

SMART GRID СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ

SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 621.314:657

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261374

І.Ю. Бойко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8044-137X

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОТОТИП ПРИСТРОЮ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНОЇ ВАРТОСТІ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

З метою впровадження гнучкої динамічної тарифікації споживачам необхідно мати здатність динамічної відповіді, яка визначається на основі постійного контролю впливу зворотного зв'язку між постачальником та споживачами електроенергії на зміну значень параметрів навантаження. Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаний електроенергетичній системі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції. Реалізувати завдання відстеження споживаної кожним користувачем електроенергії з метою дотримання умови макроекономічного балансу та динамічної оптимізації механізму тарифікації електроенергії пропонується за допомогою використання концепції розумного лічильника.

Метою дослідження є розробка системи для гнучкого динамічного визначення вартості одиниці електроенергії кожного генератора у складі локальної ізольованої SmartGrid. При відхиленні обсягу генерованої енергії від деякого рівня, встановленого для даного інтервалу часу має виконуватись щосекундний розрахунок нової тарифної вартості одиниці електроенергії. Кожен споживач під'єднаний до лічильника, який реєструє зміну обсягу отриманої електроенергії у динамічному режимі. Лічильник містить вбудований мікропроцесор та обладнаний радіо - модулем для реєстрації та обміну даними із підсумовуючим мікроконтролером, який виконує функції розрахунку загального обсягу спожитої електроенергії. А також частину електроенергії, внесеної конкретним генератором. Для розрахунку вартості одиниці електроенергії кожного генератора у складі енергосистеми та сумарної вартості електроенергії, що генерується щосекундно всіма генераторами запропоновано використання третього мікроконтролера із вбудованим мікропроцесором та радіо - модулем.

У результаті виконане моделювання роботи запропонованого пристрою на прикладі системи з одним генератором продемонструвало адекватну його роботу відповідно теоретичним положенням.

Ключові слова: SmartGrid, енергогенеруюча система, динамічна тарифікація, розумний лічильник, мікроконтролер, пристрій розрахунку.

Вступ. Останнім часом відмічається все більш широке розповсюдження локальних енергогенеруючих систем, які передбачають створення на певній території власних енергомережових структур, здатних працювати в тому числі автономно (Microgrid). Для таких локальних 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 [1]. Для забезпечення енергоефективності таких систем необхідно вбачається відмова від встановлених наразі статичних тарифів на електроенергію у вигляді грн/кВт · год [2] на користь більш гнучкої тарифікації, у якій заради виконання умови макроекономічного балансу у енергогенеруючій системі [3] перерахунок нової вартості одиниці електроенергії у грн/Вт · с виконується щосекундно, в залежності від рівня споживаної електроенергії [4].

Для впровадження гнучкої динамічної тарифікації споживачам необхідно мати здатність 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 [5, 6] 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 [6]. У роботі [7] представлено стратегію централізованого керування енергогенеруючою системою у складі Microgrid, за допомогою ціноутворення

в реальному часі. Для подальшого розвитку моделі необхідно врахувати динамічну зміну навантаження і відповідні перехідні процеси. Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаний електроенергетичній системі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції [8].

Реалізувати завдання відстеження споживаної кожним користувачем електроенергії з метою дотримання умови макроекономічного балансу та динамічної оптимізації механізму тарифікації електроенергії пропонується за допомогою використання концепції розумного лічильника (Smart Energy Meter, SEM). SEM – це електричний пристрій, що має мікросхему лічильника енергії для вимірювання спожитої електроенергії та бездротовий протокол для передачі даних [9]. Використання SEM у складі раніше згаданої Microgrid автоматично перетворює дану локальну енергосистему на SmartGrid [10]. У цьому лічильнику використана енергія та відповідна кількість буде постійно відображатися на ПК-дисплеї та передаватися до мікроконтролера наступного рівня. Запропонована система замінює традиційні методи зчитування лічильників і забезпечує віддалений доступ виробника електроенергії до існуючого лічильника. Також він може регулярно контролювати показання лічильників без відвідування кожного будинку.

