

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ARDUINO З ВИЯВЛЕННЯМ АНОМАЛІЙ ТА ВІДДАЛЕНИМ МОНІТОРИНГОМ

Зеленський Д.В. – здобувач бакалаврату, denzelya15@gmail.com

Павленко В.М. – к.т.н., доцент, v.pavlenko@nubip.edu.ua

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Метою роботи є розробка недорогої системи моніторингу параметрів електромережі на основі мікроконтролера Arduino з функціями вимірювання напруги, струму, частоти, коефіцієнта потужності, виявлення відхилень від нормованих значень та передачі даних у хмарне сховище для real-time аналізу якості електроенергії.

Актуальність. Моніторинг параметрів електричних мереж є критично важливим для забезпечення надійності енергопостачання, виявлення аварійних ситуацій та підвищення ефективності роботи електрообладнання. Smart-технології відіграють ключову роль у підвищенні надійності та ефективності електричних мереж через забезпечення real-time моніторингу та предиктивної аналітики. В умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільні мережі необхідність контролю якості електроенергії зростає через нестабільний характер генерації ФЕС та вітрових установок [1].

Традиційні промислові системи моніторингу (SCADA, PMU) коштують \$5000-50000, що робить їх недоступними для малих споживачів, фермерських господарств та локальних об'єктів. Використання мікроконтролерних платформ Arduino/ESP32 дозволяє створити функціональні системи моніторингу вартістю \$50-200, що у 100 разів дешевше промислових аналогів при збереженні точності вимірювань 1-2%. (табл.1.)

Таблиця 1 – Функціональні модулі системи моніторингу параметрів електромережі

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ МОДУЛЬ	КОМПОНЕНТИ	ПРИЗНАЧЕННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ
ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ	Датчик напруги ZMPT101B (0-250V AC), АЦП мікроконтролера 10-біт	Вимірювання діючого значення (RMS) напруги з точністю $\pm 1\%$, виявлення перенапруг ($>253V$) та провалів ($<207V$), частота семплювання 1 кГц
ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ	Датчик струму ACS712 (0-30A) на ефекті Холла, калібрування по	Вимірювання RMS струму, визначення пікових струмів, детектування перевантажень та коротких замикань,

	еталону	точність $\pm 2\%$
ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ	Алгоритм Zero-Crossing Detection, таймери мікроконтролера	Вимірювання частоти мережі (норма 50 Гц ± 0.2 Гц), виявлення відхилень при підключенні генераторів або острівній роботі ВДЕ
РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ	Аналіз зсуву фаз між напругою та струмом, обчислення $\cos \varphi$	Визначення активної/реактивної/повної потужності, виявлення індуктивних навантажень ($\cos \varphi < 0.85$), рекомендації щодо компенсації
ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ	Алгоритми порогового контролю, аналіз тривалості відхилень	Детектування провалів напруги (SAG), перенапруг (SWELL), переривань (>3 сек), коротких імпульсних завад, формування тривог
ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ	SD-карта (логування 24/7), EEPROM для налаштувань	Зберігання часових рядів параметрів з частотою 1 раз/сек, історія подій (аварії, перемикання), циклічний запис при переповненні
ПЕРЕДАЧА ДАНИХ	Wi-Fi модуль ESP8266, MQTT-протокол, ThingSpeak API	Передача даних у хмарне сховище кожні 15 секунд, віддалений доступ через веб-інтерфейс, push-сповіщення при аваріях через Telegram Bot
ВІЗУАЛІЗАЦІЯ	LCD-дисплей 20x4, веб-дашборд на Grafana, мобільний додаток	Локальне відображення миттєвих значень V, I, P, $\cos \varphi$, графіки за добу/тиждень/місяць на веб-панелі, порівняння з нормами

Центральним елементом системи є мікроконтролер Arduino Mega 2560 (ATmega2560, 16 МГц, 256 кБ Flash, 8 кБ RAM) з підключеними датчиками через аналогові входи А0-А7. Вибір Arduino Mega обумовлений достатньою кількістю аналогових входів (16 каналів) для підключення 3-фазних вимірювальних модулів та великим обсягом пам'яті для зберігання алгоритмів обробки сигналів.

Датчик напруги ZMPT101В базується на трансформаторному перетворенні з гальванічною розв'язкою, що забезпечує безпеку мікроконтролера. Вихідний сигнал 0-5 В пропорційний вхідній напрузі 0-250 В змінного струму. Калібрування виконується за формулою:

$$V_{RMS} = \frac{ADC_{reading} - ADC_{offset}}{Sensitivity} \times Calibration_Factor$$

де $ADC_{reading}$ – значення АЦП (0-1023), $ADC_{offset} = 512$ – зміщення при нульовій напрузі, $Sensitivity$ – чутливість датчика (40 одиниць АЦП на 1 В RMS).

