

DOI: 10.18372/2310-5461.47.14932

УДК 537.72

В. В. Кочан, канд. техн. наук, доц.Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем
Західноукраїнського національного університету

orcid.org/0000-0001-8376-4660

e-mail: orestvk@gmail.com

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДНЬОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Вступ

Проблема збільшення часу роботи пристроїв з автономним живленням на сьогодні є одною із дуже актуальних [1]. Для її вирішення використовуються не лише технологічні [2] і системно-технічні [3] підходи. Також використовуються рішення в області архітектури комп'ютерних систем [4], моделювання та оптимізації [5]. Одним із найлегших і універсальних шляхів зменшення енергоспоживання мікроконтролерів і мікропроцесорів (надалі МК) є оптимізація програмного забезпечення за енергоспоживанням. Але цей шлях вимагає побудови доволі точної моделі енергоспоживання МК за даними експериментальних досліджень.

Постановка завдання дослідження

Завдання вимірювання споживаної потужності та енергії інтегральних мікросхем ускладнюється тим, що для мікросхем, виконаних на базі комплементарної технології метал-оксид-напівпровідник (КМОН), яка домінує останнім часом, перепади енергоспоживання у статичному режимі та у момент перемикавання сягають 1 до 200. Частота перемикань таких мікросхем (повторення імпульсів споживання енергії), відповідає подвійній частоті тактового генератора, а гармоніки імпульсів споживання енергії сягають сотень МГц. Тому необхідний малий динамічний внутрішній опір (активний і реактивний) джерела живлення. Його зменшують ввімкненням у коло живлення високочастотного керамічного конденсатора великої ємності. Причому довжина провідників від мікросхем МК до конденсатора повинна бути мінімальною (до 1–2 см). Для МК такий режим роботи можна назвати *нормальним* (штатним). Його порушення веде до порушення функціонування МК через збої. