

*Є.Ю. ЗОРИН, О.О. ЧЕПЕЛЮК***УДОСКОНАЛЕНЕ ОДНОФАЗНЕ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ НАПРУГИ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ
З ПІДТРИМКОЮ IOT І BLUETOOTH LOW ENERGY**

У статті представлено комплексне апаратно-програмне рішення для реле контролю напруги побутових споживачів з можливістю інтеграції у середовище Інтернету речей (IoT). Розроблено схемотехнічну частину на базі мікроконтролера (МК) ESP32C3FH4 з використанням бістабільного електромагнітного реле та безтрансформаторного джерела живлення. Реалізовано мобільний застосунок для керування пристроєм, налаштування уставок, перегляду історії спрацювань та аналізу аварійних ситуацій. Розглянуто можливість підключення до хмарних сервісів та візуалізації змін електричних параметрів у режимі реального часу. Надано структурну та принципову електричну схеми пристрою, описано алгоритми роботи та особливості реалізації протоколу обміну даними через інтерфейс Bluetooth Low Energy (BLE). Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого рішення для захисту побутових електроспоживачів.

Ключові слова: реле контролю напруги, ESP32-C3FH4, Bluetooth Low Energy, Android-застосунок, схемотехніка, захист побутової електромережі, Інтернет речей, IoT.

*Y.Y. ZORIN, O.O. CHEPELIUK***ENHANCED SINGLE-PHASE VOLTAGE CONTROL RELAY FOR HOUSEHOLD CONSUMERS WITH
IOT AND BLUETOOTH LOW ENERGY SUPPORT**

This paper presents a comprehensive hardware and software solution for a household voltage control relay with integration into the Internet of Things (IoT) environment. The circuit design is based on the ESP32-C3FH4 microcontroller, using a bistable electromagnetic relay and a transformerless power supply. A mobile application has been developed to provide real-time monitoring, user-configurable thresholds, event logging, and fault diagnostics. The system supports data transmission via Bluetooth Low Energy (BLE) and offers potential for cloud integration with real-time visualization and trend analysis of electrical parameters. The article includes a structural diagram and an electrical schematic of the device, with detailed descriptions of the operating algorithms and BLE communication protocol. The proposed solution demonstrates high reliability and energy efficiency for protecting household electrical appliances from voltage deviations.

Keywords: voltage control relay, ESP32-C3, Bluetooth Low Energy, Android application, circuit design, household power network protection, Internet of Things, IoT.

Вступ. Сучасний стан електромереж житлового сектору України характеризується високим рівнем зношеності, недостатньою надійністю та невідповідністю поточним енергоспоживачам. Багато мереж, зокрема внутрішньобудинкові лінії та захисна апаратура, були спроектовані для умов, які істотно відрізняються від реалій сьогодення. Це призводить до частих аварійних ситуацій, пов'язаних із перенапругами і недостатніми напругами, короткими замиканнями, обривом PEN-проводника, що призводить до виходу з ладу побутової техніки.

Одним з ефективних технічних рішень для захисту однофазної електропобутової техніки є використання реле контролю напруги (РКН), інтегрованих у середовище Інтернету речей (IoT-РКН). Завдяки можливості безперервного дистанційного контролю напруги та зворотного зв'язку, такі пристрої підвищують надійність електропостачання, керованість параметрами та загальну енергоефективність систем.

Мета роботи – дослідити та розробити схемотехнічне рішення IoT-РКН, створити мобільний застосунок для моніторингу та керування пристроєм, а також забезпечити підтримку хмарних функцій для зберігання та аналітики даних. Особливу увагу приділено елементній базі, алгоритмам спрацювання реле та протоколам передачі даних через BLE.