Датчик струму ACS712-30А вимірює струм через провідник на основі ефекту Холла з виходом 66 мВ/А. Для підвищення точності вимірювань малих

струмів (< 1 А) використовується оверсемплінг – збір 100 вибірок протягом 20 мс (один період 50 Гц) з подальшим обчисленням RMS:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - I_{avg})^2}$$

Вимірювання частоти реалізовано через детектування моментів переходу напруги через нуль (Zero-Crossing) з підрахунком часу між послідовними переходами через таймер Timer1 мікроконтролера з точністю 4 мкс .

Коефіцієнт потужності обчислюється через аналіз зсуву фаз ϕ між напругою та струмом:

$$\cos \phi = \frac{P_{active}}{P_{apparent}} = \frac{V_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos \phi}{V_{RMS} \times I_{RMS}}$$

Активна потужність P_{active} визначається як середнє добуток миттєвих значень напруги та струму за період.

Система реалізує тріступеневу систему виявлення відхилень від нормованих параметрів згідно ДСТУ 13109-97 :

- **Провали напруги (SAG).** Якщо $V_{RMS} < 207$ В (90% номіналу) протягом > 0.5 сек, система фіксує подію SAG і зберігає часові мітки початку/кінця, мінімальну напругу та тривалість. При провалі < 180 В ініціюється аварійна тривога.
- **Перенапруги (SWELL).** При $V_{RMS} > 253$ В (110% номіналу) протягом > 1 сек система відправляє сповіщення користувачу. Критичний поріг 260 В призводить до автоматичного вимкнення некритичних навантажень через реле.
- **Відхилення частоти.** Норма частоти 50 Гц ± 0.2 Гц. При виході за межі 49.8-50.2 Гц система сигналізує про можливу роботу в острівному режимі (при наявності локальних генераторів або ВДЕ).

Модуль Wi-Fi ESP8266 підключений до Arduino через UART з швидкістю 115200 baud. Система відправляє дані у хмарний сервіс ThingSpeak кожні 15 секунд через MQTT-протокол.

Веб-дашборд на Grafana відображає графіки параметрів з історією за добу/тиждень/місяць, дозволяє виявляти тренди (поступове зниження напруги, зростання споживання) та порівнювати з нормативами .

Telegram Bot відправляє push-сповіщення при критичних подіях: « Δ \square Провал напруги до 195 В о 14:23. Тривалість 8 сек. Перевірте підстанцію».

Тестування системи на об'єкті (приватний будинок з ФЕС 10 кВт) протягом місяця показало: виявлено 23 провали напруги тривалістю 0.5-15 сек (причина – комутації на підстанції 10/0.4 кВ), зареєстровано 5 перенапруг до 257 В при відключенні великих споживачів у селі, точність вимірювання напруги $\pm 1.2\%$ (порівняння з еталонним мультиметром Fluke 87V), точність вимірювання струму $\pm 2.5\%$, вартість системи: \$85 (Arduino Mega \$15, датчики \$30, ESP8266 \$5, SD-карта \$10, корпус та живлення \$25).

Висновок. Розроблена система моніторингу параметрів електромережі на основі Arduino Mega 2560 забезпечує вимірювання напруги, струму, частоти та коефіцієнта потужності з точністю 1-2.5%, виявлення аномалій та передачу даних у хмару для аналізу. Вартість системи (\$85) у 60-600 разів нижча за промислові SCADA-рішення при достатній функціональності для моніторингу локальних об'єктів з інтегрованими ВДЕ.

Список використаних джерел:

1. Pavlenko, V., Ponomarenko, I., Morhulets, O., Ponomarenko, D., Danylchenko, D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management. In: Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1480. Springer, Cham, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-95191-6_18
2. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The role of smart technologies in improving the reliability and efficiency of power grids // Електромеханічні та інформаційні системи: матеріали конф. КНУТД. 2024. Вип. 8. С. 91-92. URL: <http://ser.knutd.edu.ua/handle/123456789/29834>
3. Petrenko A., Kruhliak H., Lyktei V., Ivanchenko A. Електроенергетичні системи на основі відновлюваних джерел енергії, інтегровані в розподільні мережі. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2025. №6. С. 5-14. DOI: 10.31548/energiya676.2024.005
4. Kaplun V., Kruhliak H., Makarevych S., Kulibaba Y. Dynamic energy management system with real time component control to increase the efficiency of local polygeneration microgrid. Przegląd Elektrotechniczny. 2023. №9.
5. Pavlenko, V., Volianyk, O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources // Електромеханічні та інформаційні системи: матеріали конф. КНУТД. 2024. Вип. 8. С. 93-94. URL: <http://ser.knutd.edu.ua/handle/123456789/28968>