

# Особливості мікроконтролерів Renesas RA2 з низьким споживанням енергії

Олександр Русу

**Обов'язкова умова успіху будь-якого проєкту — його реалізація на платформі, що максимально підходить для конкретного технічного завдання. Попри те, що багато пристроїв, на перший погляд, здаються типовими й можуть бути створені на елементній базі багатьох виробників, використання специфічних особливостей обраної апаратної основи іноді дає змогу виконати деякі вузли більш ефективно, ніж за допомогою неспеціалізованих рішень. А це зрештою може виявитися ключовою конкурентною перевагою, що визначає успіх усього проєкту.**

Не стали винятком і пристрої, призначені для застосування в сучасних інтелектуальних автоматизованих системах, зокрема і в рішеннях, що належать до категорії «Інтернету речей». Ультранизьке енергоспоживання належить до числа основних вимог, що висуваються до подібної техніки, оскільки вона нерідко працює від батарей, а надто часта їхня заміна тягне за собою додаткові експлуатаційні витрати.

У статті розглянуто особливості мікроконтролерів з низьким споживанням енергії лінійки RA2, розробленої одним із провідних виробників електронних компонентів — японською компанією Renesas. Використання цього семейства дає змогу не тільки знизити енергоспоживання типових пристроїв «Інтернету речей», а й завдяки деяким унікальним технологіям довести його до рекордно низького рівня, недосяжного із застосуванням мікросхем інших виробників.

## СКЛАД ЛІНІЙКИ RA2

Лінійка RA2 спеціально створювалася для пристроїв з автономним живленням, тому її ключовою особливістю є наднизьке енергоспоживання, що дозволяє раціонально витратити заряд батареї. Мікросхеми RA2 побудовані на основі 32-розрядного ядра Cortex-M23 і можуть працювати з тактовою частотою до 48 МГц, що цілком достатньо для забезпечення необхідної продуктивності в активних режимах. Лінійка RA2 складається з чотирьох груп мікроконтролерів, що відрізняються кількістю виводів, обсягом пам'яті та функціональністю (рис. 1). Характеристики мікросхем RA2L1, RA2E1 і RA2E2 близькі до характеристик мікроконтролерів загального призначення, тому їх найкраще використовувати в системах керування різними пристроями. А ось представники групи RA2A1, завдяки наявності більшої

кількості аналогових периферійних модулів і підтримці безлічі комунікаційних інтерфейсів, оптимальні для пристроїв, критичних до величини габаритних розмірів приладу, наприклад для «розумних» вимірювальних датчиків.

Група RA2E1 є базовою. У її складі представлена найбільша кількість мікроконтролерів, з різними обсягами пам'яті та різною кількістю виводів (рис. 2). Набір периферійних пристроїв мікроконтролерів RA2E1 невеликий, що позитивно позначається на ціні цих мікросхем, проте його цілком достатньо для реалізації безлічі типових застосунків, серед яких пристрої керування промисловими та побутовими електроприладами, засоби домашньої та промислової автоматизації, автоматизовані інтелектуальні пристрої тощо.

Лінійка RA2E2, розроблена однією з найостанніших, призначена для малогабаритних приладів, які не потребують складних алгоритмів керування або обробки сигналів. Крім наднизького енергоспоживання — основної відмінності всієї лінійки RA2 — ключовою особливістю мікроконтролерів RA2E2 є використання більш компактних корпусів із меншим числом виводів і меншою кількістю всіх видів пам'яті (рис. 2). Це дає змогу зменшити розміри друкованої плати та вартість пристрою завдяки застосуванню більш оптимальної моделі мікроконтролера. Основне застосування мікроконтролерів RA2E2 —

Категорія	Модель	Характеристики
Промислові датчики	RA2A1	48 МГц, Cortex-M23, 256 кбайт Flash-пам'яті, 32 кбайт ОЗП, 32-...64-вивідний корпус, USB, CAN, 24-розрядний ΣΔ-АЦП, 16-розрядний АЦП, модулі захисту
	RA2L1	48 МГц, Cortex-M23, 128/256 кбайт Flash-пам'яті, 32 кбайт ОЗП, 48-...100-вивідний корпус, CAN, 32-каналний контролер сенсорної клавіатури, модулі захисту
Загального призначення	RA2E1	48 МГц, Cortex-M23, до 128 кбайт Flash-пам'яті, 16 кбайт ОЗП, 25-...64-вивідний корпус, 30-каналний контролер сенсорної клавіатури, модулі захисту
	RA2E2	48 МГц, Cortex-M23, до 64 кбайт Flash-пам'яті, 8 кбайт ОЗП, 16-...24-вивідний корпус, інтерфейс I <sup>2</sup> C, малогабаритний корпус, модулі захисту, робоча температура до +125 °C

