

## Лекція 3 ОДНОКРИСТАЛЬНІ МІКРОКОНТРОЛЕРИ AVR З RISC-АРХІТЕКТУРОЮ

### Таймери-лічильники

Будь-який мікроконтролер AVR містить декілька вбудованих таймерів. Причому по своєму призначенню їх можна розділити на таймери загального призначення та сторожовий таймер (рис. 1).

Сторожовий таймер призначений для перезапуску програми у разі збою у ході її виконання. Програма, що працює без збоїв, періодично скидає сторожовий таймер, не допускаючи його переповнювання. Сторожовий таймер має свій власний RC-генератор, що працює на частоті 1 МГц. На вході таймера підключений передподільник вхідної частоти з програмованим коефіцієнтом ділення, що дає змогу регулювати часовий інтервал переповнення таймера і скидання МК. Сторожовий таймер може бути відключений програмним способом під час роботи МК.

Таймери загального призначення використовуються для формування різних інтервалів часу і прямокутних імпульсів заданої частоти. Крім того, вони можуть працювати в режимі лічильника і підраховувати тактові імпульси заданої частоти, вимірюючи таким чином тривалість зовнішніх сигналів, а також при необхідності підраховувати кількість будь-яких зовнішніх імпульсів.

З цієї причини такі таймери називають таймерами-лічильниками. В МК AVR застосовуються як 8-розрядні, так і 16-розрядні таймери-лічильники. Їх кількість для різних МК змінюється від одного до чотирьох (табл. 2.1). Всі таймери позначаються числами від 0 до 3. В технічній літературі їх часто іменують скорочено - T0, T1, T2, T3. Таймери T0 і T2 в більшості МК - 8-розрядні, а таймери T1 і T3 – 16-розрядні. Таймер T0 є в будь-якому МК AVR. Інші додаються у міру ускладнення моделі.

Кожний 8-розрядний таймер є одним 8-розрядним регістром, який для МК є регістром введення-виведення. Цей регістр зберігає поточне значення таймера і називається рахунковим регістром. 16-розрядні таймери мають 16-розрядний рахунковий регістр. Кожний рахунковий регістр має своє ім'я.

Рахунковий регістр 8-розрядного таймера іменується TCNT<sub>x</sub>, де «x» - це номер таймера. Так, для таймера T0 регістр називається TCNT0, а для таймера T2 - TCNT2. 16-розрядні регістри іменуються схожим чином. Відмінність в тому, що кожний 16-розрядний рахунковий регістр для МК являє собою два регістри введення-виведення.

Один призначений для зберігання старших бітів числа, а другий - для зберігання молодших бітів. До імені регістра старших розрядів додається буква H, а для регістра молодших розрядів додається буква L. Таким чином, рахунковий регістр таймера T1 - це два регістри введення-виведення: TCNT1H і TCNT1L. Рахунковий регістр таймера T3 - це два регістри TCNT3H і TCNT3L.

МК може записати в будь-який рахунковий регістр будь-яке число у будь-який момент часу, а також у будь-який момент прочитати вміст будь-якого рахункового регістра. Коли таймер вмикається в режим рахунку, то на його вхід починають надходити рахункові імпульси. Рахунковими імпульсами можуть служити як спеціальні тактові імпульси, що виробляються усередині самого МК, так і зовнішні імпульси, що поступають на спеціальні входи МК. При переповненні рахункового регістра його вміст становиться рівним нулю, і рахунок починається спочатку.

Будь-який таймер зав'язаний з системою переривань. Викликати переривання може цілий ряд подій, пов'язаних з таймером. Наприклад, існує переривання по переповнюванню таймера, або по спрацьовуванню

спеціальної схеми порівняння. Окремі переривання може викликати сторожовий таймер.

**Таймери МК AVR** можуть працювати в декількох режимах. Для вибору режимів роботи існують спеціальні регістри - регістри керування таймерами. Для простих таймерів використовується один регістр керування. Для більш складних - два регістри. Регістри керування таймером називаються TCCR<sub>x</sub> (де «x» — номер таймера). Наприклад, для таймера T0 використовується один регістр з ім'ям TCCR0. Для керування таймером T1 використовується два регістри: TCCR1A і TCCR1B. За допомогою регістрів керування проводиться не тільки вибір відповідного режиму, але і більш тонка настройка таймера. Нижче розглянуті всі основні режими роботи таймерів.

### **Режим Normal**

В цьому режимі таймер робить підрахунок імпульсів, що приходять на його вхід (від тактового генератора або зовнішнього пристрою) і викликає переривання по переповненню. Цей режим є єдиним режимом роботи для 8-розрядних таймерів більшості МК сімейства «Tiny» і для частини МК сімейства «Mega». Для всієї решти 8-розрядних і всіх 16-розрядних таймерів це всього лише один з можливих режимів.

### **Режим «Захоплення» (Capture)**

Суть цього режиму полягає в збереженні вмісту рахункового регістра таймера в певний момент часу. Запам'ятовування відбувається або по сигналу, що поступає через спеціальний вхід МК, або від сигналу з виходу вбудованого аналогового компаратора.

Цей режим є зручним у тому випадку, коли потрібно вимірювати тривалість зовнішнього процесу (наприклад час, за який напруга на

конденсаторі досягне певного значення). В цьому випадку напруга з конденсатора подається на один з входів компаратора, а на другий його вхід подається опорна напруга. В той момент, коли напруга на конденсаторі порівнюється з опорною напругою, логічний рівень на виході компаратора зміниться на протилежний. По цьому сигналу поточне значення рахункового реєстра запам'ятовується в спеціальному реєстрі захоплення. Ім'я цього реєстра ICRx (для таймера T0 це буде ICR0, для T1 — ICR1 і т. д.). Одночасно виробляється запит на переривання.

### **Режим «Скидання при співпаданні»**

Для роботи в цьому режимі використовується спеціальний реєстр - реєстр співпадання. Якщо МК містить декілька таймерів, то для кожного з них існує свій окремий реєстр співпадання. Причому для 8-розрядних таймерів реєстр співпадання - це один 8-розрядний реєстр, а для 16-розрядних таймерів - це два восьмирозрядні реєстри.

Реєстри співпадання також мають свої імена. Наприклад, реєстр співпадання таймера T1 складається з двох реєстрів: OCR1L і OCR1H. Якщо реєстр співпадання 16-розрядний, то фізично він складаються з двох реєстрів введення-виведення.

Ці реєстри включаються в роботу тільки тоді, коли вибраний режим «Скидання при співпаданні». В цьому режимі, як і в попередньому, таймер виконує підрахунок вхідних імпульсів. Поточне значення таймера з його рахункового реєстра постійно порівнюється з вмістом реєстрів співпадання.

Якщо таймер має два реєстри співпадання, то для кожного з цих реєстрів проводиться окреме порівняння. Коли вміст рахункового реєстра співпаде з вмістом одного з реєстрів співпадання, відбудеться виклик

відповідного переривання. Окрім виклику переривання, у момент співпадання може відбуватися одна з наступних подій:

- скидання таймера (виконується тільки для регістрів співпадання OCR1 і OCR1A);
- зміна стану одного з виводів мікроконтролера (виконується для всіх регістрів).

### **Режим «Швидкодіючий ШІМ» (Fast PWM)**

Сигнал з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) часто використовується в пристроях керування електродвигунами постійного струму, нагрівальними елементами, освітлювальними приладами і т.п. Для цього замість постійної напруги на ці пристрої подається прямокутна імпульсна напруга. Змінюючи скважність імпульсів, можна змінювати середню напругу, прикладену до пристрою. Перевага імпульсного керування - у високому коефіцієнті корисної дії. Імпульсні керуючі елементи розсіюють набагато менше паразитної потужності, ніж керуючі елементи, що працюють в аналоговому режимі.

Для формування сигналу ШІМ використовуються ті ж самі регістри співпадання, які працюють в попередньому режимі. Формування сигналу ШІМ може здійснюватися декількома способами. Робота таймера в режимі Fast PWM наведена на рис. 4.

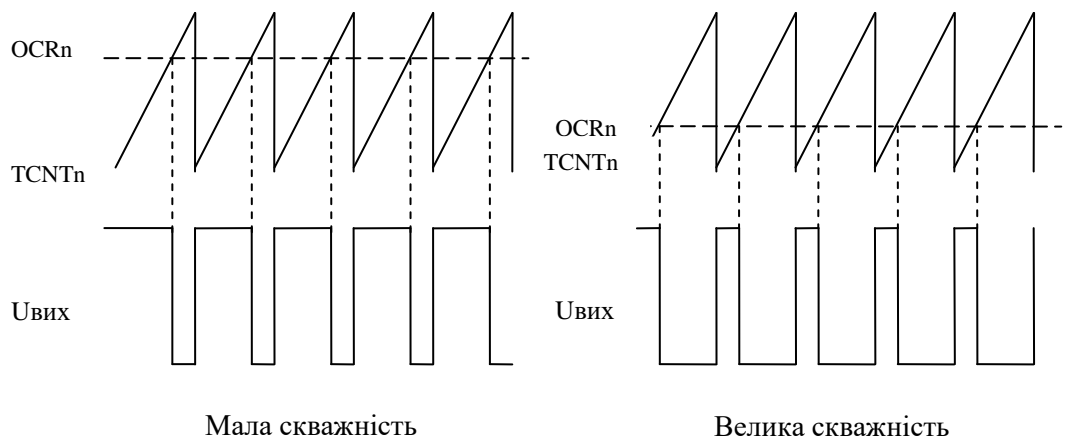


Рис. 4. Робота таймера в режимі Fast PWM

Сигнал з ШІМ формується на спеціальному виході МК. На вхід таймера подаються імпульси від системного генератора. Таймер знаходиться в стані безперервного рахунку. При переповнюванні таймера його вміст скидається в нуль, і рахунок починається спочатку. В режимі ШІМ переповнювання таймера не викликає переривань. На рис. 2.4. це показано у вигляді пілкоподібної кривої, позначеної як TCNTn. Крива визначає залежність вмісту рахункового регістра від часу.

Вміст рахункового регістра безперервно порівнюється з вмістом регістра співпаданья. Якщо число в регістрі OCRn більше, ніж число в рахунковому регістрі таймера (TCNTn), напруга на виході ШІМ дорівнює логічній одиниці. Коли ж в процесі рахунку вміст рахункового регістра TCNTn стане більше вмісту OCRn, на виході ШІМ встановиться нульовий потенціал.

В результаті на виході ми отримуємо прямокутні імпульси. Скважність цих імпульсів залежатиме від вмісту регістра OCRn. Чим менше число в OCRn, тим вище скважність вихідних імпульсів. На рис. 2.4. показана скважність імпульсів для двох різних значень регістра OCRn.

### Режим «ШІМ з точною фазою» (Phase Correct PWM)

Описаний в попередньому розділі режим ШІМ має один недолік. При змінюванні тривалості імпульсів змінюється їх фаза. Центр кожного імпульсу як би зсувається в часі. При керуванні деякими пристроями така поведінка фази сигналу керування небажана. Тому в МК AVR передбачений ще один режим - ШІМ з точною фазою. Принцип роботи таймера в цьому режимі зображений на рис. 5.

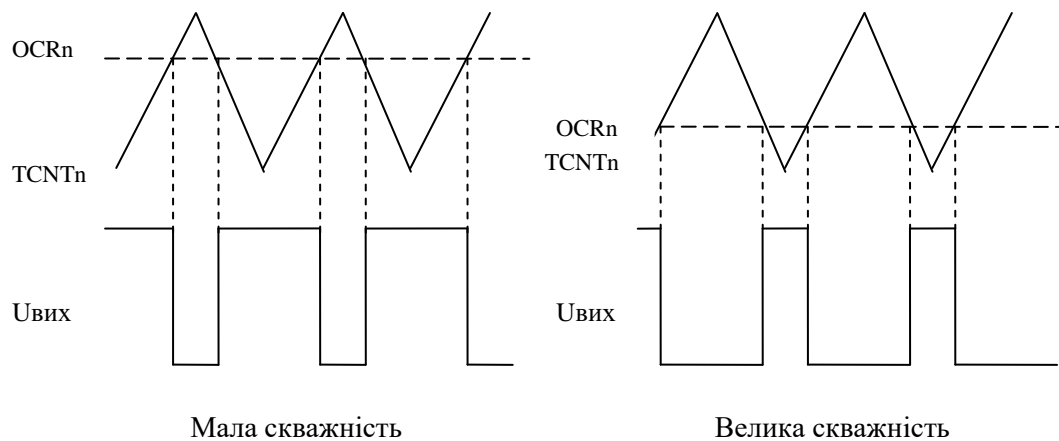


Рис. 5. Робота таймера в режимі Phase Correct PWM

Відмінність режиму «Phase Correct PWM» від режиму «Fast PWM» полягає в режимі роботи лічильника. Спочатку лічильник рахує так само, як і в попередньому режимі (від кожного вхідного імпульсу його значення збільшується на одиницю). Але досягнувши свого максимального значення, лічильник не скидається в нуль, а перемикається в режим реверсивного рахунку. В цьому режимі від кожного вхідного імпульсу вміст лічильника зменшується на одиницю. В результаті пилоподібна крива, що відображає вміст рахункового регістра TCNTn, стає симетричною, як показано на рис. 5. Система співпадання працює так само, як і у попередньому режимі.

Завдяки симетричності сигналу на таймері, фаза вихідних імпульсів в процесі регулювання скважності не змінюється. Середина кожного імпульсу прив'язана до точки зміни напрямку таймера.

Недоліком режиму «Phase Correct PWM» можна вважати меншу в два рази частоту вихідного сигналу. Це істотно зменшує динамічність регулювання. Крім того, при використанні зовнішніх фільтрів для перетворення імпульсного сигналу ШІМ в аналоговий, схема з більш низькою частотою вимагає застосування фільтруючих елементів з більшими габаритами і масою.

### **Асинхронний режим**

В деяких моделях мікроконтролерів таймер може працювати в асинхронному режимі. В цьому режимі на вхід таймера подається або частота від внутрішнього кварцового генератора, або від зовнішнього генератора. Лічильник не виробляє ніяких переривань і додаткових сигналів. В цьому режимі він працює як годинник реального часу. МК може встановлювати вміст рахункового регістра. А потім у будь-який момент він може прочитати цей вміст, отримавши, таким чином, поточне значення реального часу.

### **Попередні подільники таймерів-лічильників**

Кожний таймер МК може працювати від двох різних джерел тактових імпульсів. Це або зовнішні імпульси, або імпульси, що виробляються внутрішнім генератором МК. Яке б джерело імпульсів не було вибрано, перед тим, як потрапити на вхід таймера, цей сигнал проходить схему попереднього подільника. Попередній подільник призначений для того, щоб розширити діапазон тривалостей і частот



сигналів, які формуються таймером. Кожний МК AVR має свою структуру попереднього подільника для таймерів-лічильників. Спрощена схема одного з варіантів попереднього подільника приведена на рис. 6.

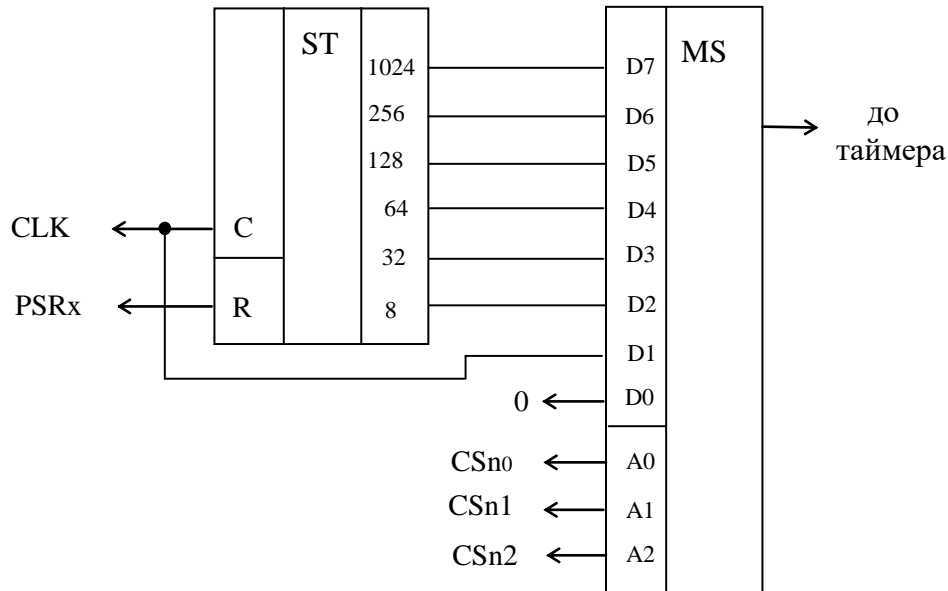


Рис. 6. Передподільник для таймера

Як видно з схеми, імпульси внутрішнього тактового генератора CLK поступають на 10-розрядний подільник ST. З виходів подільника знімаються сигнали CLK/8, CLK/32, CLK/64, CLK/128, CLK/256 і CLK/1024. Всі ці сигнали поступають на входи даних мультиплексора MS. На адресні входи мультиплексора поступають сигнали трьох розрядів регістра керування таймером (TCCRn).

Таким чином, записуючи в розряди CSn0, CSn1, CSn2 різні значення, можна вибирати один з восьми режимів роботи передподільника. Залежно від вибраного режиму, на вихід схеми можуть поступати сигнал з одного з виходів 10-розрядного подільника, прямиий сигнал з тактового генератора або нульовий логічний рівень. В останньому випадку сигнал на вході таймера буде відсутній, і його робота припиняється.

## **Інші периферійні пристрої та комірки**

**Аналоговий компаратор** призначений для порівняння напруг на двох зовнішніх входах. Такі входи мають назви AIN0 (неінвертуючий) та AIN1 (інвертуючий). Кожний з цих входів суміщений з однією з ліній якого-небудь порту введення-виведення. Якщо напруга на вході AIN0 більше, ніж напруга на вході AIN1, то на виході компаратора - логічна одиниця. В іншому випадку там логічний нуль.

Цей результат зберігається в одному з розрядів спеціального регістра введення-виведення, який призначений для роботи з компаратором і називається ACSR. А розряд, куди виводиться вихідний сигнал компаратора, теж має свою назву - AC0. Інший розряд під назвою ACD того ж регістра відповідає за ввімкнення/вимкнення компаратора. Ще два розряди ACIS0 і ACIS1 визначають спосіб впливу сигналу з виходу компаратора на подальші схеми. Є три варіанти: будь-яка зміна на виході; зміна з одиниці на нуль; зміна з нуля на одиницю.

Схема компаратора має спеціальне внутрішнє джерело опорної напруги, яке може бути підключене до неінвертуючого входу компаратора. Підключенням внутрішнього джерела керує розряд ACBG регістра ACSR. Крім того, на інвертуючий вхід компаратора можна подати сигнал з будь-якого входу аналого-цифрового перетворювача АЦП. Цим перемиканням керує решта розрядів регістра ACSR.

**Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)** призначений для перетворення аналогового сигналу в цифрову форму. Перетворювач вимірює величину сигналу і видає на виході цифровий код, який відповідає цій величині. АЦП застосовуються в мікропроцесорних системах керування різними аналоговими пристроями та процесами. Наприклад, мікропроцесорний стабілізатор напруги, цифровий вольтметр і т.п.

В МК AVR застосовується 10-розрядний АЦП послідовного наближення. МК, що мають в своєму складі вбудований АЦП, обов'язково мають роздільне живлення для цифрової і для аналогової частин схеми. Тому вони мають два виводи живлення і два виводи загального дроту.

Крім того, один з виводів зарезервований для подачі на мікросхему зовнішньої опорної напруги. Опорна напруга використовується в схемі АЦП для оцінки рівня вхідного сигналу. Від стабільності опорної напруги залежить точність вимірювання.

Кожний АЦП забезпечений багатоканальним аналоговим комутатором (мультиплексором), який дозволяє вимірювати аналогову напругу з декількох різних входів. Кількість входів АЦП у різних МК різна і становить від 4 до 16 (табл. 1).

Сигнал, що вимірюється, прикладається між відповідним входом АЦП і аналоговим загальним дротом. Такі входи називаються несиметричними. В деяких мікроконтролерах є режим, в якому входи АЦП об'єднуються попарно і утворюють диференціальні входи. Диференціальні входи відрізняються від звичайних тим, що сигнал, що вимірюється, прикладається між двома входами: прямим і інверсним. Перешкоди, що при цьому наводяться, компенсуються, а корисний сигнал проходить без змін. Такі входи називаються симетричними.

Процес перетворення напруги в код займає 13 або 14 тактів. За цей час відбувається підбір коду методом послідовних наближень. Після закінчення процесу перетворення виробляється запит на переривання. Результат перетворення записується в пару регістрів ADCH, ADCL. З шістнадцяти розрядів цієї регістрової пари використовуються тільки 10, а інші дорівнюють нулю. Причому можуть використовуватися або десять старших розрядів (ADCH7-ADCH0, ADCL7, ADCL6), або десять

молодших розрядів (ADCH1, ADCHO, ADCL7-ADCL0). Це залежить від вибраного режиму роботи.

АЦП можуть працювати як в одиночному режимі, так і в безперервному. В безперервному режимі цикли перетворення йдуть один за одним. В одиночному режимі процес перетворення запускається однократно від однієї з наступних подій: переривання від аналогового компаратора; зовнішнього переривання INT0; переривання по події «Співпадання» одного з таймерів; переривання по переповненню одного з таймерів; переривання по події «Захоплення» одного з таймерів.

Керування всіма режимами роботи АЦП здійснюється за допомогою двох спеціальних регістрів: ADMUX і ADCSR. Регістр ADMUX призначений для керування вхідним аналоговим мультиплексором, а регістр ADCSR - для вибору режиму роботи АЦП.

Процес перетворення в АЦП синхронізується від внутрішнього генератора мікроконтролера. Тактовий сигнал від генератора поступає на АЦП з попереднього подільника з програмованим коефіцієнтом ділення. Коефіцієнт ділення залежить від значення розрядів ADPS0, ADPS1 і ADPS2 регістра ADCSR і може приймати значення 2, 4, 8, 16, 32, 64 і 128.

Найбільша точність перетворення досягається тоді, коли тактова частота перетворення знаходиться в діапазоні 50—200 кГц. Тому рекомендується вибирати такий коефіцієнт ділення, щоб тактова частота модуля АЦП знаходилася в цьому діапазоні.

### **Конфігураційні комірки**

Всі мікроконтролери AVR мають багато режимів роботи. Деякі з режимів неможливо перемкнути програмним шляхом, використовуючи регістри керування. Для подібної мети фірма *Atmel* додала в свої мікроконтролери новий елемент настроювання МК - програмовані

перемикачі режимів. Ці перемикачі виконані у вигляді спеціальних конфігураційних комірок, які, по суті, є ще одним видом перепрограмованої енергонезалежної пам'яті. Всі конфігураційні комірки об'єднуються в байти. Різні мікросхеми AVR мають від однієї до трьох байтів конфігураційних комірок.