Аналіз схемотехнічних рішень та програмного забезпечення цифрових РКН представлений у [1]. Аналізуючи практичні приклади реалізації бездротових сенсорних систем у суміжних галузях, зокрема в автономних пристроях медичного [2] та технічного [4] призначення, можна виокремити ключові компоненти, що доцільно інтегрувати у сучасну схемотехніку IoT-

РКН. Передусім ідеться про використання МК з вбудованими інтерфейсами Wi-Fi або Bluetooth, таких як ESP32 або ESP8266. Вони дозволяють забезпечити стійкий зв'язок із хмарними сервісами або локальними мобільними клієнтами, не потребуючи додаткових шлюзів. Водночас можливе використання GSM-модулів (наприклад, SIM800L[5]), що забезпечує альтернативний канал зв'язку для критичних ситуацій, пов'язаних із втратою підключення до Інтернету [6].

Схемотехнічна частина таких реле базується на комбінації чутливого вузла з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та силового комутаційного елементу. У якості останнього доцільно використовувати бістабільне електромагнітне реле або твердотільне реле [1], яке забезпечує довготривалу роботу без значного тепловиділення. Аналогова частина включає подільники напруги, захисні обмежувальні кола та фільтри, які передають сигнали на вбудований АЦП МК для подальшої обробки.

Впровадження клієнтської частини системи на мобільній платформі в архітектуру IoT-РКН сприяє розширенню його функціональних можливостей шляхом реалізації візуалізації актуальних значень напруги, фіксації подій, динамічного налаштування параметрів у режимі реального часу, а також надсилання сповіщень користувачеві у разі виявлення аварійних ситуацій. Завдяки мобільному інтерфейсу забезпечується інтуїтивно зрозумілий доступ до керування пристроєм навіть для осіб без спеціальної технічної підготовки.

Застосування хмарних технологій для збереження даних створює передумови для реалізації ретроспективного аналізу, побудови аналітичних графіків, виявлення нестабільності у мережевих параметрах та

© Є.Ю. Зорін, О.О. Чепелюк, 2025

формування прогнозних моделей (наприклад, налаштування порогових значень спрацювання IoT-РКН) для запобігання хибним спрацюванням.

Розробка IoT-РКН потребує комплексного підходу до схемотехнічного проектування.

Схемотехніка запропонованого IoT-РКН. У запропонованій структурній схемі (рис. 1) використано МК ESP32-C3FH4 [7], який виконує функцію центрального керувального елемента системи. МК містить 32-бітне ядро архітектури RISC-V із тактовою частотою 160 МГц, яке забезпечує обробку даних, реалізацію логіки керування, а також підтримку периферійних інтерфейсів. Об'єм оперативної пам'яті становить 400 кБ, а флеш-пам'яті – 4 МБ, що є достатнім для реалізації алгоритмів цифрової обробки аналогового сигналу, з урахуванням гістерезису, часових затримок та характеристик спрацювання (залежної та незалежної [8]).

До складу периферії МК входять інтерфейси UART, SPI, I2C, а також багатофункціональні GPIO-виводи, що дозволяє легко інтегрувати пристрій з індикаторами, кнопками керування, силовими ключами та іншими модулями системи.

Живлення системи реалізовано на основі діодного моста D1–D4, який здійснює повноперіодне випрямлення змінної напруги. Далі напруга стабілізується імпульсним стабілізатором LM2596S-5 (U2), який забезпечує 12 В для живлення релейної частини, та лінійним стабілізатором AMS1117-3.3 (U1), який формує 3.3 В для живлення логіки мікроконтролера й індикації.

Фільтрація напруги здійснюється за допомогою ємнісних компонентів C3, C9, C10, C15, C16 та дроселя L1. Для захисту від перенапруг використано варистор Z1 і запобіжник FU1. IoT-РКН здатне працювати в умовах значних відхилень напруги - від 150 до 440 В, відповідно до нормативів ГОСТ 13109-97 [9] та ДСТУ EN 50160:2014 [10].