Рис. 1. Ключові особливості груп лінійки RA2

		RA2L1																	
Flash-пам'ять/ОЗП	256 кбайт/ 32 кбайт									RA2L1	RA2L1			RA2L1			RA2L1	RA2L1	
	128 кбайт/ 32 кбайт									RA2L1	RA2L1			RA2L1			RA2L1	RA2L1	
	128 кбайт/ 16 кбайт																		
	64 кбайт/ 16 кбайт	RA2E2																	
	64 кбайт/ 8 кбайт	RA2E2	RA2E2	RA2E2															
	32 кбайт/ 16 кбайт				RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1				
	32 кбайт/ 8 кбайт				RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1				
	16 кбайт/ 8 кбайт				RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1	RA2E1				
Кількість виводів Корпусу	16 WLCSP	20 QFN	24 QFN	25 WLCSP	32 QFN	32 LQFP	36 LGA	48 QFN	48 LQFP	64 BGA	64 LQFP	64 LQFP	80 LQFP	100 LQFP					
Розмір корпусу	1.87×1.84 мм	4×4 мм	4×4 мм	2.17×2.3 мм	5×5 мм	7×7 мм	4×4 мм	7×7 мм	7×7 мм	4×4 мм	10×10 мм	14×14 мм	12×12 мм	14×14 мм					
Крок виводів	0.4 мм	0.5 мм	0.5 мм	0.4 мм	0.5 мм	0.5 мм	0.5 мм	0.5 мм	0.5 мм	0.4 мм	0.5 мм	0.8 мм	0.5 мм	0.5 мм					

Рис. 2. Основні характеристики мікроконтролерів RA2L1, RA2E1 і RA2E2

це пристрої з батарейним живленням, зокрема й носимі, однак це не стає перешкодою для використання представників цієї групи і в типовому обладнанні загального призначення.

Особливо слід відзначити підтримку мікроконтролерами RA2E2 інтерфейсу I<sup>3</sup>C — подальшого розвитку стандарту I<sup>2</sup>C. За своїми можливостями інтерфейс I<sup>3</sup>C посідає проміжне місце між низькошвидкісним I<sup>2</sup>C і високошвидкісним SPI, поєднуючи виняткову гнучкість I<sup>2</sup>C і високу швидкість обміну даними, характерну для SPI. Підтримка I<sup>3</sup>C дає змогу використовувати мікроконтролери RA2E2 з елементною базою нового покоління, зберігаючи водночас повну сумісність із мікросхемами, у яких для обміну даними передбачено традиційну версію цього інтерфейсу.

На відміну від мікроконтролерів RA2E2, час застосування скорочує кількість невикористовуваних апаратних ресурсів, мікроконтролери RA2L1, навіпаки, призначені для проектів, у яких можливостей мікросхем групи RA2E1 недостатньо для реалізації поставленого технічного завдання. Мікросхеми RA2L1 містять більшу кількість усіх видів пам'яті та випускаються в корпусах із більшою кількістю виводів (рис. 2). Набір периферійних пристроїв мікросхем RA2L1 багато в чому аналогічний до мікросхем RA2E1 (табл. 1), однак периферійні модулі мікроконтролерів RA2L1 звичайно мають більшу кількість каналів, а також RA2L1 оснащено вбудованим ЦАП 12 біт і модулем для обміну даними за інтерфейсом CAN.

Ключовою особливістю мікросхем RA2A1 є багатий набір периферійних модулів, призначених для роботи з аналоговими сигналами. Наприклад, до складу мікросхем цієї групи входить

