

УДК 004.312.46

Сгадов С. О.¹

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ
НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ STM32 У МЕРЕЖАХ МОНІТОРИНГУ
ДОВКІЛЛЯ**

Розвиток сучасних систем комп'ютерної інженерії в напрямку «Інтернету речей» (IoT) потребує створення автономних пристроїв, здатних

функціонувати роками без заміни джерел живлення. У мережах екологічного моніторингу вузли часто розташовані у важкодоступних місцях, що робить енергоефективність головним критерієм якості проектованої системи. Мікроконтролери сімейства STM32L4 пропонують потужний апаратний інструментарій для енергозбереження, проте досягнення граничних показників вимагає глибокої інтеграції програмних алгоритмів із архітектурними особливостями кристала. Метою дослідження є обґрунтування методики зниження енерговитрат вбудованого вузла моніторингу за рахунок комбінованого використання низькоспоживаючих режимів, прямого доступу до пам'яті (DMA) та механізму Tickless Idle у FreeRTOS, а також розробка моделі оцінки автономності пристрою. Першочерговим завданням при розробці вузла моніторингу є конфігурація системи тактування (Clock Tree), оскільки динамічні втрати потужності в цифрових ланцюгах прямо пропорційні частоті роботи ядра. Використання мультитриггера внутрішнього осцилятора (MSI) дозволяє системі гнучко адаптуватися до поточних обчислювальних потреб, знижуючи частоту до мінімально необхідних значень у моменти простоя. Додатковим інструментом оптимізації виступає механізм Voltage Scaling, який у режимі Range 2 дозволяє суттєво обмежити споживання енергії за рахунок зниження напруги живлення внутрішньої логіки при роботі на частотах до 26 МГц. При цьому критично важливим є повне вимкнення тактування невикористовуваної периферії через регістри контролера RCC, що мінімізує статичні витоки струму. Вибір оптимального режиму низького енергоспоживання (Low-power mode) визначається специфікою мереж моніторингу, де пристрій більшу частину часу перебуває у стані очікування. Найбільш раціональним для таких задач є режим Stop 2, у якому ядро Cortex-M4 зупиняється, але зберігається повний вміст пам'яті SRAM та стан регістрів. Це забезпечує швидке відновлення працездатності (декілька мікросекунд) після надходження сигналу від таймера або зовнішнього переривання. На відміну від режиму Standby, Stop 2 дозволяє уникнути тривалої та енергоємної процедури повної ініціалізації системи після кожного пробудження, зберігаючи споживання на рівні 1.1–1.6 мкА. Для подальшого підвищення автономності необхідно використовувати інтелектуальні можливості периферії, що здатна функціонувати незалежно від центрального процесора. Впровадження методу Batch Acquisition на основі контролера прямого доступу до пам'яті (DMA) дозволяє реалізувати збір даних з цифрових сенсорів по інтерфейсах I2C або SPI в повністю апаратному режимі. Поки ядро мікроконтролера перебуває в енергозберігаючому стані, DMA накопичує результати вимірювань у внутрішньому буфері. Процесор активується лише після завершення формування повного масиву даних для виконання складних обчислень або

передачі пакета через радіомодуль. Такий підхід радикально скорочує час перебування системи в активному режимі (Run mode), що є ключовим фактором збереження заряду батареї.

Програмна складова системи має бути побудована на базі операційної системи реального часу FreeRTOS, також потребує специфічних налаштувань. Традиційна робота планувальника завдань передбачає генерацію системних переривань кожну мілісекунду, що перешкоджає глибокому засинанню мікроконтролера. Застосування механізму Tickless Idle трансформує логіку роботи ядра: під час відсутності активних завдань системний таймер зупиняється, а пробудження планується за допомогою низькоспоживаючого таймера (LPTIM). Це дозволяє забезпечити детермінованість виконання завдань пристрою при збереженні наднизького рівня споживання енергії. Таким чином, синергія апаратних можливостей архітектури STM32 та програмних методів оптимізації дозволяє створити високонадійну комп'ютерну систему, здатну до тривалої автономної роботи в екстремальних умовах експлуатації. Аналіз даних підтверджує, що режим Stop 2 є оптимальним для систем моніторингу довкілля. Хоча режим Standby забезпечує мінімальний струм, час пробудження з нього ($t_{wake} \approx 14 \text{ мкс}$) супроводжується повною перезагрузкою контексту процесора, що призводить до значних сплесків споживання на етапі старту. Режим Stop 2 дозволяє системі миттєво повертатися до виконання коду з точки зупинки, що енергетично вигідніше при періодичній активності. Застосування комплексної оптимізації дозволило знизити середній струм споживання вузла з 15 мА до 55 мкА. При використанні батареї ємністю 220 мАг це забезпечує теоретичний термін експлуатації понад 5 місяців при періодичності опитування датчиків раз на 10 хвилин.

Оптимізація енергоспоживання у вбудованих системах на базі STM32 вимагає інтегрованого підходу, що поєднує низькорівневе налаштування регістрів живлення та використання можливостей ОС реального часу. Найбільш ефективним методом є поєднання режиму Stop 2 із перенесенням рутинних операцій вводу-виводу на контролер DMA. Запропоновані рішення є універсальними та можуть бути адаптовані для будь-яких систем автономного моніторингу в рамках комп'ютерної інженерії.