Кожний конфігураційний перемикач має своє певне ім'я і призначений для того, щоб змінювати який-небудь параметр або режим роботи мікроконтролера. Деякі біти конфігураційних комірок з'єднані в групи. Наприклад, група з чотирьох бітів CKSEL3-0 дозволяє вибирати режими синхронізації. Різні моделі мікроконтролерів мають різні набори конфігураційних комірок. По термінології фірми *Atmel*, конфігураційні комірки називаються Fuse Bits. Тому для зручності ці комірки часто називають Fuse-комірками.

Запис і читання конфігураційних комірок можливий тільки за допомогою програматора в режимі програмування. Всі незапрограмовані Fuse-комірки містять одиницю. При програмуванні в комірку записується нуль. Деякі з комірок програмуються ще на заводі. Стан всіх конфігураційних комірок для кожного конкретного МК наводиться в його документації.

### **Комірки захисту і ідентифікації**

Мікроконтролери AVR мають програмовані комірки захисту інформації. Це спеціальні комірки, подібні конфігураційним. Кожний МК має, як мінімум, дві захисні комірки: LB1 і LB2. Запис і читання цих комірок можливий тільки в режимі програмування. Запис нуля в LB1 блокує запис даних у Flash- і EEPROM-пам'ять. Одночасно блокується можливість змінювати конфігураційні комірки.

Якщо записати нуль ще і в LB2, то блокується і можливість читання всіх даних. Після цього скопіювати програму з Flash-пам'яті буде неможливо. Для повторного використання мікроконтролера потрібно подати команду «Стирання мікросхеми». При цьому вся інформація втрачається, а здатність читання і модифікації повертається.

В мікроконтролерах сімейства «Mega» є додаткові комірки захисту BLB02, BLB01, BLB12 та BLB11. Вони призначені для обмеження доступу до різних областей пам'яті програм.

Ще одна група комірок - це комірки ідентифікації. Будь-який мікроконтролер має три комірки ідентифікації. Ці комірки доступні тільки для читання і містять інформацію про виробника і модель мікроконтролера.

## **7. Режими зниженого енергоспоживання мікроконтролерів AVR**

Мікроконтролери AVR можна перевести програмно в один із шести режимів зниженого енергоспоживання:

- режим холостого ходу (*IDLE*), в якому припиняє роботу лише процесор і фіксується вміст пам'яті даних, а внутрішній генератор тактових імпульсів, таймери, система переривань і сторожовий таймер продовжують функціонувати;

- режим мікроспоживання (*Power Down*), в якому зберігається вміст регістрового файлу, але зупиняється внутрішній генератор тактових імпульсів. Вихід із цього режиму можливий або після загального скидання МК, або після сигналу від зовнішнього джерела переривання. Для ввімкненого сторожового таймера струм споживання в цьому режимі становить 60...80 мкА, а для вимкненого - менше ніж 1 мкА для всіх типів МК AVR. Наведені вище значення справедливі для напруги живлення 5 В;

- режим зберігання енергії (*Power Save*), що реалізований лише у тих

AVR, що мають у своєму складі систему реального часу. Режим *Power Save* ідентичний режиму *Power Down*, але він допускає незалежну роботу таймера-лічильника реального часу. Вихід із режиму *Power Save* можливий після переривання, зумовленому або переповненням таймера-лічильника, або спрацьовування блока порівняння цього лічильника. Струм споживання у цьому режимі становить 6... 10 мкА за напруги живлення 5 В на частоті 32,768 кГц;

- режим заглушення шуму в процесі роботи аналого-цифрового перетворювача (*ADC Noise Reduction*). У цьому режимі припиняється робота процесора, але дозволяється робота АЦП, дводротового інтерфейсу TWI (аналог шини I<sup>2</sup>C) і сторожового таймера;

- основний режим очікування (*Standby*). Відрізняється від режиму *Power Down* тим, що робота тактового генератора не припиняється. Це гарантує швидкий вихід МК з режиму очікування всього за 6 тактів генератора;

- додатковий режим очікування (*Extended Standby*). Ідентичний режиму *Power Save*, але робота тактового генератора також не припиняється і гарантує швидкий вихід з режиму *Extended Standby* за 6 тактів генератора.