Таблиця 1. Основні технічні характеристики мікроконтролерів RA2

Характеристики	RA2A1	RA2L1	RA2E1	RA2E2
Flash-пам'ять для зберігання програми, кбайт	256	256, 128	128, 64, 32	64, 32, 16
Flash-пам'ять для зберігання даних, кбайт	8	8	4	2
Оперативна пам'ять (SRAM), кбайт	32	32	16	8
Блок корекції помилок SRAM (ECC), кбайт	Є	Є	–	–
32-розрядний таймер із підтримкою ШИМ (GPT32)	1 канал	4 канали	1 канал	–
16-розрядний таймер із підтримкою ШИМ (GPT16)	6 каналів	6 каналів	6 каналів	6 каналів
Асинхронний малоспоживаючий таймер загального призначення (LP AGT)	–	16-розрядний, 2 канали	16-розрядний, 2 канали	32-розрядний, 2 канали
Асинхронний таймер загального призначення (AGT)	16-розрядний, 2 канали	–	–	–
Сторожовий таймер (WDT)	14-розрядний	14-розрядний	14-розрядний	14-розрядний
Годинник реального часу (RTC)	Є	Є	Є	–
Модуль SCI (інтерфейси UART, I2C, SPI)	5 каналів	5 каналів	4 канали	1 канал
Модуль SPI	2 канали	2 канали	1 канал	1 канал
Модуль I <sup>2</sup> C	2 канали	2 канали	1 канал	–
Модуль I <sup>3</sup> C з підтримкою I3C	–	–	–	1 канал
Модуль CAN	1 канал	1 канал	–	–
Модуль USB	1 канал	–	–	–
12-розрядний АЦП (ADC12)	–	до 19 каналів	до 13 каналів	до 8 каналів
16-розрядний АЦП (ADC16)	до 17 каналів	–	–	–
24-розрядний сигма-дельта АЦП (SDADC24)	до 10 каналів	–	–	–
Малоспоживаючий компаратор (ACMPLP)	2 канали	2 канали	2 канали	–
Високошвидкісний компаратор (ACMPHS)	1 канал	–	–	–
Датчик температури (TSN)	Є	Є	Є	Є
8-розрядний ЦАП (DAC8)	2 канали	–	–	–
12-розрядний ЦАП (DAC12)	1 канал	1 канал	–	–
Операційний підсилювач (OPAMP)	3 канали	–	–	–
Контролер сенсорної клавіатури (CTSUS)	26 каналів	32 канали	30 каналів	–
Криптографічний модуль (AES)	Є	Є	Є	Є
Апаратний генератор випадкових чисел (TRNG)	Є	Є	Є	Є
Кількість виводів корпусу	64, 48, 40, 36, 32	100, 80, 64, 48	64, 48, 36, 32, 25	24, 20, 16
Діапазон робочих температур, °C	–40...+85 –40...+105	–40...+85 –40...+105	–40...+85 –40...+105	–40...+85 –40...+105 –40...+125

високошвидкісний 24-розрядний сигма-дельта АЦП, а роздільна здатність стандартного АЦП послідовного наближення збільшена з 12 до 16 розрядів. Крім цього, мікроконтролери RA2A1 містять високошвидкісний компаратор, три

операційні підсилювачі, два цифро-аналогові перетворювачі з розрядністю 8 і 12 біт, а також підтримують більшу кількість комунікаційних інтерфейсів, зокрема повношвидкісний USB 2.0 і CAN. Таким чином, мікросхеми RA2A1 мо-

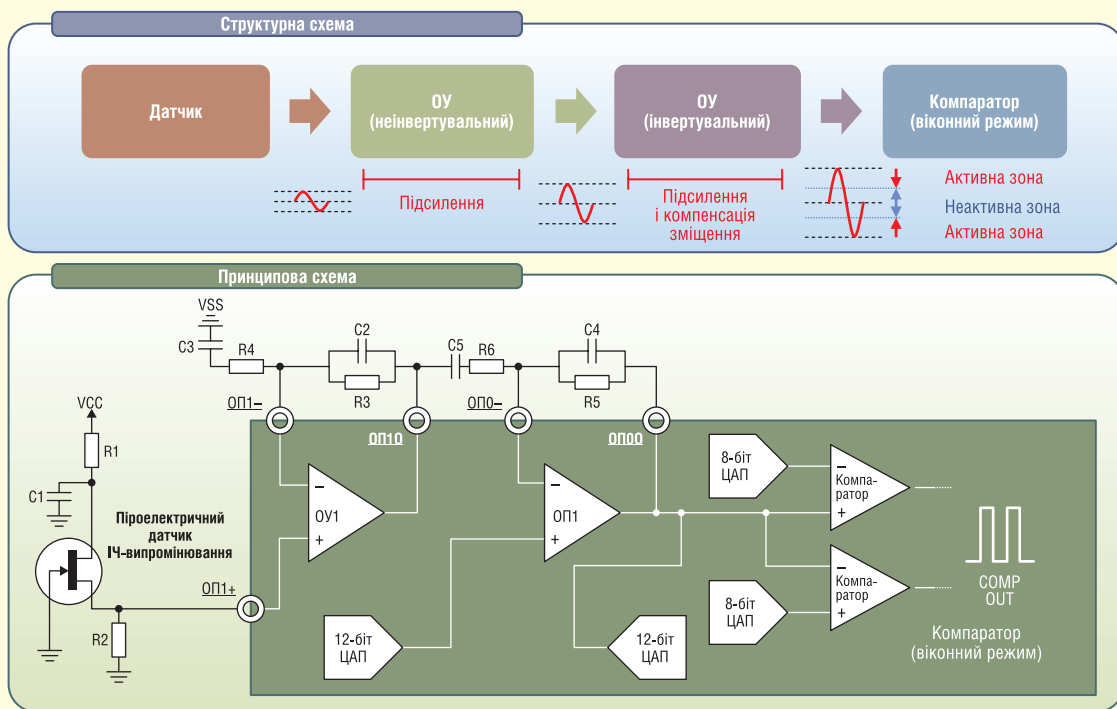


Рис. 3. Детектор інфрачервоного випромінювання на основі RA2A1

жуть стати прекрасною основою для застосування у сферах, які потребують високоточного оброблення аналогових сигналів, наприклад, медичній техніці, елементах промислових вимірювальних систем, системах моніторингу стану навколишнього середовища тощо (рис. 3).

Оскільки мікроконтролери RA2 позиціуються для пристроїв «Інтернету речей», склад їхніх периферійних модулів був би неповним без вузлів, що забезпечують захист інформації. У кожному мікроконтролері цієї лінійки присутній апаратний модуль шифрування AES, який у сукупності з апаратним генератором випадкових чисел TRNG може забезпечити швидке та надійне шифрування даних, які передаються відкритими каналами. Крім цього, у мікроконтролерах RA2 передбачено апаратний модуль для розрахунку контрольної суми CRC, що дає змогу скоротити витрати процесорного часу на реалізацію стандартних протоколів обміну внутрішніми інтерфейсами системи.

Слід зазначити, що захист і контроль даних забезпечується не тільки під час спілкування із зовнішніми пристроями. До складу мікроконтролерів RA2A1 і RA2L1 входить спеціалізований захищений блок оперативної пам'яті ECC (Error-Correcting Code Memory), здатний охопити до половини її секторів. При активізації цього механізму вміст оперативної пам'яті буде автоматично перевірятися на наявність помилок, що

виникають, наприклад, при експлуатації пристрою в складній електромагнітній обстановці або при роботі від нестабільного джерела живлення.

Для підтримки людино-машинних інтерфейсів мікроконтролери груп RA2A1, RA2L1 і RA2E1 мають спеціалізований контролер сенсорних кнопок CTSU, здатний контролювати до 32 емнісних клавiш. У мікроконтролерах RA2E2 цей модуль відсутній, оскільки передбачається, що вони будуть використовуватися у відносно простих пристроях, для керування якими достатньо кількох звичайних кнопок.

Діапазон робочих напруг мікросхем RA2 становить 1.6–5.5 В, що дає змогу жити від більшості найпоширеніших джерел енергії, зокрема й від літєвих батарейок. Мікросхеми RA2 випускаються в корпусах різних типів, здатних працювати в діапазоні температур довкілля –40...+85 °С або –40...+105 °С, а деякі моделі мікросхем RA2E2 можуть використовуватися і в жорсткіших умовах, коли температура довкілля сягає +125 °С.

### ЕНЕРГОЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ RA2

Наявність розвинутої та спеціалізованої периферії ще не зробила жоден мікроконтролер спеціально призначеним для використання в пристроях, кри-

тичних до рівня енергоспоживання. Розглянемо специфічні рішення, реалізовані в мікроконтролерах RA2, які дають змогу позиціувати їх як апаратну основу з низьким енергоспоживанням, зокрема і для пристроїв «Інтернету речей».

Енергоспоживання мікросхем, побудованих за КМОН-технологіями, залежить від трьох основних параметрів: напруги живлення, тактової частоти та розміру технологічного процесу. Роздільна здатність техпроцесу визначає фізичний розмір внутрішніх елементів і, відповідно, величину паразитних ємностей, на перезаряд яких, власне, і витрачається енергія джерела живлення. Що менший розмір техпроцесу, то менше енергоспоживання мікроконтролера в активному режимі за тієї самої тактової частоти й тієї самої робочої напруги. Однак від розміру техпроцесу залежить і інший, не менш важливий параметр енергоспоживання — струм витоку, зумовлений неідеальністю діелектричних матеріалів, які використовують під час виробництва мікросхем. І тут присутня зворотна залежність: що менший розмір техпроцесу, то більший струм витоку, який і вносить значну складову в струм споживання мікроконтролера в сплячому режимі (рис. 4).

Особливістю досить великої кількості пристроїв «Інтернету речей», що живляться від батарей, є те, що вони більшу частину часу перебувають у не-

активних режимах (сплячому режимі або режимі очікування). Таким чином, для випадків застосування з автономним живленням струм, що споживається мікроконтролером у сплячому режимі, має не менше значення, ніж струм, що споживається в активній фазі робочого циклу.

Розуміючи це, компанія Renesas виготовила мікроконтролери RA2A1 за техпроцесом із роздільною здатністю 130 нм, а RA2L1, RA2E1 і RA2E2 — 110 нм. Такий підхід дав змогу зменшити струм споживання в сплячих режимах зі збереженням його на доволі низькому рівні під час роботи в режимах, що вимагають високої продуктивності (табл. 2). Наприклад, струм споживання найекономніших мікроконтролерів групи RA2E2 у режимі очікування за вимкненого модуля RTC не перевищує 200 нА, тоді як в активному режимі його значення залишається на рівні, що приблизно дорівнює 81 мкА/МГц.

Енергоспоживання цифрових вузлів, виготовлених за КМОН-технологіями, пропорційне квадрату напруги живлення, тому зменшення цього параметра видається ефективним способом зниження величини струму, що споживається в активних режимах. Мікроконтролери RA2 мають розширений діапазон напруги живлення 1.6–5.5 В, що передбачає досить сильний розкид струму, що споживається, за однієї й тієї ж частоти. Однак на практиці цього не відбувається, оскільки всі внутрішні вузли мікросхем RA2 (зокрема й призначені для роботи з аналоговими сигналами), окрім портів вводу/виводу, які під'єднуються безпосередньо до зовнішнього джерела, можуть житися від вбудованого компенсацийного стабілізатора, що робить величину струму споживання мало залежною від напруги живлення.

Крім того, на додаток до звичайного вбудованого лінійного регулятора напруги мікроконтролери групи RA2L1 мають інтегрований імпульсний понижувальний перетворювач, що дає змогу підтримувати внутрішню напругу живлення на рівні приблизно 1.5 В за коливань вхідної напруги в діапазоні 2.4–5.5 В. Перехід на живлення від імпульсного перетворювача зменшує величину споживаного струму майже вдвічі (табл. 2), однак водночас не слід забувати, що він доступний лише під час роботи в активних режимах, і його використання можливе лише в частині діапазону дозвolenної напруги живлення мікроконтролера.

Ще один важливий параметр, що впливає на величину споживаного струму цифрових мікросхем, — тактова частота. Вузли мікроконтролерів RA2 здатні працювати від п'яти джерел тактового сигналу, кожне з яких може використовуватися як основний генератор системи:

- основний зовнішній тактовий генератор (*Main-clock oscillator, MOSC*);
- допоміжний зовнішній тактовий генератор (*Sub-clock oscillator, SOSC*);
- високочастотний вбудований генератор (*High-speed on-chip oscillator, HOCO*);
- середньочастотний вбудований генератор (*Middle-speed on-chip oscillator, MOCO*);
- низькочастотний RC-генератор (*Low-speed on-chip oscillator, LOCO*).

Традиційним джерелом тактового сигналу в активному режимі є основний тактовий генератор MOSC. Цей вузол розрахований на роботу із зовнішнім керамічним або кварцовим резонатором, частота якого може перебувати в діапазоні 1–20 МГц. До того ж у системах, що вимагають синхронної роботи кількох мікроконтролерів, цей генератор може функціонувати в режимі веденого, підтримуючи роботу із зовнішніми джерелами сигналів із частотою до 20 МГц.

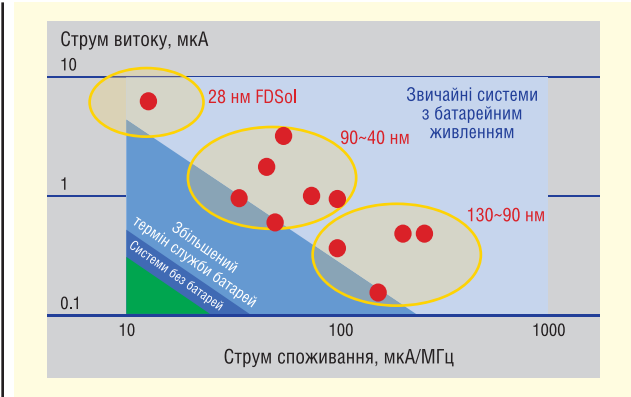


Рис. 4. Залежність струму споживання і струму витoku від розміру техпроцесу

Таблиця 2. Струм споживання мікроконтролерів RA2 у різних режимах

Режим роботи	RA2A1	RA2L1	RA2E1	RA2E2
Активний режим (Normal mode), мкА/МГц	108	114 (LDO) 64 (DC/DC)	100	81
Сплячий режим (Sleep Mode), мкА/МГц	56	22 (LDO) 14 (DC/DC)	22	21
Програмований режим очікування (Software Standby mode), нА	без RTC	500	250	250
	із RTC	900	360	360

Традиційним додатковим генератором, який також часто встановлюють у мікроконтролерах, стає допоміжний генератор SOSC, розрахований на використання зовнішнього кварцового резонатора з частотою 32768 Гц. Такі генератори дуже часто застосовують для реалізації годинників реального часу, а також різних таймерів із низьким споживанням енергії.

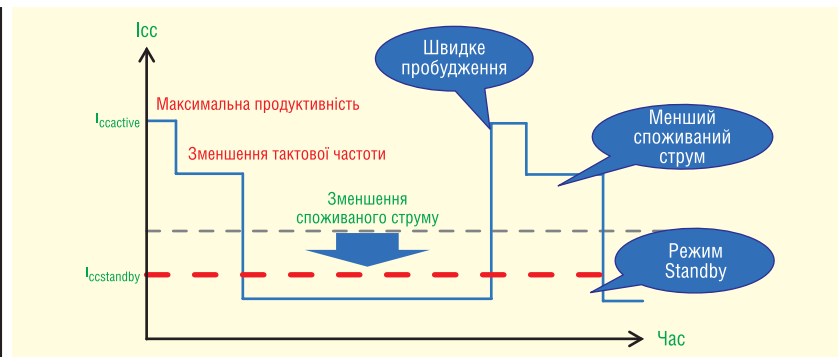
Ключова перевага генераторів, стабілізованих кварцовими або керамічними резонаторами, — висока точність вихідної частоти. Однак при цьому через наявність вузлів, що працюють в аналоговому режимі, їхнє енергоспоживання доволі велике, що не завжди підходить для пристроїв із батарейним живленням. Ефективнішими під час роботи від батарей видаються вбудовані генератори, які не потребують зовнішніх компонентів і вирізняються зниженим енергоспоживанням.

Мікроконтролери RA2 мають три основні вбудовані генератори: HOCO, MOCO і LOCO. Інтегрований високочастотний генератор HOCO може формувати одну з декількох фіксованих частот (24, 32, 48 або 64 МГц) і використовуватися замість основного тактового генератора. Частота 64 МГц більша за максимально допустиму частоту ядра (48 МГц), однак вона може призначатися для тактування деяких периферійних пристроїв, наприклад АЦП і високошвидкісних таймерів. Низькочастотний генератор LOCO, розрахований на частоту близько 32768 Гц, може застосовуватися як заміна більш енергоємного допоміжного генератора SOSC. Особливість мікроконтролерів RA2 полягає в наявності окремого генератора MOCO, що створює фіксовану частоту 8 МГц, який також може використовуватися як основний генератор системи. Увімкнення вбудованих генераторів після скідання мікроконтролера та їхня тактова частота програмується в регістрах конфігурації, що розміщені в спеціальній ділянці Flash-пам'яті (*Option-Setting Memory*), що дає змогу унеможливити додаткове програмне налаштування генераторів під час старту пристрою. Однак надалі їх можна перемикнути програмно.

Інші джерела — незалежний генератор сторожового таймера 15 кГц (*IWDT-dedicated on-chip oscillator, IWDTLOCO*)

**Таблиця 3. Характеристики джерел тактового сигналу**

Джерело тактового сигналу	Власна частота	Стабілізація частоти	Підключення зовнішнього джерела	Наявність у мікроконтролерах
MOSC	1–20 МГц	Зовнішній керамічний або кварцовий резонатор	до 20 МГц	RA2A1, RA2L1, RA2E1
SOSC	32.768 кГц	Зовнішній кварцовий резонатор	Не підтримується	Усі групи
HOCO	24, 32, 48, 64 МГц	Внутрішні схеми без використання зовнішніх компонентів		
MOCO	8 МГц			
LOCO	32.768 кГц			
IWDTLOCO	15 кГц			
SWCLK	–	–	до 12.5 МГц	



**Рис. 5. Динамічне регулювання споживаного струму шляхом зміни тактової частоти**

і зовнішнє джерело тактового сигналу (*External clock, SWCLK*) — є вузькоспеціалізованими та використовуються для тактування лише обмеженого кола вузлів. Слід зазначити, що в мікроконтролерах RA2E2, від самого початку розрахованих на експлуатацію в пристроях «Інтернету речей» з автономним живленням, тактових генераторів MOSC і SOSC немає, тому тактування системи може здійснюватися тільки від вбудованих генераторів HOCO, MOCO або LOCO (табл. 3).

Наявність декількох джерел тактового сигналу дає змогу динамічно конфігурувати енергоспоживання мікроконтролерів, використовуючи частоту, реально необхідну в цьому режимі роботи (рис. 5). При цьому, хоча вихідна частота тактових генераторів і фіксована, більшість системних шин мікроконтролерів RA2 можуть підключатися до джерел тактового сигналу через конфігуровані ділянки частоти.

Крім того, такий широкий вибір джерел тактування зумовлений необхідністю підбору інших характеристик генераторів для оптимального режиму роботи мікроконтролера загалом. Наприклад, вбудований генератор MOCO може прокидатися з Standby-режиму за найменшій час у широкому діапазоні робочих напруг (для RA2L1 це 4 мкс), а вбудований генератор HOCO зберігає свою 1%-ву точність в усьому

діапазоні робочих напруг і в усьому діапазоні робочих температур (для RA2L1 це 1.6–5.5 В і –40 ... +105 °С).

У мікроконтролерах RA2L1, RA2E1 і RA2E2 можливі чотири режими роботи з різним значенням системної тактової частоти ICLK (табл. 4). Частоти тактування периферійних модулів при цьому можуть бути іншими. Кожен із режимів можливий у своєму діапазоні напруг живлення, тому перед переходом у новий режим бажано переконатися, що його величина перебуває в допустимих межах. Зверніть увагу, що запис у Flash-

пам'ять, на відміну від читання з неї, може здійснюватися за тактової частоти, що не нижча за 1 МГц, тому в деяких режимах, наприклад, у разі тактування системної шини від допоміжного генератора (*Subosc-speed mode*), так само як і за деяких напруг живлення, операції запису в цей вид пам'яті неможливі.