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 [11]. Дана робота описує хід розробки прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії, за допомогою якого реалізується функція корегування тарифної вартості одиниці електроенергії. Також, споживач на основі отриманих даних про зміну тарифної вартості може приймати рішення про корегування рівня споживання електроенергії. Такий прототип може вважатися SEM.

Мета та завдання дослідження. Для досягнення дотримання умови макроекономічного балансу у енергогенеруючій системі виконати проектування та моделювання роботи прототипу розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії. Створений раніше алгоритм для динамічного визначення вартості одиниці електроенергії [12] у системі з кількома енергогенераторами було використано у ході розробки прототипу пристрою розрахунку.

Модель розрахунку електроенергії. Прототип пристрою розрахунку рівня генерованої електроенергії генератором електроенергії однофазної мережі із мікроконтролером МК_{*i*}, де *i* – номер генератора у складі SmartGrid, може бути виконано на базі мікросхеми Arduino Uno [13], який містить у собі мікропроцесор ATmega328P [14]. Для передачі інформації про обсяг спожитої електроенергії до підсумовуючого мікроконтролера МК_{*Σ*} використовується радіо - модуль NRF24L01+ [15], запрограмований на передачу необхідних даних. Мікроконтролер МК_{*Σ*} також виконано на базі Arduino Uno із модулем NRF24L01+, налаштованим на прийом та передачу даних. Схему під'єднання пристрою розрахунку до однієї фази виділено у блоці ПР_{*i*} на рис.1.

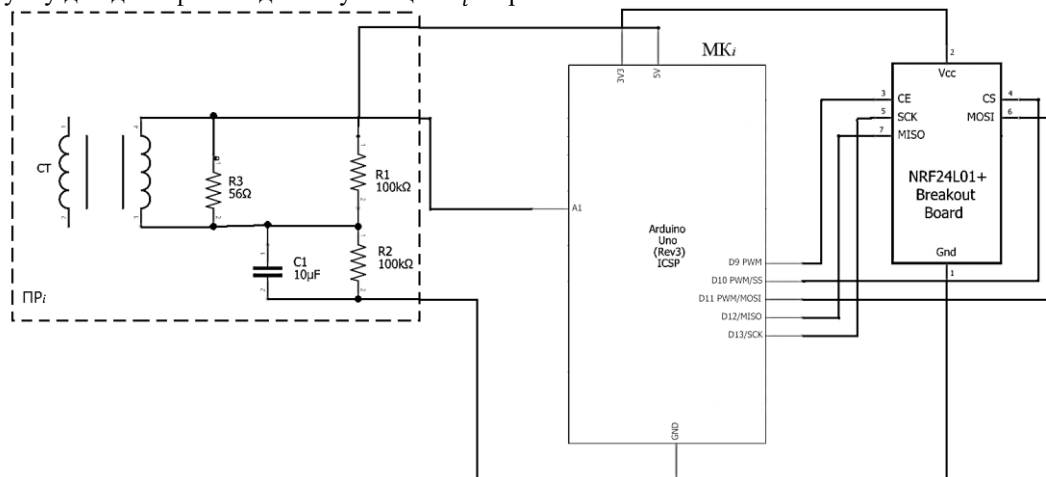


Рисунок 1 – Спрощена схема пристрою розрахунку з радіо - модулем

Побудова пристрою розрахунку на базі Arduino Uno основана на методиці, викладеній у [16], з тією відмінністю, що до контактів D9 PWM, D10 PWM/SS, D11 PWM/MOSI, D12/MISO, D13/SCK, 3V3, GND мікроконтролера МК_{*i*}, 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 $R_1, R_2, 100 \text{ кОм}$;
5. конденсатор $C_1, 10 \text{ мкФ}$;
6. радіо - модуль NRF24L01+.

Пристрій розрахунку PP_i під'єднується до контактів A1, 5V, GND мікроконтролера MK_i .

Arduino Uno має лише аналогові входи напруги, які вимірюють $0 - 5 \text{ В}$ постійного струму, тому вихідний струм від СТ, (current transformer), необхідно перетворити в еталон напруги, а потім масштабувати еталон напруги в діапазон $0 - 5 \text{ В}$. 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 R_3 врахуємо, що коефіцієнт трансформації СТ = 1000. Враховуючи рекомендації методики викладеної у [16] і приймаючи струм первинної обмотки рівним 42А визначаємо значення $R_3 = 59,5 \text{ Ом}$ і обираємо найближче стандартне значення 56 Ом [16].

Ємність конденсатора $C_1 = 10 \text{ мкФ}$. Дільник напруги $R_1 = R_2 = 100 \text{ кОм}$.

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++ [17], 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 [18]. Схема пристроїв розрахунку для інших генераторів, працюючих у складі SmartGrid має вигляд, аналогічний до наведеного на рис. 1.

Код для функціонування інших пристроїв розрахунку також аналогічний до коду для мікроконтролера першого пристрою розрахунку, з відмінністю у ідентифікаторі передавача.

Схему мікроконтролера MK_2 наведено на рис. 2. Для живлення мікроконтролера використовується акумулятор напругою 5В, під'єднаний до контактів мікроконтролера 5V, GND.

Програмний код на мові C++ для функціонування мікроконтролера для прийому даних про спожиту електроенергію, розрахунку і передачі даних для подальшого визначення вартості одиниці електроенергії кожного генератора було завантажено за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікроконтролера ATmega328P. Схема мікроконтролера MK_C де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії C_i для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами C_2 аналогічна до наведеної на рис. 2. Програмний код для функціонування мікроконтролера де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами було складено на мові C++ та завантажений вбудованого мікропроцесора мікроконтролера MK_C .

Модель роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії

Для побудови схеми пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії та симуляції його роботи обрано середовище TinkerCAD [19], 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. 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). Контакти LED+, VDD, DB7, DB6, DB5, DB4, E, RS, та VSS LCD дисплею під'єднані до контактів 5V, D7 PWM, D6 PWM, D5 PWM, D4, D9 PWM, D8 та GND мікроконтролера MK_1 відповідно. Яскравість дисплею регулюється за допомогою додаткового потенціометра з опором 10 кОм, під'єднаний до контактів VD дисплею та 5V, GND мікроконтролера MK_1 .

Також, для задання необхідної напруги живлення LCD дисплею додано резистор R_4 з опором 220 Ом [16], під'єднаний до контактів LED+ дисплею та 5V мікроконтролера МК₁. Спрощену схему пристрою розрахунку з LCD дисплеєм роздільної здатності (16x2) та генератором сигналів під'єднаним до шунтуючого резистора R3 зображено на рис. 3.

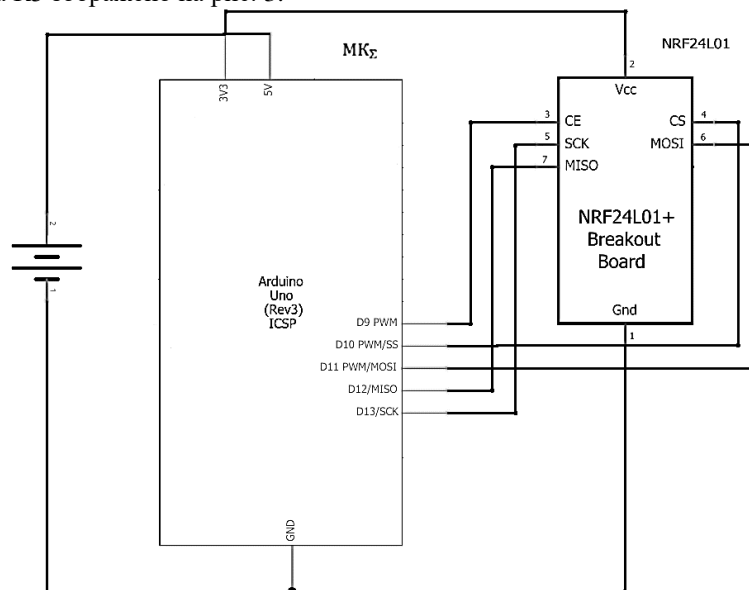


Рисунок 2 – Спрощена схема мікроконтролера для прийому даних і визначення вартості електроенергії

