання перехідних процесів у системі при параметрах, наведених у таблиці 3.12. Рисунок 3.35 демонструє збільшення рівня генерованої електроенергії на 100 кВт · год, задля заряду акумулятора.

Таблиця 3.12. Параметри математичної моделі при заряді акумулятора

Параметр	τ	η_B	γ	η_z	η_p	B_0	C_B	M	V	ΔB	β	W_0	C_{w0}	W_3
Значення	15	0.5	$1 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$	0.9	1	100 л	$50 \frac{\text{грн}}{\text{л}}$	10000 грн	1	0 л	1	100 Вт · с	$10 \frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	100 Вт · с

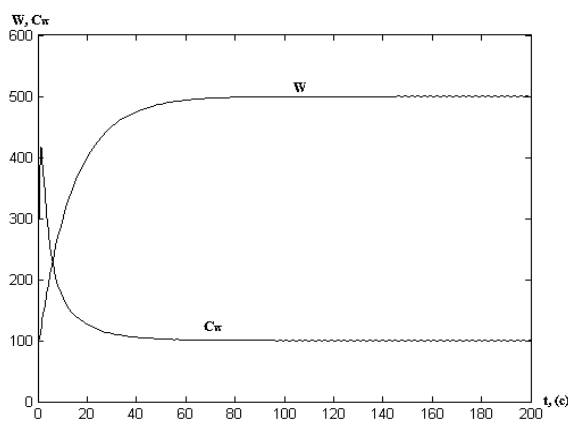


Рис. 3.34. Перехідні процеси при виході генератора на режим роботи

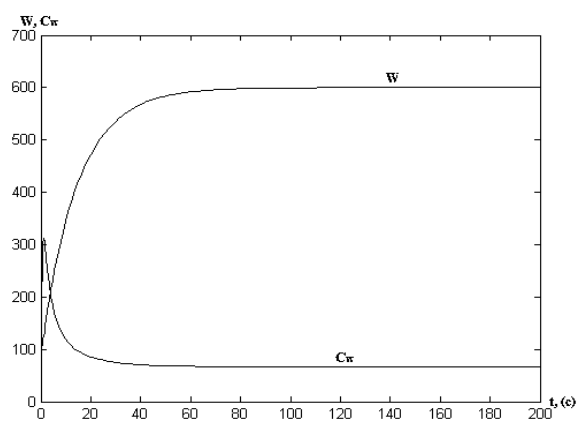


Рис. 3.35. збільшення рівня генерованої електроенергії на 100 кВт · год, задля заряду акумулятора.

При падінні рівня генерованої електроенергії накопичена у акумуляторі електроенергія W_3 компенсує втрати протягом деякого часу розряду t_p . Система матиме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = \frac{M \cdot V}{W + W_3 \cdot \eta_p} - C_w \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta B}{P + W \cdot \eta_p}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_B}{W + W_3 \cdot \eta_p}; \\ \frac{dW}{dt} = -\frac{W + W_3 \cdot \eta_p}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_w \cdot (W + W_3 \cdot \eta_p))}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (3.85)$$

На рис. 3.36 наведені результати моделювання при падінні рівня генерованої електроенергії до 400 кВт·год. Рис. 3.37 демонструє компенсацію падіння за допомогою акумулятора.

Параметри моделювання при компенсації падіння рівня електроенергії за рахунок акумулятора наведені у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13. Параметри математичної моделі при компенсації падіння рівня електроенергії за рахунок акумулятора

Параметр	τ	η_B	γ	η_3	η_p	B_0	C_B	M	V	ΔB	β	W_0	C_{w0}	W_3
Значення	1	0.5	1	0.9	1	10	50	100	1	-	1	500	100	100
	5		$\frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{\text{л}}$			0	$\frac{\text{грн}}{\text{л}}$	000		40		Вт·с	$\frac{\text{грн}}{\text{Вт}\cdot\text{с}}$	Вт·с
	с					л		грн		0 л		с		

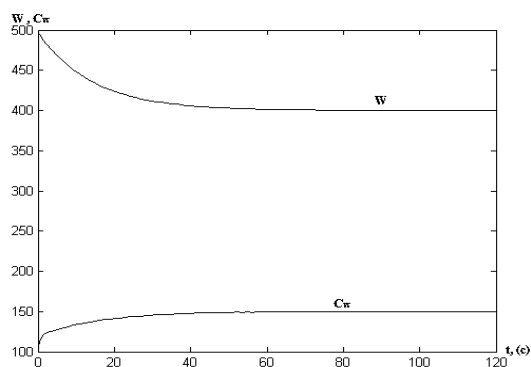


Рис. 3.36 Перехідні процеси при падінні рівня електроенергії

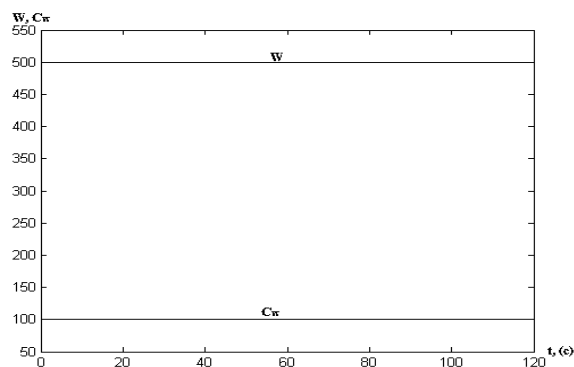


Рис. 3.37 Компенсація падіння рівня електроенергії за допомогою акумулятора.

На рисунках 3.38 і 3.39 наведено графіки зміни рівня генерованої електроенергії W та вартості одиниці електроенергії C_w відповідно.

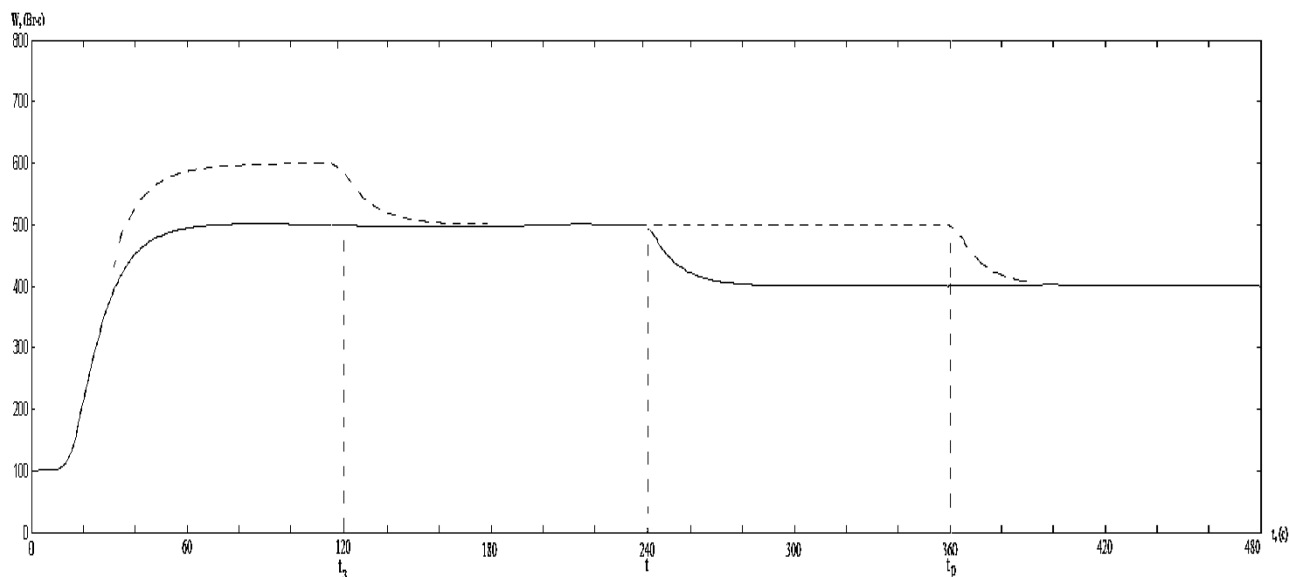


Рис. 3.38. Зміна рівня генерованої електроенергії

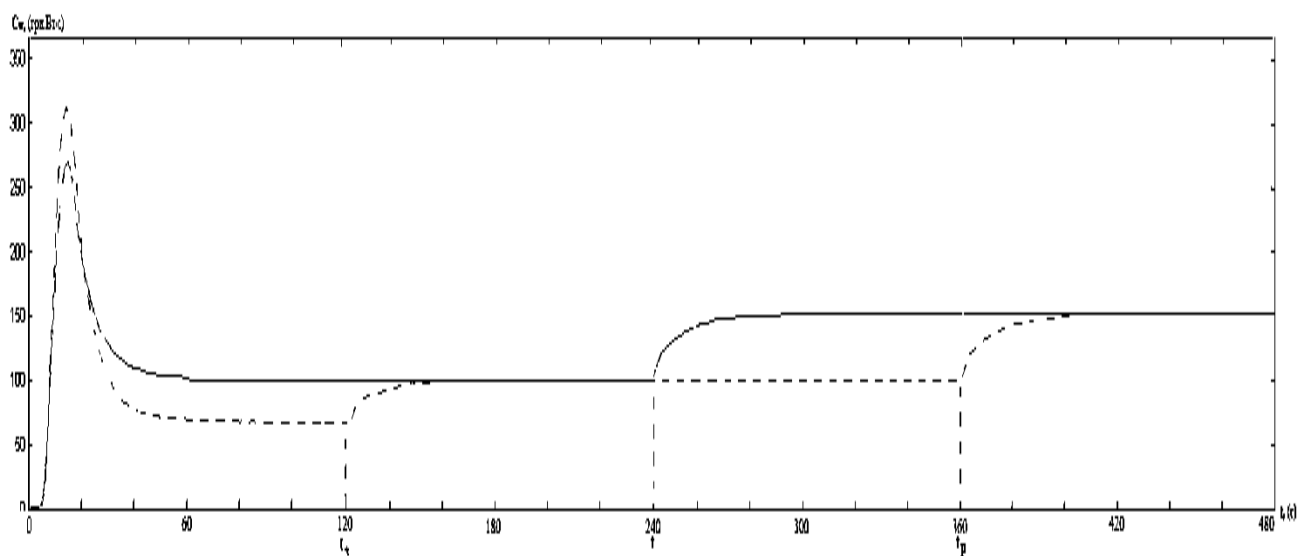


Рис. 3.39 Зміна вартості одиниці електроенергії

Протягом часу від $t = 0$ до $t = t_3$ акумулятор заряджається за рахунок підвищення фактичного рівня електроенергії. У момент часу t відбувається зменшення подачі палива, що викликає падіння рівня електроенергії. На проміжку

часу від t до t_p розрядження акумулятора компенсує зменшення генерованої електроенергії.

Висновки до третього розділу

1. 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, з врахуванням статичних величин цих параметрів і виконання умови економічного балансу після завершення перехідних процесів.
2. Зв'язок економічних параметрів системи із тривалістю перехідного процесу показує, що збільшення величини грошової маси M у 3 рази при сталості інших параметрів математичної моделі призводить до зменшення тривалості перехідного процесу у 1,5 разів.
3. Досліджено стрибок вартості одиниці електроенергії на початку перехідного процесу при лінійній або експоненційній функції зміни рівня генерованої електроенергії.
4. Досліджено використання акумулятора при аварійному зменшенні рівня електроенергії дизель-генератора. Отримані результати у динаміці демонструють компенсацію втрати рівня генерованої електроенергії за рахунок використання акумулятора, а також перехідні процеси вартості одиниці електроенергії при цьому.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТАРИФІКАЦІЇ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

4.1. Модель розрахунку електроенергії для системи з двома генераторами

Прототип пристрою розрахунку рівня генерованої електроенергії із вбудованим мікроконтролером для генератора електроенергії однофазної мережі може бути виконано на базі мікросхеми Arduino Uno [80], який містить у собі мікропроцесор ATmega328P [81]. Для передачі інформації про обсяг спожитої електроенергії до мікроконтролера МК_Σ під'єднано радіо-модуль NRF24L01+ [82], 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_і на рис. 4.1.

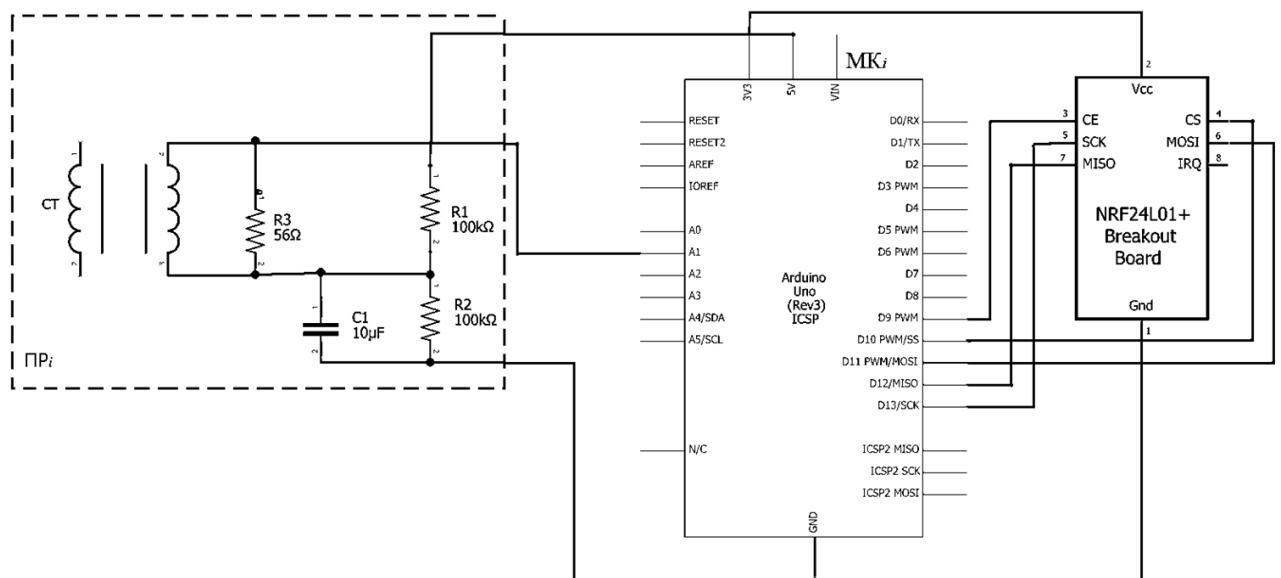


Рис. 4.1. Спрощена схема пристрою розрахунку з радіо-модулем

Побудова пристрою розрахунку на базі Arduino Uno основана на методиці, викладеної у [83], з тією відмінністю, що до контактів D9 PWM, D10 PWM/SS, D11 PWM/MOSI, D12/MISO, D13/SCK, 3V3, GND під'єднано радіо-модуль. Складники схеми пристрою розрахунку наведено нижче:

1. плата Arduino Uno із мікроконтролером ATmega328P;
2. трансформатор струму (СТ, current transformer);
3. шунтуючий резистор R3, 56 Ом;
4. подільник напруги на двох резисторах R1, R2, 100 кОм;
5. конденсатор C1, 10 мкФ;
6. радіо-модуль NRF24L01+.

Arduino Uno має лише аналогові входи напруги, які вимірюють 0 – 5 В постійного струму, тому вихідний струм від СТ, (current transformer), необхідно перетворити в еталон напруги, а потім масштабувати еталон напруги в діапазон 0 – 5 В. Для відстеження струму на виході генератора вихідна обмотка СТ, (current transformer), під'єднана до одного із кабелів живлення (обраної фази).

У наведеній моделі в якості трансформатора струму – СТ, (current transformer), використовується Talema AC1030, який працює з номінальним струмом 30А і максимальним – 75А. При 220 В змінного струму СТ протягом коротких періодів часу може працювати на потужності 16,5 кВт а постійно на 6,6 кВт, що підходить для невеликого домогосподарства.

Для розрахунку опору шунтуючого резистору R3 врахуємо, що коефіцієнт трансформації СТ = 1000. Враховуючи рекомендації методики викладеної у [83] і приймаючи струм первинної обмотки рівним 42А визначаємо значення R3 = 59,5 Ом і обираємо найближче стандартне значення 56 Ом [83].

Ємність конденсатора $C_1 = 10\text{мкФ}$. Дільник напруги $R1 = R2 = 100\text{кОм}$.

Радіо-модуль NRF24L01+ забезпечує наступні параметри:

1. Бездротовий зв'язок;
2. Швидкість передачі даних, до 2 Мб / с;
3. Режим роботи (приймач / передавач) можна змінювати в процесі роботи;
4. Висока перешкодозахищеність. Дані в пакетах приймаються з перевіркою CRC;

5. Контроль доставки даних. Приймач відправляє передавачу сигнал підтвердження прийому даних (без зміни режиму роботи);
6. Можливість вибору одного з 128 каналів зв'язку. Крок кожного каналу дорівнює 1 МГц (від 2,400 ГГц до 2,527 ГГц);
7. Можливість одночасної роботи до 6 передавачів на одному каналі.

Для функціонування пристрою розрахунку генерованої електроенергії та радіо-модуля NRF24L01+ складено код на мові C++ [84] (наведений у додатку А.1 – програмний код для функціонування пристрою розрахунку обсягу електроенергії першого генератора та радіо модуля), завантажений за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікропроцесора ATmega328P. Програмне забезпечення Arduino з відкритим кодом (IDE) дозволяє легко писати код і завантажувати його у мікропроцесор і використовувати з будь-якою платою Arduino [85]. Схема пристрою розрахунку для другого генератора має вигляд, аналогічний до наведеного на рис. 4.1.

Код для функціонування другого пристрою розрахунку також аналогічний до коду для мікроконтролера першого пристрою розрахунку, з відмінністю у ідентифікаторі передавача (наведено у додатку А.2 – програмний код для функціонування пристрою розрахунку обсягу електроенергії другого генератора та радіо-модуля).

Схему мікроконтролера МК_Σ наведено на рис. 4.2.

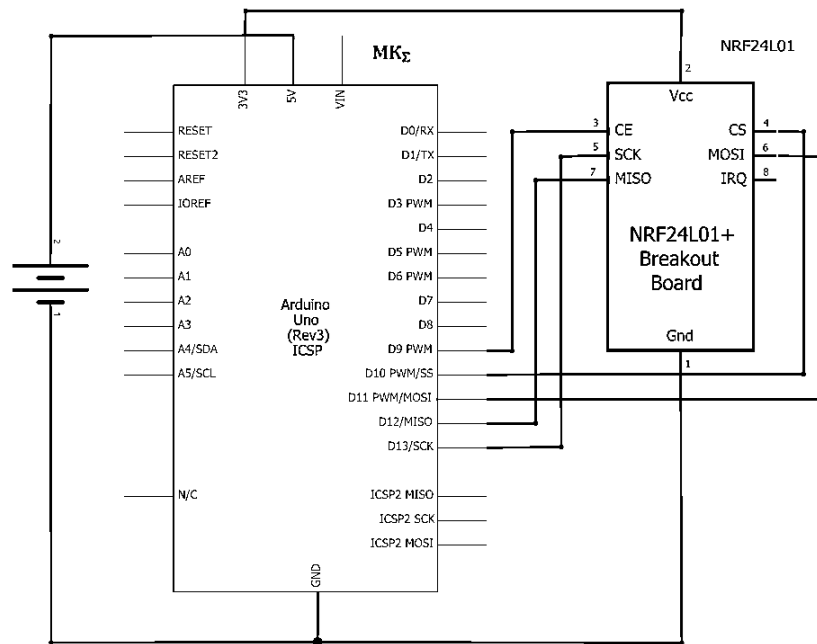


Рис. 4.2. Спрощена схема мікроконтролера для прийому даних і визначення вартості електроенергії

Для функціонування пристрою складено код на мові C++ наведений у (додаток Б – програмний код для функціонування мікроконтролера для прийому даних про спожиту електроенергію, розрахунку і передачі даних для подальшого визначення вартості одиниці електроенергії кожного генератора), завантажений за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікроконтролера ATmega328P. Схема мікроконтролера МК Σ де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії C_i для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами C_{Σ} аналогічна до наведеної на рис. 4.2. Код для функціонування мікроконтролера наведено у (додаток В – програмний код для функціонування мікроконтролера де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами).

4.2. Модель роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії

Для побудови схеми пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії та симуляції його роботи обрано середовище TinkerCAD [86], безкоштовна онлайн-колекція програмних засобів, створена на основі Autodesk, лідера в галузі 3D-дизайну, інженерного та розважального програмного забезпечення. Розділ розробки електричних схем якого містить необхідні плати Arduino Uno та деяку частину апаратних модулів для складання проектів на їх основі.

Зважаючи, що TinkerCAD не підтримує трансформатор струму, генератор сигналів був використаний для створення прикладу сигналу на вході пристрою розрахунку. Величини опору резисторів R_1, R_2, R_3 та ємності конденсатора C_1 дорівнюють параметрам відповідних елементів у секції PP_i на рис. 4.1.

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). Яскравість дисплею регулюється за допомогою додаткового потенціометра з опором 10 кОм. Також, для задання необхідної напруги живлення LCD дисплею додано резистор R_4 з опором 220 Ом [83]. Спрощену схему пристрою розрахунку з LCD дисплеєм роздільної здатності (16x2) та генератором сигналів під'єднаним до шунтуючого резистора R_3 зображено на рис. 4.3.

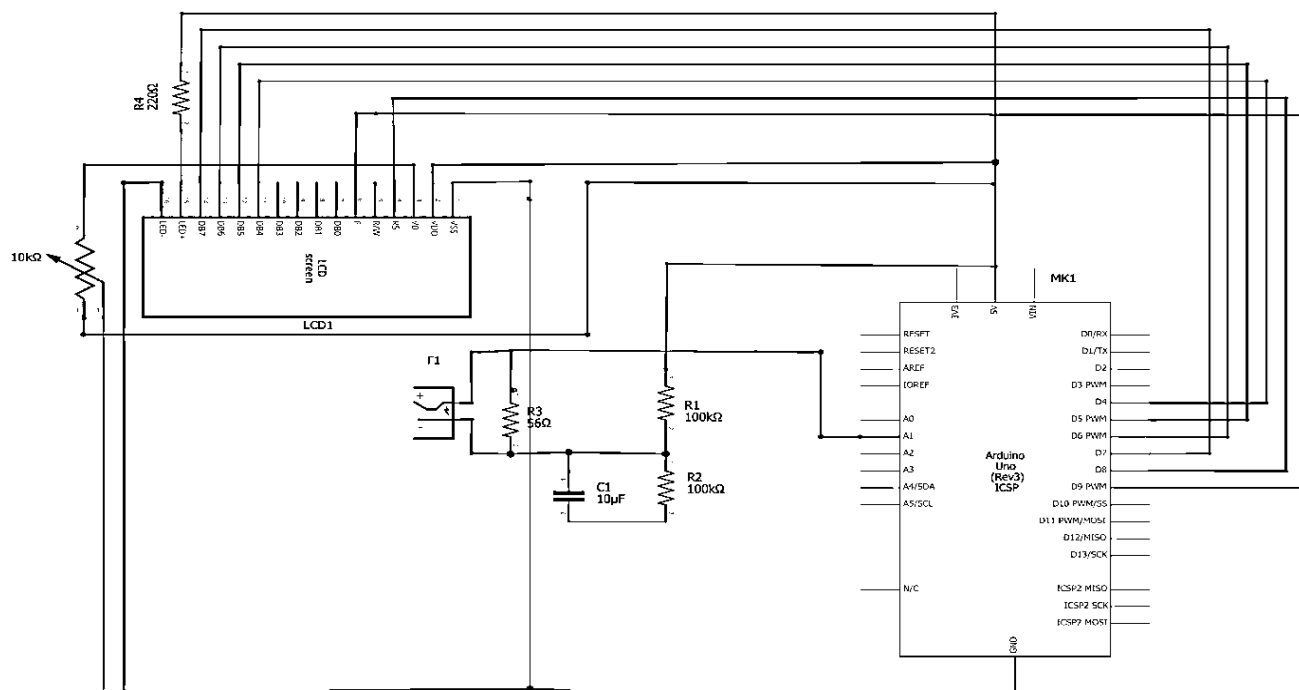


Рис. 4.3. Спрощена схема пристрою розрахунку електроенергії

Моделі роботи пристроїв розрахунку першого та другого генераторів наведено на рис. 4.4 та 4.5.

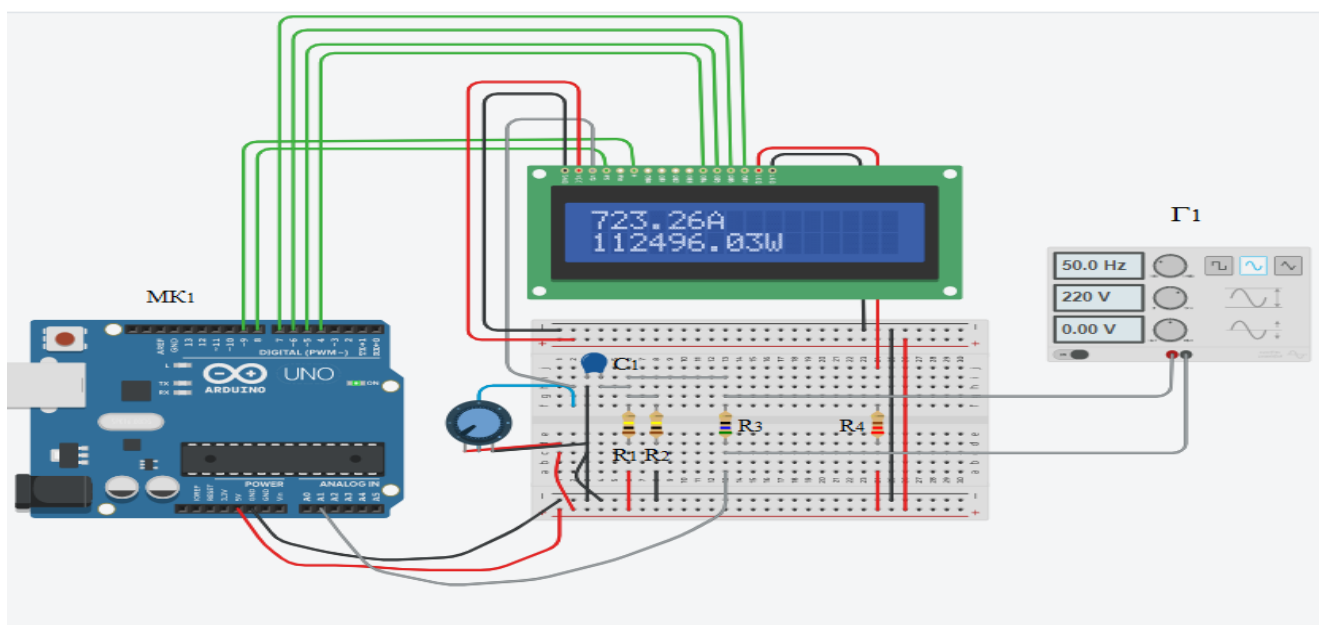


Рис. 4.4. Модель роботи пристрою розрахунку на мікроконтролері МК₁

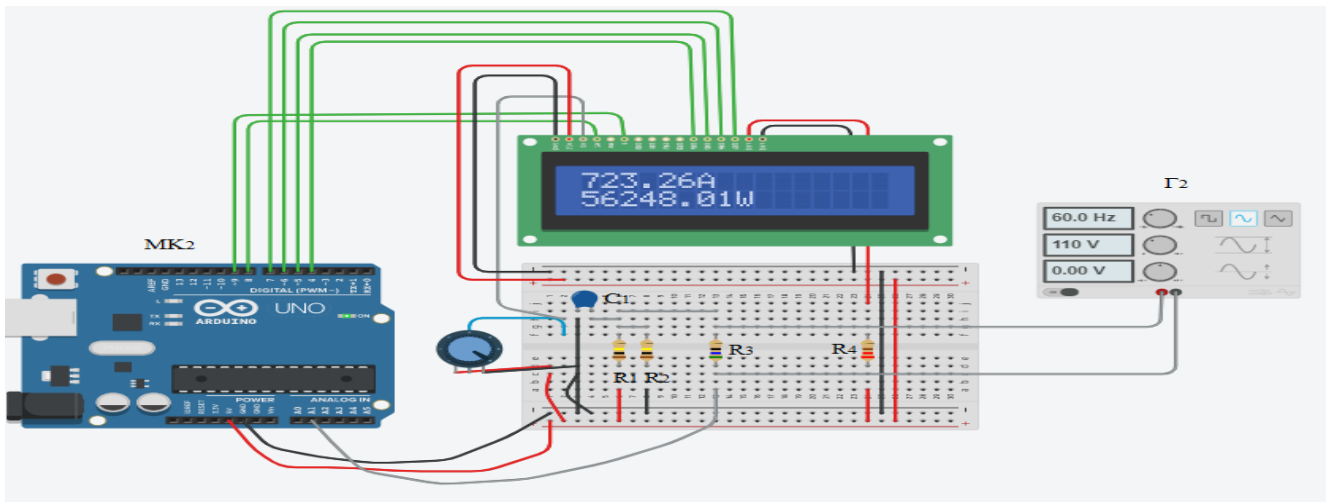


Рис. 4.5. Модель роботи пристрою розрахунку на мікроконтролері МК₂

Програмний код для мікроконтролера кожного пристрою розрахунку приведено у (додаток Г – програмний код для мікроконтролера пристрою розрахунку з LCD – дисплеєм). Параметри генераторів сигналу Γ_1, Γ_2 наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Параметри генераторів сигналу

Джерело сигналу	Напруга, В	Частота, Гц	Напруга зсуву, В
Γ_1	220 В	50 Гц	0 В
Γ_2	110 В	60 Гц	0 В

Через відсутність у середовищі TinkerCAD емуляції радіо-модулю NRF24L01+ для реалізації можливості передачі даних від пристроїв розрахунку, та складність реалізації дротової передачі інформації між більше ніж двома платами Arduino прийняте наступне рішення. Для демонстрації роботи алгоритму щосекундного розрахунку вартості одиниці електроенергії дизель-генератора запропоновано поєднати програмно у коді мікроконтролера пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії МК_{*i*} де $i = 1, 2$ – номер генератора, функції: пристрою розрахунку генерованої електроенергії ПР_{*i*}; мікроконтролера МК_Σ для розрахунку кількості отриманої електроенергії за 1с.; мікроконтролера

МК_с для розрахунку вартості одиниці електроенергії C_i для кожного генератора. Результати симуляції роботи двох пристроїв розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії наведені на рис. 4.6. для генератора Γ_1 , рис. 4.7. для генератора Γ_2 . Перший рядок кожного LCD дисплею відображає електроенергію, отриману від генератора за цю секунду, а другий рядок – її вартість. Моделювання виконувалось на протязі інтервалу в 10с., так як час виходу генератора на режим становить 6...10с [72]. Програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії для генератора Γ_1 наведено у (додаток Д – програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії).

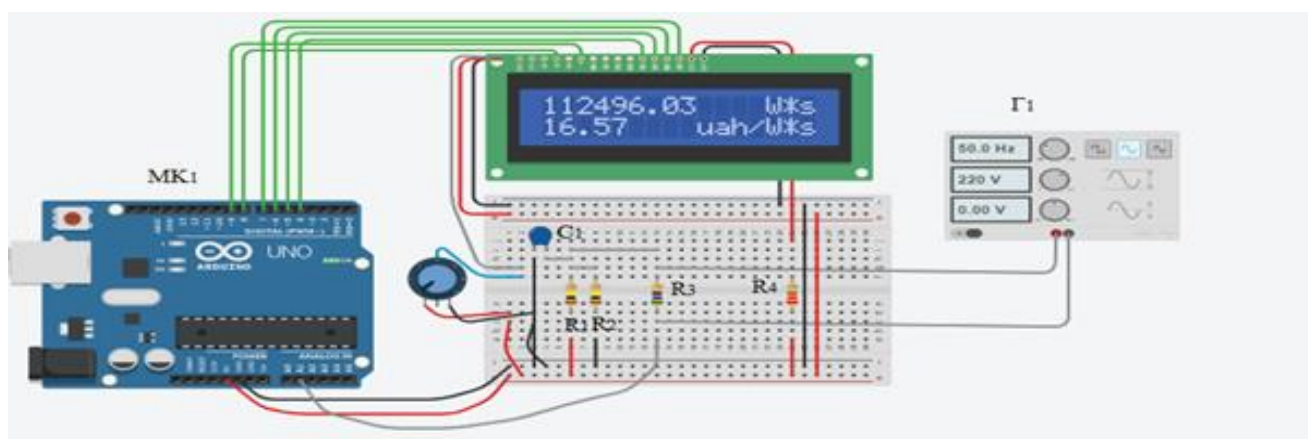


Рис. 4.6. Результат симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії генератора Γ_1

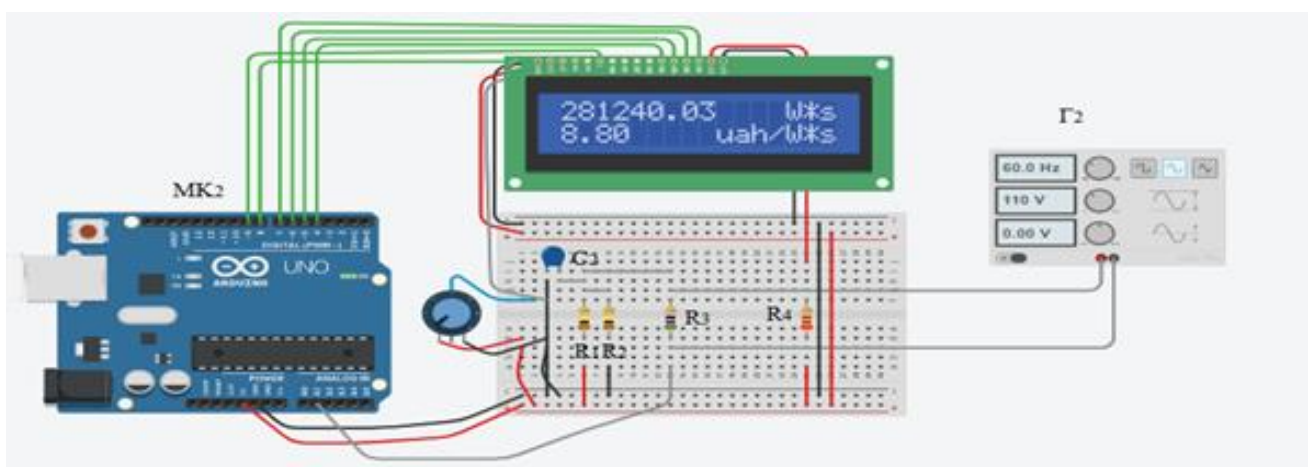


Рис. 4.7. Результат симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії генератора Γ_2

Представлена модель пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії має свої переваги, так як при програмному поєднанні функцій всіх мікроконтролерів у коді одного МК_i можна скоротити кількість плат з трьох до однієї. Але втрачається можливість обміну даними між мікроконтролерами пристроїв розрахунку і загальним підсумовуючим пристроєм, а отже можливість дослідження вкладу кожного генератора у загальний об'єм виробленої електроенергії і розрахунку її вартості.

Для моделювання роботи більшої кількості генераторів із пристроями розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії необхідно внести зміни в програмний код мікропроцесора кожного пристрою розрахунку. У випадку практичної реалізації необхідно також внести зміни в програмний код мікроконтролерів МК_Σ та МК_с.

Висновки до четвертого розділу

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

2. Запропонована схема підсумовуючого пристрою, розраховуючого об'єм спожитої кожним користувачем електроенергії, та схема 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.

ЗАГАЛЬНІ 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 дисципліни: “Маркетинг в енергетиці”, “Інтелектуальні електроенергетичні мережі та системи”, Освітня Програма другого (магістерського) рівня вищої освіти: “Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології” КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Суходоля О.М. Захист критичної інфраструктури в умовах гібридної війни: проблеми та пріоритети державної політики України. Стратегічні пріоритети. 2016. № 3. С. 62-76.
2. Суходоля О.М. Проблеми визначення сфери регулювання енергетичної безпеки. Стратегічні пріоритети. 2019. № 1. С. 5-17.
3. Керування енергопроцесами в Microgrid на основі оцінки рівня витрат від нерівномірного споживання електроенергії / Денисюк С. П., Романченко О. С. // About the problems of practice, science and ways to solve them, abstracts of XXIV international scientific and practical conference, 2021 – pp. 333-343.
4. Биконя О.С. Організаційно-економічний механізм формування інтелектуальної енергетичної системи України / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата економічних наук, Київ – 2019.
5. Рибіна О.Б., Бойко І.Ю. «Оцінка стану та перспективи використання пристроїв силової електроніки в Україні» // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - Збірник наукових праць. – Київ, 2013. – С.153-163.
6. "Системи силової електроніки в електроенергетиці. Програмне забезпечення PowerFactory. Базовий курс". Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт для студентів спеціальностей 8,05070108 "Енергетичний менеджмент", 8,05060105 "Енергетичний менеджмент", 8,05070103 "Електротехнічні системи електроспоживання": Уклад.: С.П. Денисюк, В.В. Рогаль, Д.Г. Астахов, І.Ю. Бойко. К.: НТУУ "КПІ", Київ, 2013.
7. Price formation in the energy markets of Ukraine / Zhuikov, V.; Pichkalov, I.; Boyko, I.; Vlinov, I. // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2015 IEEE 35th International Conference.
8. 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, №5 (94) – Київ, 2016. – С. 43-50.

9. Жуїков В.Я., Бойко І.Ю. Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи // Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, № 6 – С. 27-33.
10. Static and dynamic tariffing electric power autonomous of microgrid / Zhuikov V., Tereschenko T., Yamnenko J., Klepach L., Boiko I. // Journal of Present Problems of Power System Control. - 2016. – №7.
11. Жуїков 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, 2016, № 3(78) – С. 66-75.
12. Жуїков В.Я., Бойко І.Ю. Застосування лінеаризованої електро-вартісної моделі для дослідження характеру перехідних процесів у ізольованій генеруючій системі // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 4. – С. 41-49.
13. Бойко І.Ю. Актуальність застосування динамічної тарифікації для генеруючих систем Microgrid // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 3. – С. 23-29.
14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір «Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та врахування алгоритму динамічної тарифікації» № 101337 від 21 грудня 2020 р.
15. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets // Science and Education a New Dimension. IX (31), Issue 250, 2021 Feb. – pp. 46-49.
16. Попель О.С. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии// Энергосбережение. 2006, №3.
17. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю., Кремнёв С.Ю. Анализ особенностей применения ветровых систем автономного электроснабжения на уас академик вернадский // УАЖ. 2007/2008, № 6-7, С. 198-206.

18. Baring-Gould I., Corbus D. Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates // Arctic Energy Summit Technology Conference, Anchorage, Alaska, October 15–18, 2007. – P. 3–7.
19. Lindquist A. Wind power in Antarctica – a feasibility study for Wasa. Uppsala University, Sweden Division for Electricity and Lightning Research, 2004. – P. 28–30.
20. ГНД 34. 09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-154 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії, який затверджено наказом № 757 Мінпаливенерго України від 17.12.03.
21. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
22. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Анализ режимов загрузки магнитоэлектрического генератора инверторной дизельной электростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.;
23. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories, Mart 2016.
24. Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – September 2017.
25. Синеглазов В.М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/>.
26. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.

27. 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.
28. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 237–238.
29. ENIRDGnet: Concepts and opportunities of Distributed Generation: The Driving European Forces and Trend., ENIRDGnet Project deliverable D3, 2003.
30. Wara J.O. Current status and Evaluation of Electricity market liberalization in Japan, USA and Europe. IEE 391st regular research session, May 2005.
31. Friedman N.R. Distributed Energy Resources Interconnection Systems: Technology Review and Research Needs. – National Renewable Energy Laboratory Report No. NREL/SR-560-32459, Sept 2002.
32. Ropenus S., Skytte K. Regulatory Review and Barriers for the Electricity Supply System for Distributed Generation in the EU-15 // International Journal of Distributed Energy Resources, vol. 3, pp. 243-257, 2007.
33. H. Morais, P. Kadar, M. Cardoso, Z. Vale, and H. Khodr, “VPP operating in the isolated grid”, IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh (PA), pp.1-6. Jul 2008.
34. Goran Strbac, Nick Jenkins, Tim Green, Danny Pudjianto (Internal College London and University of Manchester), Review of Innovative Network Concepts // Intelligent Energy, December 2006.
35. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Бевз С. М. [та ін.]; під заг. ред. А. К. Шидловського; НАН України. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. — 560 с.
36. Mashhour E., Moghaddas-Tafreshi S.M. The Opportunities for Future Virtual Power Plant in the Power Market, a View Point // International Conference on Clean Electrical Power, 2009, pp. 448-452.

37. Сидоров В.І. Технології гідро- та вітроенергетики. – Черкаси: Вертикаль, видавець Кандич С.Г., 2016. – 166 с.
38. Сидоров В.І. Вітротурбінні технології гідроакумулювання // Промислова енергетика та електротехніка. – 2016. – №6. – С. 14-24
39. Накопичувач сонячної енергії Soluna Power Bank S8. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: ecoenerhiia.ua/akumuljatorni-batarei/sistema-zberigannja-energii-soluna-power-bank-s8.html
40. Хімічні джерела струму. Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань з хімії (розділ «Електрохімія») студентами напряму підготовки 6.070106 Автомобільний транспорт / О.Ю. Свєткіна, С.М. Лисицька; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2014. – 33 с.
41. Hassenzahl, W.V. Applied Superconductivity, Superconductivity, an enabling technology for 21st century power systems? // IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1447-1453, Volume: 11, Issue: 1, Mar 2001.
42. Manuel Alvarez, Sarah K. Rönnberg, Rafael Cossent, Jin Zhong, Bollen Math H.J. Remuneration assessment of a VPP providing distribution capacity services // 2017 IEEE Manchester PowerTech, 2007, 18-22 June.
43. Постанова Кабінету Міністрів України №1325 від 28. 12. 2020 р.
44. David A.K., Lee Y.C. Dynamic tariffs: theory of utility-consumer interaction // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989.
45. Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Erkki Laitinen, Jukka Heli, Erkki Antila. Electricity spot price forecasting as a part of energy management in de-regulated power market // Energy Management and Power Delivery, 1998.
46. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Location-based scheduling and pricing for energy and reserves: A responsive reserve market proposal // Decision Support Systems 40(3-4):563-577, October 2005.

47. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.
48. M. Siah, S. Porkar, A. Abbaspour-Tehrani-Fard, P. Poure and S. Saadate. Competitive distribution system planning model integration of dg, interruptible load and voltage regulator devices // Iranian Journal of Science and Technology Transaction B: Engineering 34(6), December 2010, pp. 619-635.
49. Steven Wong and J. David Fuller. Pricing Energy and Reserves Using Stochastic Optimization in an Alternative Electricity Market // IEEE Transactions on Power Systems (Volume:22, Issue: 2) – 2007.
50. Системи електропостачання на основі джерел розподіленої генерації / Кравченко О.П., Росінська Г.П., Бушинський А.В. // Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» MSIE – 2017, 2017. – С. 109 – 111.
51. Joshua A. Taylor, Ashutosh Nayyar, Duncan S. Callaway, Kameshwar Poolla. Consolidated Dynamic Pricing of Power System Regulation // IEEE Transactions on Power Systems (Volume 28, Issue: 4) – 2013.
52. Hadis Pourasghar Khomami, Mohammad Hossein Javidi. Energy Management of Smart Microgrid in Presence of Renewable Energy Sources Based on Real-time Pricing // Smart Grid Conference (SGC), 2014.
53. Arup Sinha, Rabindranath Lahiri, Somenath Byabortta, Shyamapada Chowdhury, Sunetra Chowdhury, Peter Crussley. Formulation of pricing mechanism for microgrid energy // SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar.
54. Xiaokang Xu, Derek W. Lane, Michael J., Edmonds S. A Simulation Tool for Calculating Energy Prices in Competitive Electricity Markets // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008.
55. Awad A.S.A., EL-Fouly T.H.M., Salama M.M.A. Optimal Distributed Generation Allocation and Load Shedding for Improving Distribution System Reliability // IEEE Transactions on Smart Grid (Volume:5, Issue: 5) – 2014.

56. Inam Ullah Nutkani, Wang Peng, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg. Autonomous Economic Operation of Grid Connected DC Microgrid // 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems.
57. Arup Sinha, A.K. Basu, R.N. Lahiri, S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, Crossley Peter A. «Setting of Market Clearing Price (MCP) in Microgrid Power Scenario // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
58. Arup Sinha, Rabindranath Lahiri, Somenath Byabortta, Shyamapada Chowdhury, Sunetra Chowdhury, Crussley Peter A. Formulation of pricing mechanism for microgrid energy» // SmartGrids for Distribution, 2008.
59. Toru Namerikawa, Norio Okubo, Ryutaro Sato, Yoshihiro Okawa, Masahiro Ono. Real-Time Pricing Mechanism for Electricity Market with Built-In Incentive for Participation // IEEE Transactions on Smart Grid (Volume: 6, Issue: 6) – 2015.
60. Severin Borenstein, Michael Jaske, Arthur Rosenfeld. Dynamic Pricing, Advanced Metering and Demand Response in Electricity Markets // Centre of the Study of Energy Markets –2002.
61. Time-of-Use tariffs. Innovation landscape brief // IRENA (2019).
62. Byung-Gook Kim, Yu Zhang, Mihaela van der Schaar, Jang-Won Lee. Dynamic Pricing for Smart Grid with Reinforcement Learning // 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS).
63. V. Preethi, G. Harish. Design and implementation of smart energy meter // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) – 26-27 Aug. 2016.
64. Sneha Chaudhari, Purvang Rathod, Ashfaque Shaikh, Darshan Vora, Jignesha Ahir. Smart energy meter using Arduino and GSM // 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI) – 11-12 May 2017.
65. Ledin, S.V. Konceptcija «elektrojenergija — tovar» kak katalizator razvitija Smart Grid // Avtomatizacija v promyshlennosti, 2012, 4.

66. Michael D. Bordo. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–77.
67. Zhuikov V., Petergerya J., Ivanin O., Electro-cost models of sources and loads for Local object power control // 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", At Waplewo, Poland, 2010, Volume: 3.
68. Структура тарифу на послуги з передачі електричної енергії в листопаді – грудні 2020 року Приватного акціонерного товариства «Національна енергетична компанія «Укренерго».
69. Дизельний генератор Teksan TJ138PE5C. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: <https://www.teksan.com/ru/diesel-generator-sets/tj138pe5c/400/1/>
70. Ціни на бензин, дизпаливо, газ на АЗС України. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/>
71. Визначення оптимальної потужності дизельних електростанцій. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: <http://dizel-market.ru/info/opredelenie-moshnosti-des.php>
72. Ильин В.А., Садовничий В.А., Сендов Б.Х. Математический анализ, ч. 1, изд. 3, ред. А.Н. Тихонов. - М.: Проспект, 2004.
73. Конспект лекцій з курсу “Теорія автоматичного керування” (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання») / Авт.: Абраменко І.Г., Абраменко Д.І. - Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
74. Постанова Кабінету Міністрів України № 238 від 24. 03. 2021 р.
75. Самойленко А.М., Перестюк М.О., Парасюк І.О. Диференціальні рівняння: Підручник. – К.: Либідь, 2003. – 600с.
76. SUPRA. Прогрессивная техника одноцилиндровых дизелей 5.0 – 11.8 кВт. [Електронний ресурс] // Режим доступу до ресурсу: http://hatz-motors.ru/sites/hatz-motors.ru/files/languages/hatz_1d81_1d90_rus.pdf
77. Whittaker, E.T. & Watson, G.N. (1927). A Course of Modern Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

78. Бабешко С.А. Диагностирование аккумуляторных энергетических установок с тиристорными преобразователями: Автореф. дис. канд. техн. наук: МАДИ. - М., 1988. - 20 с.
79. Брускин Д.Э. Зорохович И.П. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990. – 220 с.
80. [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/main/boards>
81. [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p>
82. [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series>
83. Michael Klements, «Simple Arduino Home Energy Meter». [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.the-diy-life.com/simple-arduino-home-energy-meter/>
84. Stroustrup, Bjarne. "The C++ Programming Language (Fourth Edition)". 2012-12-09.
85. Arduino IDE 1.8.15. [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/software>
86. TinkerCAD Autodesk. [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.tinkercad.com/>

**Додаток А.1. Програмний код для функціонування пристрою розрахунку
обсягу електроенергії першого генератора та радіо-модуля**

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною //SPI
#include <nRF24L01.h> // Підключення файлу настройки з бібліотеки //RF24
#include <RF24.h> // Підключення бібліотеки для роботи з //nRF24L01+
RF24 radio (9, 10); /* Створюється об'єкт radio для роботи з бібліотекою RF24,
вказуючи номери виводів nRF24L01+ (CE, CS) */
int currentPin = 1; //Призначення СТ на вхід 1
void setup()
{
  radio.begin(); // Ініціація роботи nRF24L01+
  radio.setChannel(5); /* Вказування каналу передачі даних (від 0 до 127), 5 -
значить передача даних здійснюється на частоті 2,405 ГГц (на одному каналі може
бути тільки 1 приймач і до 6 передавачів, тобто для випадку системи із двох
генераторів таке обрання каналу підходить.) */
  radio.setDataRate (RF24_1MBPS); /* Вказування швидкості передачі даних,
RF24_1MBPS – 1 Мбіт/сек */
  radio.setPALevel (RF24_PA_HIGH); // Вказування потужності передавача,
RF24_PA_HIGH=-6dBm
  radio.openWritingPipe (0xAABVCCDD11LL); /* Відкриття передавача з
ідентифікатором 0xAABVCCDD11LL для передачі даних (на одному каналі може
бути відкрито до 6 різних передавачів, які повинні відрізнятися тільки останнім
байтом ідентифікатора) */
}
void loop()
{
  int current = analogRead(currentPin); /* Зчитування поточного входу і запис
значення струму*/
  double data[1] = {0}; // Створення масиву для передачі даних

```

```
double RMSCurrent = (current)*0.707; /* Обчислення середньоквадратичного,  
ефективного струму */  
data[1] = 220*0.707*RMSCurrent; /* Обчислення обсягу електроенергії,  
отриманої від генератора за 1с., на базі середньоквадратичної потужності для  
напруги змінного струму 220В */  
radio.write(&data, sizeof(data)); /* Відправка даних з масиву data вказуючи  
скільки байт масиву необхідно відправити. */  
delay (1000); /* Затримка у 1000 мс, за цей час приймач встигне отримати і  
обробити дані від обох генераторів. Окрім того, пристрій розрахунку має  
реєструвати обсяг електроенергії кожну секунду. */  
}
```

**Додаток А.2. Програмний код для функціонування пристрою розрахунку
обсягу електроенергії другого генератора та радіо модуля**

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною //SPI
#include <nRF24L01.h> // Підключення файлу настройки з бібліотеки //RF24
#include <RF24.h> // Підключення бібліотеки для роботи з //nRF24L01+
RF24 radio (9, 10); /* Створюється об'єкт radio для роботи з бібліотекою RF24,
вказуючи номери виводів nRF24L01+ (CE, CS) */
int currentPin = 1; //Призначення СТ на вхід 1
void setup()
{
  radio.begin(); // Ініціація роботи nRF24L01+
  radio.setChannel(5); /* Вказування каналу передачі даних (від 0 до 127), 5 -
значить передача даних здійснюється на частоті 2,405 ГГц (на одному каналі може
бути тільки 1 приймач і до 6 передавачів, тобто для випадку системи із двох
генераторів таке обрання каналу підходить.) */
  radio.setDataRate (RF24_1MBPS); /* Вказування швидкості передачі даних,
RF24_1MBPS – 1 Мбіт/сек */
  radio.setPALevel (RF24_PA_HIGH); /* Вказування потужності передавача,
RF24_PA_HIGH=-6dBm */
  radio.openWritingPipe (0xAABBCCDD22LL); /* Відкриття передавача з
ідентифікатором 0xAABBCCDD22LL для передачі даних (на одному каналі може
бути відкрито до 6 різних передавачів, які повинні відрізнятися тільки останнім
байтом ідентифікатора) */
}
void loop()
{
  int current = 0; //Створення змінної для запису значення струму
  double data[1] = {0}; // Створення масиву для передачі даних
  current = analogRead(currentPin); /* Зчитування поточного входу і запис
значення струму */

```

```
double RMSCurrent = (current)*0.707; /* Обчислення середньоквадратичного,  
ефективного струму */
```

```
data[1] = 220*0.707*RMSCurrent; /* Обчислення отриманого за 1с. обсягу  
електроенергії на базі середньоквадратичної потужності для напруги змінного  
струму 220В */
```

```
radio.write(&data, sizeof(data)); /* Відправка даних з масиву data вказуючи  
скільки байт масиву необхідно відправити. */
```

```
delay (1000); /* Затримка у 1000 мс, за цей час приймач встигне отримати і  
обробити дані від обох генераторів. Окрім того, пристрій розрахунку має  
реєструвати обсяг електроенергії кожену секунду. */ }
```

Додаток Б. Програмний код мікроконтролера для прийому даних про спожиту електроенергію, розрахунку і передачі даних для визначення вартості одиниці електроенергії генераторів

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною //SPI
#include <nRF24L01.h> // Підключення файлу настройки з бібліотеки //RF24
#include <RF24.h> // Підключення бібліотеки для роботи з //nRF24L01+
RF24 radio (9, 10); /* Створюється об'єкт radio для роботи з бібліотекою RF24,
вказуючи номери виводів nRF24L01+ (CE, CS) */
void setup(){
    radio.begin(); // Ініціація роботи nRF24L01+
    radio.setChannel(5); /* Вказування каналу передачі даних (від 0 до 127), 5 -
значить прийом даних здійснюється на частоті 2,405 ГГц (на одному каналі може
бути тільки 1 приймач і до 6 передавачів, тобто для випадку системи із двох
користувачів таке обрання каналу підходить.) */
    radio.setDataRate (RF24_1MBPS); /* Вказування швидкості передачі даних,
RF24_1MBPS – 1 Мбіт/сек */
    radio.setPALevel (RF24_PA_HIGH); /* Вказування потужності передавача,
RF24_PA_HIGH=-6dBm */
    radio.openReadingPipe (1, 0xAABBCCDD11LL); /* Відкриття каналу 1 з
ідентифікатором 1-го передавача 0xAABBCCDDLL11, для прийому даних */
    radio.openReadingPipe (2, 0xAABBCCDD22LL); /* Відкриття каналу 2
ідентифікатором 2-го передавача 0xAABBCCDDLL22, для для прийому даних */
    radio.startListening (); /* Вмикання приймача, початок прослуховування
відкритих каналів */
    double data[1]={0}; // Створення масиву для прийнятих даних
    double W1_t=0; // Створення змінної для її подальшого використання
    double W2_t=0; // Створення змінної для її подальшого використання
    double W1[10]; /* Створення масиву із щосекундно генерованого обсягу
електроенергії на інтервалі в 10с. */

```

```

double W2[10]; /* Створення масиву із щосекундно генерованого обсягу
електроенергії на інтервалі в 10с. */
double W01=0; // Створення змінної для її подальшого використання
double W02=0; // Створення змінної для її подальшого використання
double C01=0; // Створення змінної для її подальшого використання
double C02=0; // Створення змінної для її подальшого використання
double Wsum1=0; /* Створення змінної для розрахунку сумарного обсягу
електроенергії 1-го генератора */
double Wsum2=0; /* Створення змінної для розрахунку сумарного обсягу
електроенергії 2-го генератора */
double Cv1=0; /* Створення змінної для запису розрахованого вагового
коефіцієнта 1-го генератора */
double Cv2=0; /* Створення змінної для запису розрахованого вагового
коефіцієнта 2-го генератора */
double Cb=24,54; /* Вартість дизельного палива в Україні станом на 30.12.2020
[70] */
int T=1; /* Інтервал, протягом якого реєструється обсяг спожитої
електроенергії. Для щосекундної //тарифікації T дорівнює 1 с. */
}
void loop(){
    if(radio.available(&pipe)){ /* Якщо у буфері маються прийняті дані,
отримується номер каналу передавача, по якому вони прийшли, за посиланням на
змінну pipe */
        if(pipe==1){
            radio.read(&data, sizeof(data)); // Запис даних у масив data
            for (int i = 0; i < 10; i++) { /*Розрахунок обсягу генерованої
електроенергії за кожен секунду інтервалу у 10с., та її суми */
                W1_t = data[1]*T;
                W1[i+1] = W1_t; /* Зберігання кожного значення щосекундно
згенерованого обсягу електроенергії */
            }
        }
    }
}

```

```

Wsum1 = Wsum1+W1_t;
} W01 = Wsum1/2;

double B01 = 0,0003*W01; /* Розрахунок об'єму витраченого палива
для прикладу дизель-генератора Teksan TJ138PE5C, у л/год за Вт [60]. */

C01 = (Cb*B01)/(W01); /* Розрахунок вартості одиниці
електроенергії для середнього значення обсягу електроенергії на обраному
інтервалі */

int sigma1 = Cb/C01;
} /*Якщо прийшли дані від пристрою розрахунку 1го
генератора*/

if(pipe==2){
radio.read(&data, sizeof(data)); // Запис даних у масив data
for (int i = 0; I < 10; i++) { /* Розрахунок обсягу генерованої
електроенергії за кожен секунду інтервалу у 10с., та її суми */
W2_t = data[1]*T;
W2[i+1] = W1_t; /* Зберігання кожного значення щосекундно
генерованого обсягу електроенергії */
Wsum2 = Wsum2+W2_t;
} W02 = Wsum2/2;

double B02 = 0,0003*W02; /* Розрахунок об'єму витраченого палива
для прикладу дизель-генератора Teksan TJ138PE5C, у л/год за Вт [69]. */

C02 = (Cb*B01)/(W01); /* Розрахунок вартості одиниці
електроенергії для середнього значення генерованого обсягу електроенергії на
обраному інтервалі */

int sigma2 = Cb/C02;
} /* Якщо прийшли дані від пристрою розрахунку 2го
генератора*/

Cv1=Wsum1/(Wsum1+Wsum2); /* Розрахунок вагового коефіцієнту
першого генератора */

```

```

    Cv2=Wsum2/(Wsum1+Wsum2); /* Розрахунок вагового коефіцієнту
другого генератора */
    }
    radio.stopListening (); /* Вимикання приймача, так як необхідно передати
дані */
    delay(100);
    radio.setChannel(27); /* Вказування каналу передачі даних (від 0 до 127),
27 - значить передача даних здійснюється на частоті 2,427 ГГц (на одному каналі
може бути тільки 1 приймач і до 6 передавачів. Тому доводиться змінити канал, аби
передавати розраховані дані до наступного мікроконтролера, який обладнаний
своїм приймачем. До цього етапу на каналі 5 працював 1 приймач і 2 передавачі.
Відтепер на каналі 27 працюватимуть 1 передавач і 1 приймач. */
    radio.openWritingPipe(0xAABCCDD33LL); /* Відкриття каналу
ідентифікатором передавача 0xAABCCDDL33, для передачі даних */
    double data1[6] = {W1, W01, sigma1, B01, C01, Cv1}; /* Створення масиву
із розрахованих параметрів першого генератора на протязі його роботи на інтервалі
10с. */
    double data2[6] = {W2, W02, sigma2, B02, C02, Cv2}; /* Створення масиву
із розрахованих параметрів другого генератора на протязі його роботи на інтервалі
10с. */
    double dataall[2] = {data1, data2}; /* Створення загального масиву із
підготованих до передачі даних 1-го та 2-го генераторів */
    radio.write(&dataall, sizeof(dataall)); /* Відправка даних з масиву dataall
вказуючи скільки байт масиву необхідно відправити. */
    }

```


Додаток В. Програмний мікроконтролера розрахунку вартості одиниці електроенергії для генераторів та сумарної вартості електроенергії, що генерується щосекундно

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною //SPI
#include <nRF24L01.h> // Підключення файлу настройки з бібліотеки //RF24
#include <RF24.h> // Підключення бібліотеки для роботи з //nRF24L01+
RF24 radio (9, 10); /* Створюється об'єкт radio для роботи з бібліотекою RF24,
вказуючи номери виводів nRF24L01+ (CE, CS) */
void setup(){
    radio.begin(); // Ініціація роботи nRF24L01+
    radio.setChannel(27); /* Вказування каналу передачі даних (від 0 до 127), 27 -
значить прийом даних здійснюється на частоті 2,427 ГГц */
    radio.setDataRate (RF24_1MBPS); /* Вказування швидкості передачі даних,
RF24_1MBPS – 1 Мбіт/сек */
    radio.setPALevel (RF24_PA_HIGH); /* Вказування потужності передавача,
RF24_PA_HIGH=-6dBm */
    radio.openReadingPipe (1, 0xAABBBCCDD33LL); /* Відкриття каналу 1 з
ідентифікатором передавача 0xAABBBCCDDL33LL, для прийому даних */
    radio.startListening (); /* Вмикання приймача, початок прослуховування
відкритих каналів */
    double dataall[2]={0, 0}; //Створення масиву для запису отриманих даних
    double W1[10]; /* Створення масиву для запису щосекундно генерованої 1-
м генератором електроенергії */
    double W2[10]; /* Створення масиву для запису щосекундно генерованої 2-
м генератором електроенергії */
    double C1[10]; /* Створення масиву для запису щосекундно розрахованої
вартості базової частини електроенергії 1го генератора */
    double C2[10]; /* Створення масиву для запису щосекундно розрахованої
вартості базової частини електроенергії 1го генератора */

```

```

double Csum[10]; /* Створення масиву для запису щосекундно
розрахованого об'єму електроенергії, генерованого сумарно обома генераторами
*/

double data1[6];
double data2[6];
}
void loop() {
radio.read(&dataall, sizeof(dataall)); // Запис даних у масив dataall
data1 = dataall[1]; /* Зчитування параметрів першого генератора із
отриманого масива */
data2 = dataall[2]; /* Зчитування параметрів другого генератора із
отриманого масива */
W1 = data1[1]; /* Вилучення даних про щосекундно генерований 1-м
генератором обсяг електроенергії */
W2 = data2[1]; /* Вилучення даних про щосекундно генерований 2-м
генератором обсяг електроенергії */
for (int i = 1; I <= 10; i++) { /*Розрахунок вартості одиниці електроенергії 1-
го генератора та запис даних до відповідного масиву*/
C1[i] = ((data1[2]+data1[3]*data1[4])/(W1[i]+data1[3]*data1[4]))*data1[5];
}
for (int i = 1; I <= 10; i++) { /*Розрахунок вартості одиниці електроенергії 2-
го генератора та запис даних до відповідного масиву*/
C2[i] = ((data2[2]+data2[3]*data2[4])/(W2[i]+data2[3]*data2[4]))*data2[5];
}
for (int i = 1; I <= 10; i++) { /*Розрахунок суми щосекундно генерованого
обсягу електроенергії обох генераторів*/
Csum[i] = C1[i]*data1[6]+C2[i]*data2[6]; } }

```

**Додаток Г. Програмний код для мікроконтролера пристрою розрахунку з
LCD-дисплеєм**

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною //SPI
#include <LiquidCrystal.h> // Підключення бібліотеки для LCD екрану
int currentPin = 1; //Призначення СТ на вхід 1
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); /* Призначення входів на платі для приєднання
LCD */
void setup()
{
  lcd.begin(16,2); // стовпці, рядки. Використовується 16,2 для LCD-дисплея
16x2
  lcd.clear(); // очистка екрану дисплея
  lcd.setCursor(0,0); // встановити курсор на стовпець 0, рядок 0 (перший рядок)
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  int current = analogRead(currentPin); /* Зчитування поточного входу і запис
значення струму */
  double data[1] = {0}; // Створення масиву для передачі даних
  double RMSCurrent = (current)*0.707; /* Обчислення середньоквадратичного,
ефективного струму */
  data[1] = 220*0.707*RMSCurrent; /* Обчислення обсягу електроенергії,
отриманої за одну секунду на базі середньоквадратичної потужності генератора */
  lcd.print(RMSCurrent);
  lcd.print("A");
  lcd.setCursor(0,10);
  lcd.print(data[1]);
  lcd.print("kWh"); }

```

Додаток Г. Програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії

```

#include <SPI.h> // Підключення бібліотеки для роботи з шиною SPI
#include <LiquidCrystal.h> // Підключення бібліотеки для LCD екрану
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); /* Призначення входів на платі для приєднання
LCD */

double Wone_t = 0; // Змінна для запису величини електроенергії
double Wone[10]; // Масив для запису щосекундно генерованої електроенергії
double Wzero_one = 0; /* Змінна для запису середнього значення енергії,
згенерованої за досліджуваний період */

double Czero_one = 0; /* Змінна для запису вартості базової частини середнього
значення генерованої електроенергії */

double Cv_one = 1; // Ваговий коефіцієнт 1-го генератора
double Wsum_one = 0; /* Змінна для запису розрахованого сумарного об'єму
генерованої електроенергії */

double Cb = 24.54; // Вартість дизельного палива в Україні [70]
double Cone[10]; /* Масив для щосекундного запису вартості одиниці
електроенергій 1-го генератора */

int T = 1; // Інтервал в 1с. для щосекундної реєстрації обсягу генерованої
електроенергії

int sigma_one = 0; // Змінна для запису розрахованого коефіцієнту "сигма"
int currentPin = 1; //Призначення СТ на вхід 1

void setup()
{
  lcd.begin(16,2); // стовпці, рядки. Використовується 16,2 для LCD-дисплея
16x2
  lcd.clear(); // очистка екрану дисплея
  lcd.setCursor(0,0); // встановити курсор на стовпець 0, рядок 0 (перший рядок)
  Serial.begin(9600);
}

```

```

void loop()
{
  for (int i = 0; i<10; i++){
    int current = analogRead(currentPin); /* Зчитування поточного входу і запис
значення струму */
    double data[1] = {0}; // Створення масиву для запису розрахованої потужності
    double RMSCurrent = (current)*0.707; /* Обчислення середньоквадратичного,
ефективного струму */
    data[1] = 220*0.707*RMSCurrent; // Розрахунок ефективної потужності
    Wone_t = data[1]*T; // Розрахунок генерованого за 1с. обсягу електроенергії
    Wone[i+1] = Wone_t; // Запис величини генерованого обсягу електроенергії до
відповідного масиву
    Wsum_one = Wsum_one+Wone_t; /*Підрахунок об'єму електроенергії,
згенерованої за весь інтервал часу*/ }
    Wzero_one=(Wsum_one)/2; /* Розрахунок середнього значення обсягу
електроенергії, згенерованого за досліджуваний період */
    double Bzero_one = 0.333*Wzero_one; /* Розрахунок об'єму витраченого
палива для прикладу генератора Teksan TJ138PE5C, у л/год за Вт [69]. */
    Czero_one = (Cb*Bzero_one)/(Wzero_one); /* Розрахунок вартості одиниці
електроенергії для середнього значення обсягу генерованої електроенергії */
    sigma_one = Cb/Czero_one; // Розрахунок коефіцієнту "сигма"
    for (int k = 1; k<=10; k++){
      Cone[k]
      =
      ((Wzero_one+sigma_one*Bzero_one)/(Wone[k]+sigma_one*Bzero_one))*Czero_one;
/* Розрахунок вартості одиниці електроенергії 1-го генератора та запис даних до
відповідного масиву */ }
    lcd.print(Wone[1]);
    lcd.print("  W*s");
    lcd.setCursor(0,10);
    lcd.print(Cone[1]);
    lcd.print("  uah/W*s");

```

Додаток Д. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір



Додаток Е. Список публікацій

1. Рибіна О. Б., Бойко І. Ю. «Оцінка стану та перспективи використання пристроїв силової електроніки в Україні» // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - Збірник наукових праць. - 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, №5 (94) - Київ, 2016 - с. 43-50.
3. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю. «Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи» // Електроніка та зв'язок, 2016, Том 21, № 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, 2016, № 3(78) - с. 66-75.
5. Жуйков В. Я., Бойко І. Ю., Застосування лінеаризованої електро-вартісної моделі для дослідження характеру перехідних процесів у ізолюваній генеруючій системі // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 4. - с. 41-49.
6. Бойко І. Ю. Актуальність застосування динамічної тарифікації для генеруючих систем Microgrid // Енергетика: економіка, технології, екологія. 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, 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, 2021. pp. 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.

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.