У мікроконтролерах RA2A1, виготовлених за техпроцесом з іншою роздільною здатністю, максимальні частоти читання і запису у Flash-пам'ять відрізняються від мікроконтролерів інших груп (табл. 5). Крім того, у мікросхемах зазначеної групи існує додатковий режим роботи зі зниженою напругою (*Low-voltage mode*).

**ЕНЕРГООЩАДНІ РЕЖИМИ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ RA2**

В активному стані ядро та периферійні модулі мікроконтролера перебувають у режимі Normal. У цьому режимі продуктивність мікроконтролера максимальна, а тому єдиним способом зниження енергоспоживання є зменшення тактової частоти та вимкнення модулів, які не використовуються (звісно ж, без шкоди для функцій, що забезпечуються). Коли потреби в такому рівні продуктивності немає, мікроконтролер можна перевести в режим Sleep, що дає змогу зменшити величину споживаного струму щонайменше вдвічі (табл. 2). У режимі Sleep ядро мікроконтролера зупиняється, вміст оперативної пам'яті та внутрішніх регістрів зберігається, проте периферійні модулі й тактові генератори продовжують роботу і здатні повернути систему в активний режим.

**Таблиця 4. Режими роботи мікроконтролерів RA2L1, RA2E1, RA2E2**

Режим роботи	Напруга живлення, В	Частота читання з Flash-пам'яті, МГц	Частота запису Flash-пам'ять, МГц
High-speed mode	1.8–5.5	0.32768–48	1–48
	1.6–1.8	0.32768–4	1–4
Middle-speed mode	1.8–5.5	0.32768–24	1–24
	1.6–5.5	0.32768–2	1–2
Subosc-speed mode	1.6–5.5	0.0278528–0.0376832	Неможлива

**Таблиця 5. Режими роботи мікроконтролерів RA2A1**

Режим роботи	Напруга живлення, В	Частота читання з Flash-пам'яті, МГц	Частота запису у Flash-пам'ять, МГц
High-speed mode	2.4–2.7	0.32768–16	Неможлива
	2.7–5.5	0.32768–48	1–48
Middle-speed mode	1.8–2.4	0.32768–8	1–8
	2.4–5.5	0.32768–12	1–12
Low-voltage mode	1.6–1.8	0.32768–4	Неможлива
	1.8–5.5	0.32768–4	1–4
Low-speed mode	1.8–5.5	0.32768–1	Неможлива
Subosc-speed mode	1.8–5.5	0.0278528–0.0376832	Неможлива



Незважаючи на те що енергоспоживання в режимі Sleep значно менше, ніж у режимі Normal, у багатьох випадках енергія батареї все одно витрачається нерационально. Єдиною перевагою сплячого режиму є найшвидша — буквально за кілька періодів тактової частоти — активізація всіх вузлів мікроконтролера, тому його часто використовують у ситуаціях, коли система має зреагувати на певну подію впродовж кількох мікросекунд або ще швидше.

З погляду енергоспоживання ефективнішим вважається конфігурований режим очікування (*Software Standby*). Тут робота ядра, Flash-пам'яті, тактових генераторів і більшості периферійних модулів зупиняється. Проте наявність напруги живлення дає змогу зберегти стан всієї оперативної пам'яті та внутрішніх регістрів периферійних модулів, зокрема й портів вводу/виводу (мікросхеми RA2L1 водночас переходять на живлення від LDO-стабілізатора), тому під час повернення в активний стан повторна ініціалізація системи також не потрібна. Режим *Software Standby* зменшує енергоспоживання мікроконтролера до максимальної можливої величини (табл. 2).

Повний список вузлів, здатних працювати в цьому стані, залежить від моделі мікроконтролера та наведено в його технічній документації. Здебільшого типовими подіями, що дають змогу повернути систему в режим Normal, є події, пов'язані з портами вводу/виводу (зміна сигналу на виводах мікросхеми), компараторами (зменшення/збільшення напруги вище за певний поріг), годинником реального часу (пробудження за розкладом), незалежним сторожовим таймером тощо. Під час виходу з режиму *Software Standby* виникає переривання, тому обчислювальне ядро в будь-якому разі продовжить виконання програми з інструкцій, пов'язаних з опрацюванням події, що розбудила мікроконтролер. Оскільки в режимі *Software Standby* більшість тактових генераторів зупинено, то для повернення в активний стан потрібно більше часу, ніж при виході з режиму Sleep.

Під час повернення з режимів Sleep і *Software Standby* ядро мікроконтролера переходить у режим Normal. Однак іноді така поведінка системи може бути нерациональною з погляду енергоспоживання. Річ у тім, що багато подій можуть не вимагати обов'язкового опрацювання ядром зміненого стану або нових даних. Однак у звичайних мікроконтролерах периферійний модуль, що будить мікроконтролер, у будь-якому разі переведе його в активний режим

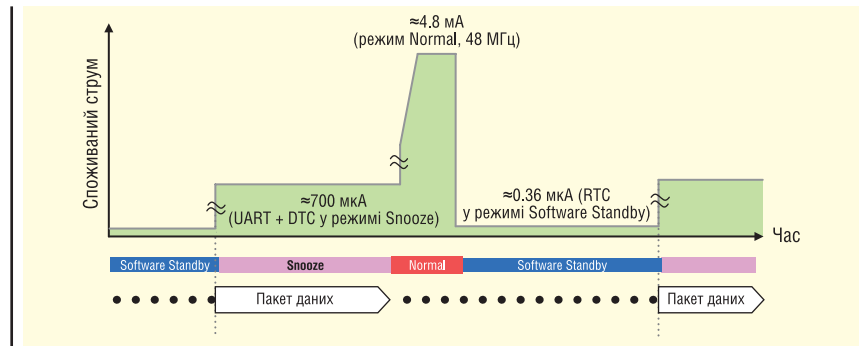


Рис. 6. Приклад роботи мікроконтролера з використанням режиму Snooze

із подальшою витратою деякої кількості заряду батареї.

Спеціально для подібних ситуацій у мікроконтролерах RA2 було реалізовано унікальний енергоощадний режим Snooze (режим «напівдрімоти»), особливістю якого є можливість спільної роботи периферійних модулів і системи тактування без участі ядра. По суті, Snooze-режим — це перехід із режиму *Software Standby*, коли вмикається тільки обраний тактовий генератор і обрана периферія, яка, обробивши подію, знову повертає систему в режим *Software Standby*, або периферія може ухвалити самостійно рішення про прокидання ядра (режим Normal) для подальшого опрацювання. Типовий приклад «розумної» периферії, здатної працювати в режимі Snooze, — блок АЦП. Після завершення роботи АЦП звіряє значення порівняння з програмованими регістрами верхнього і нижнього порогів для ухвалення рішення про прокидання ядра. У сукупності з іншими апаратними засобами, які можуть працювати в Snooze-режимі, зокрема, модулем обміну даними (*Data Transfer Controller, DTC*), модулем опрацювання даних (*Data Operation Circuit, DOC*) і контролером подій (*Event Link Controller, ELC*), мікроконтролери RA2 перетворюються на потужний інструмент, який дає змогу реалізувати досить складні алгоритми взаємодії з мінімальними витратами енергії.

Відчути всю потужність цього механізму можна на ще одному практичному прикладі. Розглянемо деякий автоматизований пристрій — газоаналізатор з батарейним живленням, що зв'язується із зовнішнім контролером за інтерфейсом UART, який використовується як єдина шина для кількох датчиків. Для економії енергії газоаналізатор більшу частину часу має перебувати в режимі *Software Standby*, вихід з якого можливий, наприклад, під час одержання команди по інтерфейсу UART. Оскільки модуль SCI, що відповідає за обмін да-

ними за інтерфейсом UART, у режимі *Software Standby* неактивний, зокрема й через зупинку тактового генератора, то у звичайному мікроконтролері, який перебуває в аналогічному режимі, зміна напруги на вході UART, що свідчить про приймання стартового біта, вимагала б обов'язкового переходу в режимі Normal або Sleep.

Однак мікроконтролери RA2 можна перевести в режим Snooze, у якому активізуються: потрібний тактовий генератор (залежно від швидкості роботи інтерфейсу UART можна вибрати HOCO або MOCO), модуль SCI та модуль передачі інформації DTC. У цьому режимі приймання пакета може відбуватися без участі ядра — вся інформація, прийнята модулем SCI через систему DTC, буде збережена в оперативній пам'яті. За необхідності в цьому ж режимі за допомогою модуля DOC можна здійснити первинну обробку прийнятої інформації, зокрема перевірку адреси пристрою за одним із прийнятих слів у повідомленні. Таким чином, мікроконтролер RA2 може бути переведений в активний режим не одразу після початку передавання даних, як у традиційних мікросхемах, а після приймання та успішної первинної перевірки всього пакета (рис. 6). Очевидно, що кількість енергії, витраченої від батареї, у цьому разі буде найменшою з усіх можливих сценаріїв поведінки в цій ситуації.

## ВИСНОВОК

Як видно з цього огляду, мікроконтролери RA2 є потужною апаратною основою, що дає змогу створювати не тільки високопродуктивні, а й економічні системи. При цьому унікальність цих мікросхем полягає не тільки в застосуванні якої-небудь однієї специфічної технології, а в наявності цілого комплексу рішень, здатних успішно реалізувати навіть найскладніше технічне завдання.

CN