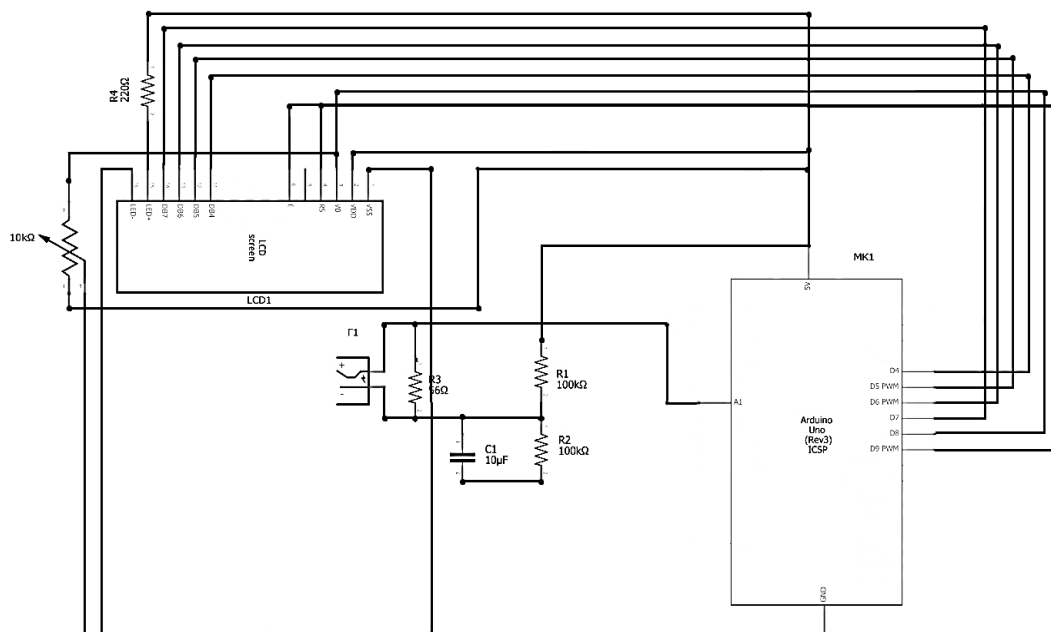


Рисунок 3 – Спрощена схема пристрою розрахунку електроенергії

Моделі роботи пристрою розрахунку першого генератора у складі SmartGrid наведено на рис. 4.

Перший рядок LCD дисплею відображає середньоквадратичний струм на виході генератора, тоді як другий рядок – рівень електроенергії.

Програмний код для мікроконтролера пристрою розрахунку з LCD – дисплеєм було складено на мові C++ та завантажено до вбудованого мікропроцесора. Параметри генератора сигналу Γ_1 наведено у табл. 1.

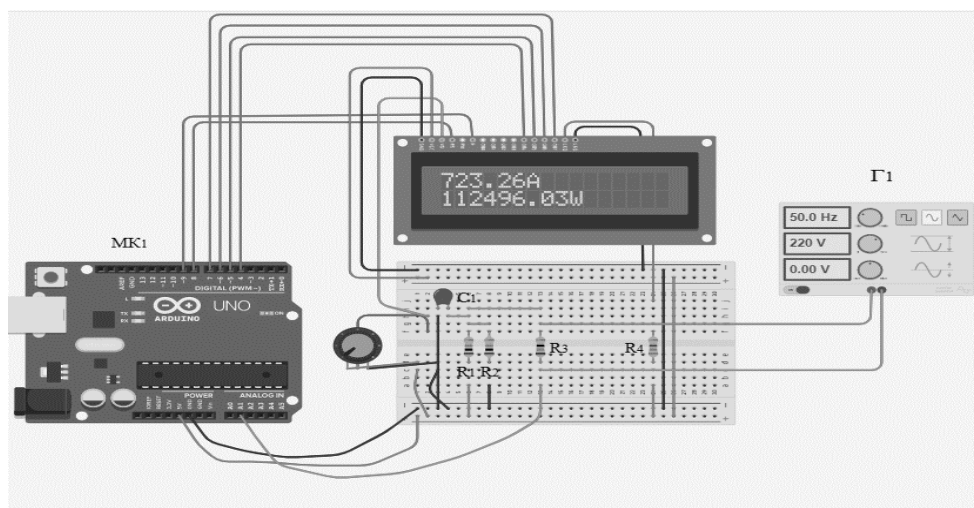


Рисунок 4 – Модель роботи пристрою розрахунку на мікроконтролері МК₁

Таблиця 1 – Параметри генератора сигналу.

Джерело сигналу	Напруга, В	Частота, Гц	Напруга зсуву, В
Г ₁	220 В	50 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 код мікроконтролера пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії МК_{*i*} де *i* – 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 С_{*i*} для кожного генератора. Результати симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії для генератора Г₁ наведені на рис. 5. Перший рядок LCD дисплея відображає електроенергію, отриману від генератора за цю секунду, а другий рядок – її вартість. Програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії для генератора Г₁ було складено на мові C++ та завантажено до вбудованого мікропроцесора.

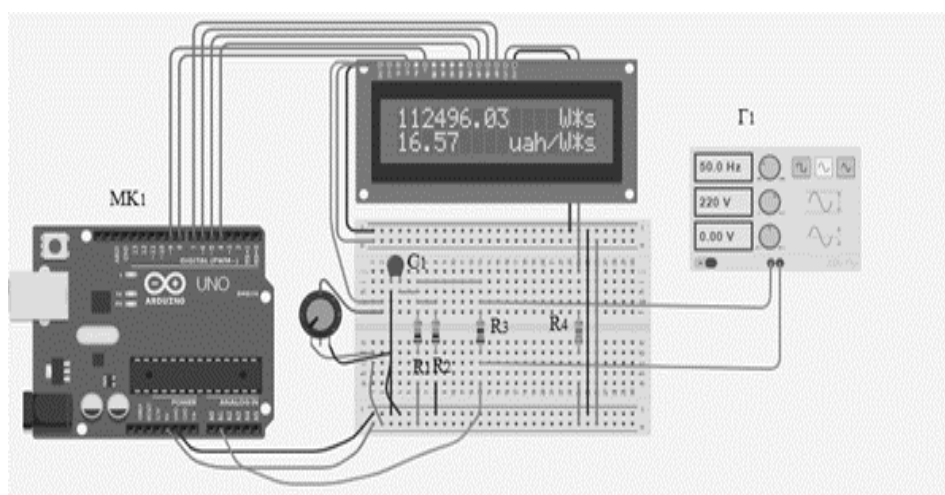


Рисунок 5 – Результат симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії генератора Г₁

Представлена модель пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії має свої переваги, так як при програмному поєднанні функцій всіх мікроконтролерів у код 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. Для виконання алгоритму динамічної тарифікації запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega328P для щосекундного розрахунку вартості одиниці електроенергії, що дозволяє реалізувати на практиці запропоновані теоретичні положення розрахунку динамічної тарифікації. 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. Проведене моделювання розрахунку електроенергії на прикладі системи з одним генератором показало адекватну роботу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії відповідно теоретичним положенням.

Список використаної літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України №1325 від 28.12.2020 р.
2. Тарифи на електроенергію в 2021 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/>
3. Michael D. Bordo. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–77.
4. 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.
5. David A.K., Lee Y.C. Dynamic tariffs: theory of utility-consumer interaction // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989.
6. 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.
7. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.
8. 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.
9. V. Preethi and G. Harish. Design and implementation of smart energy meter // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) – 26-27 Aug. 2016
10. Jixuan Zheng, David Wenzhong Gao and Li Lin. Smart Meters in Smart Grid: An Overview // 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) – 4-5 April 2013
11. Бойко І. Ю. Динамічна тарифікація у системі електроживлення: автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 09. 03. Київ, 2021. 20 с.
12. Свідчення 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.
13. Arduino Older Boards. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/main/boards/>
14. ATmega328P. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p/>
15. Single Chip 2.4GHz Transceiver. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series/>
16. Michael Klements. Simple Arduino Home Energy Meter. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.the-diy-life.com/simple-arduino-home-energy-meter/>
17. Bjarne Stroustrup. "The C++ Programming Language (Fourth Edition)". 2012-12-09.
18. Arduino IDE 1.8.15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/software/>
19. TinkerCAD Autodesk. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com/>