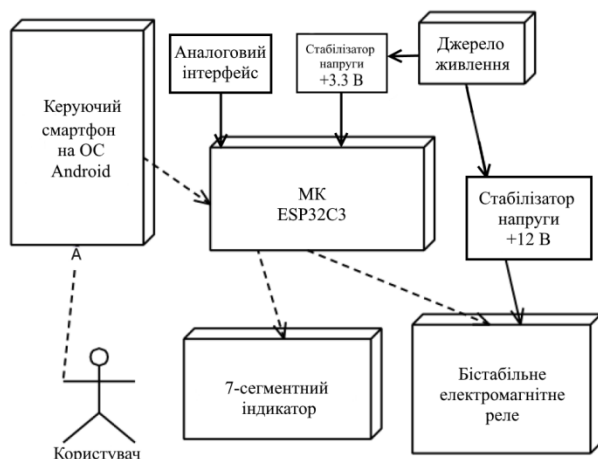


Рис. 1. Структурна схема запропонованого IoT-РКН на основі ESP32C3FH4

На апаратному рівні для реалізації системи розроблено електричну принципову схему (рис. 2), що слугує основою для функціонування пристрою. Стабільність генерації тактового сигналу для роботи МК забезпечується кварцевим резонатором X1 у поєднанні з

шунтувальними конденсаторами C11 та C12, що гарантує постійне значення тактової частоти, що не залежить від температури.

Для організації бездротової передачі даних використано вбудований інтерфейс BLE 5.0 [11] з інтегрованою антеною (частота 2.4 ГГц). Узгодження імпедансів у височастотному тракті забезпечено відповідними пасивними – індуктивністю L2 та ємностями C13 та C14.

Силова частина побудована на основі електромагнітного бістабільного реле K1 з двома незалежними обмотками. Керування реле здійснюється транзисторними ключами Q1, Q2. Для гальванічної розв'язки між силовою і логічною частинами застосовано оптрон PC827 (OPT1). Захист від перенапруг, які виникають при комутації кола індуктивного навантаження, реалізовано за допомогою діодів D7 та D8.

Для локального налаштування пристрою передбачено три кнопки та семисегментний індикатор (U5), що відображає основні режими роботи та поточне значення напруги. Відмова від застосування кольорового дисплея типу IPS пояснюється доцільністю використання мобільного застосунку як основного інтерфейсу користувача.

Контроль напруги здійснюється з урахуванням встановлених порогових значень. У разі виходу за межі допустимого діапазону відбувається автоматичне відключення навантаження відповідно до заданої характеристики спрацювання. Повторне ввімкнення відбувається після стабілізації параметрів.

Усі розрахунки елементної бази виконано з урахуванням критичних режимів роботи. Наприклад, при перемиканні електромагнітного реле можливі імпульсні струми до 250 мА. Для запобігання зниженню напруги на виході у таких умовах передбачено накопичувальний конденсатор ємністю 470 мкФ [8], що розраховано за класичною формулою RC-кола, із врахуванням часу комутації реле (50 мс).

Для вимірювання мережевої напруги використовується зовнішній аналоговий інтерфейс, який складається з елементів R6, R7, R21, R22 та C17, що забезпечує безпечне подання сигналу на АЦП МК. Це дозволяє фільтрувати постійну складову та відцифровувати аналоговий сигнал.

Загалом апаратна частина IoT-РКН відзначається доступністю компонентів та адаптивністю до розширення. Обрана елементна база дозволяє без додаткових змін масштабувати систему, доповнювати її новими сенсорами або підсистемами захисту, а також модернізувати пристрій у майбутньому для роботи з однофазною або навіть трифазною мережею. Високий ступінь інтеграції та модульності відкриває можливість реалізації пристрою у складі ширших систем домашньої або промислової автоматизації. Застосування перевірених стандартів керування та живлення спрощує технічне обслуговування та забезпечує сумісність із типовими інженерними рішеннями у сфері енергозабезпечення.

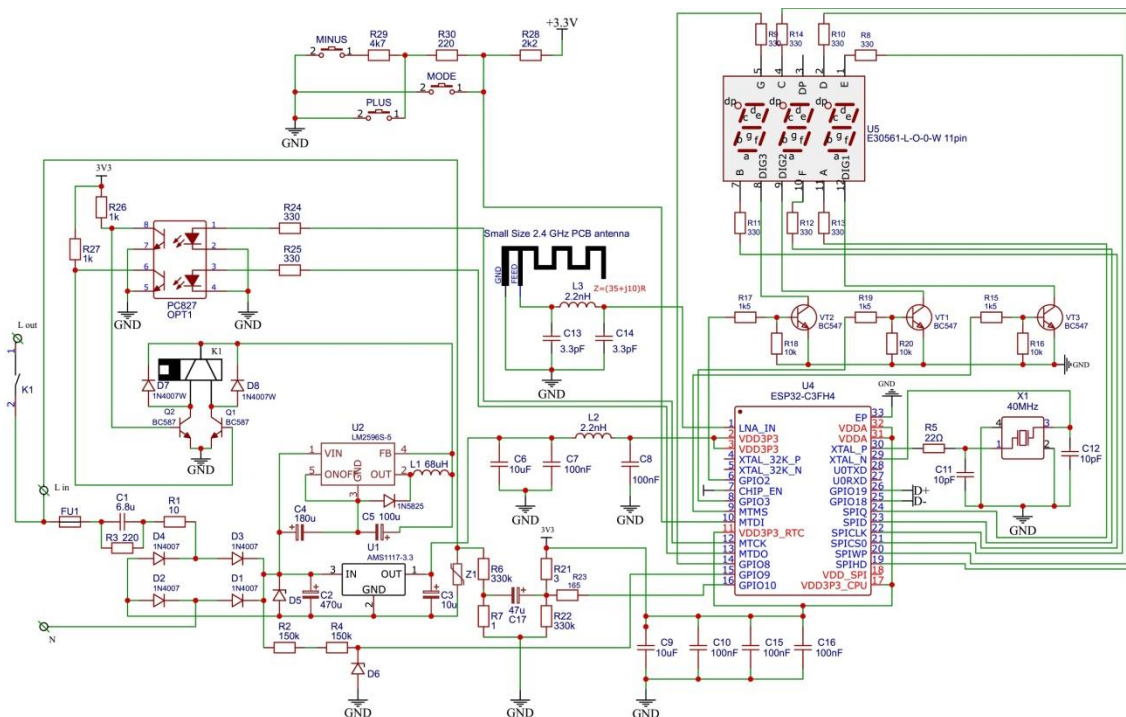


Рис. 2. Електрична принципова схема IoT-PKH

Крім того, передбачена можливість адаптації пристрою до специфічних умов експлуатації шляхом зміни уставок, конфігураційного програмного забезпечення та вибору варіантів монтажу. Такий підхід забезпечує гнучкість інсталяції в реальних об'єктах, включаючи квартири, приватні будинки, офіси та невеликі виробничі приміщення.

Макет IoT-PKH представлено на рис. 3. Він відображає прототипну реалізацію апаратної частини системи на макетній платі із застосуванням налагоджувальної плати з МК, бістабільного електромагнітного реле NRL08B-12D [12] зі струмом головних контактів 80 А, індикаторного вузла. Такий макет дозволяє провести експериментальну перевірку алгоритмів, протестувати взаємодію компонентів і забезпечити первинну валідацію функціональних можливостей пристрою до створення друкованої плати.

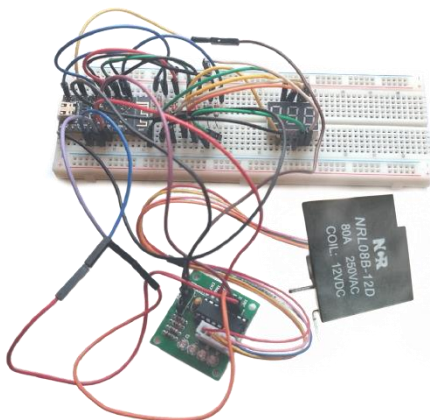


Рис. 3. Макет IoT-PKH

Вбудоване програмне забезпечення МК реалізовано з використанням фреймворку ESP-IDF [13]. У

порівнянні з існуючими рішеннями, що здебільшого реалізовані на простих МК без операційної системи (ОС) або в Arduino-середовищі, ESP-IDF дозволяє створювати багатозадачні системи з обробкою подій у режимі реального часу з урахуванням допустимих відхилень напруги, що регламентуються стандартами: ГОСТ 13109-97 [9], ДСТУ EN 50160:2014 [10], рекомендаціями ІТІС (СВЕСМА) [14], а також характеристик спрацювання відповідно до міжнародного стандарту IEC 60255-127:2010 [15] та керування вихідним бістабільним електромагнітним реле із двома обмотками та здійснення зв'язку по BLE. Цей стек реалізує протоколи доступу до середовища, передачі та обробки даних, зв'язку та передачі даних, та можливість формування GATT-профілів (Generic Attribute Profile - профілі загальних атрибутів, що визначають структуру і спосіб бездротового обміну даними між пристроями) значно спрощують реалізацію протоколу взаємодії з Android-застосунком.

Архітектура програмного забезпечення мобільного застосунку реалізує підтримку асинхронної передачі даних між смартфоном та IoT-PKH, забезпечує автоматичне перепідключення при втраті з'єднання, а також містить програмні засоби для організації візуального інтерфейсу користувача.

Для розширення функціональних можливостей запропоновано інтеграцію мобільного застосунку з хмарними платформами, зокрема Firebase Realtime Database [16], що відкриває можливості для віддаленого моніторингу, зберігання історії спрацювань IoT-PKH та їх аналізу.

Одним із перспективних напрямів розвитку є впровадження інструментів графічної візуалізації трендів зміни напруги та кількості спрацювань захисту, що дозволяє підвищити інформативність інтерфейсу та ефективність діагностики.

У межах цієї роботи мобільний застосунок розроблено для ОС Android [17]. Передбачається подальша адаптація і для iOS. Основне функціональне призначення застосунку полягає не лише в налаштуванні порогових значень напруги, а й у забезпеченні дистанційного моніторингу стану IoT-РКН, перегляду журналу спрацювань та отриманні повідомлень про аварійні події.

Інтерфейс мобільного застосунку представлено на рис. 4.



Рис. 4. Інтерфейс Android-застосунку для керування IoT-РКН

Архітектура застосунку побудована відповідно до моделі MVVM із використанням Jetpack Compose [18], що забезпечує адаптивність інтерфейсу, чітке розділення логіки та оновлення інтерфейсу користувача в реальному часі.

Логіка керування BLE-з'єднанням інкапсульована в класах BluetoothConnectionManager і DeviceScanner, які забезпечують пошук пристроїв, встановлення з'єднання, контроль стабільності каналу зв'язку та обробку розривів з'єднання.

Для взаємодії з IoT-РКН використовується GATT-профіль [19]. Надсилання команд здійснюється у вигляді коротких пакетів, що містять дані про уставки (наприклад, максимальний і мінімальний поріг спрацювання по напрузі, часові затримки), а також керуючі сигнали – наприклад, примусове вимкнення реле. У зворотному напрямку користувач отримує актуальну інформацію про вхідну напругу, стан головних контактів, лог помилок і хронологію спрацювань. Обмін даними організовано через UUID-ідентифіковані характеристики, відповідальні за окремі параметри пристрою [20].

У подальшому передбачається розширення функціоналу застосунку за рахунок підтримки Wi-Fi-зв'язку, надсилання push-сповіщень та підтримки популярних систем розумного дому, зокрема Home Assistant, MQTT-брокерів тощо.

Висновки:

1) У ході дослідження було створено функціональний макет інтелектуального реле контролю напруги з інтеграцією у середовище Інтернету речей. Робота охоплювала всі етапи – від аналізу технічних вимог до апаратної реалізації та програмного забезпечення. Основу апаратної частини склали МК ESP32-C3FH4 та силове електромагнітне бістабільне реле, схемотехнічно реалізоване з урахуванням енергетичної ефективності та

підвищеної термостійкості.

2) Розроблено Android-застосунок, який забезпечує користувачеві повноцінний доступ до налаштувань реле, зчитування напруги в режимі реального часу, перегляд журналів подій та керування через інтерфейс BLE. Архітектура програмного забезпечення була побудована на базі фреймворку ESP-IDF (для МК) та Jetpack Compose з MVVM (для мобільного додатку).

3) У результаті виконаної роботи досягнуто основної мети – створення працездатного прототипу системи моніторингу та захисту побутової електромережі від недопустимих відхилень напруги, що відповідає вимогам до керованості та масштабованості. Перспективи подальшого розвитку полягають у додаванні Wi-Fi-модуля, інтеграції з хмарними платформами та розширенні інструментів візуалізації статистики тощо.

Список літератури

- Є.Ю. Зорін, "Аналіз схемотехнічних рішень однофазних реле контролю напруги побутових споживачів", Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, № 1, с. 13–20, 2022.
- Guerrero F.N., Spinelli E.M., Haberman M.A. *Analysis and Simple Circuit Design of Double Differential EMG Active Electrode*. IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., 2016, vol. 10, pp. 787–795.
- Ковтун Г.А., Колісник К.В. *Удосконалення діагностичного приладу «Автономна бездротова система ЕМГ»*. Наукові тези студентської конференції НТУ «ХПІ». Харків, 2024. С. 72–74.
- Смолін Ю.О. *Системи контролю параметрів газотранспортної мережі з використанням бездротових технологій*. Тези НТУ «ХПІ». Харків, 2024. С. 109–110.
- SIMCom Wireless Solutions. *SIM800 Series AT Command Manual*. Shanghai: SIMCom, 2020. 364 p.
- Балев В.М., Буренкова А.М. *Розробка системи сповіщення щодо наявності електрики в житловому приміщенні*. Тези НТУ «ХПІ». Харків, 2024. С. 118–119.
- ESP32-C3 Series [Електронний ресурс] // Espressif Systems. – Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf.
- Zorin Y., Chepeliuk O. *The Improved Voltage Control Relay for the Single-phase Household Consumers Protection*. IEEE 4rd KhPI Week on Advanced Technology, 2023.
- ГОСТ 13109-97. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*. 2000.
- ДСТУ EN 50160:2014. *Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності*.
- Bluetooth Special Interest Group. *Bluetooth Core Specification v5.0*. [Online]. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>
- NCR industrial. *Latching Relay – NRL08B-12D*. [Online]. <https://www.nicerelay.com/products/electrical-kwh-meter-components/latching-relays-electrical-kwh-meter-components>
- Espressif Systems. *ESP-IDF Programming Guide*. [Електронний ресурс]. – <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/>
- Information Technology Industry Council. *ITI (CBEMA) Curve Application Note*. [Online]. Available: <http://www.itic.org/resources/Oct2000Curve-UPDATED.doc>
- IEC 60255-127:2010. *Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/under voltage protection*.
- Firebase Documentation. *Firebase Realtime Database*. <https://firebase.google.com/docs/database>
- Android Open Source Project. *Bluetooth Low Energy (BLE) Guide*.
- Android Developers. *Jetpack Compose Overview*. <https://developer.android.com/jetpack/compose>
- BluetoothGATT [Електронний ресурс] // Android Developers. – Режим доступу: <https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/BluetoothGatt>.
- Google Developer Docs. *Guide to app architecture*.

- <https://developer.android.com/topic/architecture>
- 21 JetBrains. *Kotlin Coroutines Documentation*. <https://kotlin-lang.org/docs/coroutines-overview.html>.

References (transliterated):

- 1 Ye. Yu. Zorin, "Analiz skhemotehnikhnykh rishen' odnofaznykh reley kontrolyu napruhy pobutovykh spozhyvachiv", *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka*, № 1, Pp. 13–20, 2022.
- 2 Guerrero F.N., Spinelli E.M., Haberman M.A. Analysis and Simple Circuit Design of Double Differential EMG Active Electrode. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, 2016, vol. 10, Pp. 787–795.
- 3 Kovtun H.A., Kolisnyk K.V. Udskonalennya diahnostychnoho pryladu "Avtonomna bezdrotova systema EMH". *Naukovi tezys studentskoyi konferentsiyi NTU "KhPI"*. Kharkiv, 2024. Pp. 72–74.
- 4 Smolin Yu.O. Systemy kontrolyu parametru hazotransportnoyi me-rezhi z vykorystannyam bezdrotovykh tekhnolohiy. *Tezy NTU "KhPI"*. Kharkiv, 2024. Pp. 109–110.
- 5 SIMCom Wireless Solutions. SIM800 Series AT Command Manual. Shanghai: SIMCom, 2020. 364 p.
- 6 Balyev V.M., Burenkova A.M. Rozrobka systemy spovishchennya shchodo nayavnosti elektryky v zytlovomu prymishchenni. *Tezy NTU "KhPI"*. Kharkiv, 2024. Pp. 118–119.
- 7 ESP32-C3 Series [Elektronnyy resurs]. Espressif Systems. – Rezhym dostupy: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf] (https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf).
- 8 Zorin Y., Chepeliuk O. The Improved Voltage Control Relay for the Single-phase Household Consumers Protection. *IEEE 4rd KhPI Week on Advanced Technology*, 2023.
- 9 HOST 13109-97. Normy yakosti elektrychnoyi enerhiyi v systemakh elektrosnabzheniya zahal'nogo pryznachennya. 2000.
- 10 DSTU EN 50160:2014. Kharakterystyky napruhy elekproposta-channya v elektrychnykh merezhakh zahal'nogo pryznachennya.
- 11 Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Core Specification v5.0. [Online]. [<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>] (<https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>)
- 12 NCR industrial. Latching Relay – NRL08B-12D. [Online]. [<https://www.nicerelay.com/products/electrical-kwh-meter-components/latching-relays-electrical-kwh-meter-components>] (<https://www.nicerelay.com/products/electrical-kwh-meter-components/latching-relays-electrical-kwh-meter-components>)
- 13 Espressif Systems. ESP-IDF Programming Guide. [Elektronnyy resurs]. – [<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/>] (<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/>)
- 14 Information Technology Industry Council. ITI (CBEMA) Curve Application Note. [Online]. Available: [<http://www.itic.org/resources/Oct2000Curve-UPDATED.doc>] (<http://www.itic.org/resources/Oct2000Curve-UPDATED.doc>)
- 15 IEC 60255-127:2010. Measuring relays and protection equipment – Part 127: Functional requirements for over/under voltage protection.
- 16 Firebase Documentation. Firebase Realtime Database. [<https://firebase.google.com/docs/database>] (<https://firebase.google.com/docs/database>)
- 17 Android Open Source Project. Bluetooth Low Energy (BLE) Guide.
- 18 Android Developers. Jetpack Compose Overview. [<https://developer.android.com/jetpack/compose>] (<https://developer.android.com/jetpack/compose>)
- 19 BluetoothGatt [Elektronnyy resurs] // Android Developers. – Rezhym dostupy: [<https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/BluetoothGatt>] (<https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/BluetoothGatt>)
- 20 Google Developer Docs. Guide to app architecture. [<https://developer.android.com/topic/architecture>] (<https://developer.android.com/topic/architecture>)
- 21 JetBrains. *Kotlin Coroutines Documentation*. <https://kotlin-lang.org/docs/coroutines-overview.html>

Надійшла (received) 07.05.2025

Відомості про авторів / About the authors

Зорін Євгеній Юрійович (Zorin Yevhenii Yuriiovych) – доктор філософії (Ph.D.), викладач вищої категорії, Відокремлений структурний підрозділ «Харківський комп'ютерно-технологічний коледж Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», голова циклової комісії прикладної механіки та природничо-математичних дисциплін, м. Харків, Україна; e-mail: yevgeny.zorin@gmail.com.

Чепелюк Олександр Олександрович (Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: chep1@i.ua.