I. Boiko, Ph.D, ORCID 0000-0002-8044-137X

National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

PROTOTYPE OF THE CALCULATION DEVICE OF DYNAMIC COST OF THE BASIC PART OF ELECTRICITY

In order to implement flexible dynamic billing, consumers need to be able to respond dynamically, which is determined by constantly monitoring the impact of feedback between the supplier and consumers of electricity

on changes in the values of load parameters. Smart sensor technologies allow a unified power supply system to supply electricity more efficiently through dynamic analysis of supply and demand. It is proposed to implement the task of tracking the electricity consumed by each user in order to comply with the conditions of macroeconomic equilibrium and dynamic optimization of the pricing mechanism for electricity using the concept of smart meters.

The aim of the study is to develop a system for flexible dynamic determination of the cost of the basic part of electricity for each generator in the local isolated SmartGrid. If the volume of generated energy deviates from a certain level set for a given time interval, a new calculation of the new tariff value per basic part of electricity must be performed every second. Each consumer is connected to a meter, which registers the change in the amount of electricity received in a dynamic mode. The meter contains a built-in microprocessor and is equipped with a radio module for registration and data exchange with a summarizing microcontroller, which performs the functions of calculating the total amount of electricity consumed. As well as part of the electricity supplied by a particular generator. To calculate the cost of basic part of electricity for each generator in the power system and the total cost of electricity generated every second by all generators, the using of a third microcontroller with built-in microprocessor and radio module is proposed. As a result, the simulation of the proposed device on the example of a system with one generator demonstrated its adequate operation in accordance with the theoretical provisions.

Key words: SmartGrid, energy generation system, dynamic billing, smart meter, microcontroller, calculation device.

References

1. The Cabinet of Ministers of Ukraine, decree №1325. (2020, Dec. 28).
2. Electricity tariffs in 2021. [Online]. Available: <https://index.minfin.com.ua/>. Accessed on: Mar. 13. 2022.
3. Michael D. Bordo. Equation of exchange // *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 1987, v. 2, pp. 175–77.
4. 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.
5. David A.K., Lee Y.C. Dynamic tariffs: theory of utility-consumer interaction // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, August 1989.
6. Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Erkki Laitinen, Jukka Helli, Erkki Antila. Electricity spot price forecasting as a part of energy management in de-regulated power market // *Energy Management and Power Delivery*, 1998.
7. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // *System Sciences*, 2003.
8. 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.
9. V. Preethi and G. Harish. Design and implementation of smart energy meter // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) – 26-27 Aug. 2016
10. Jixuan Zheng, David Wenzhong Gao and Li Lin. Smart Meters in Smart Grid: An Overview // 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) – 4-5 April 2013
11. I. Boiko, "Dynamic tariffication in the power supply system," Ph.D. thesis, "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, 2021.
12. M. Rybiy and I. Boiko, « Application of prosumers at the local level Smart Grid and taking into account the algorithm of dynamic billing». *Appl.* 101337, Dec. 21, 2020.13. Arduino Older Boards. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/main/boards/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
14. ATmega328P. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
15. Single Chip 2.4GHz Transceiver. [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
16. Michael Klements. Simple Arduino Home Energy Meter. [Online]. Available: <https://www.the-diy-life.com/simple-arduino-home-energy-meter/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
17. Bjarne Stroustrup. "The C++ Programming Language (Fourth Edition)". 2012-12-09.
18. Arduino IDE 1.8.15. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
19. TinkerCAD Autodesk. [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/> Accessed on: Mar. 13. 2022.

Надійшла 16.03.2022

Received 16.03.2022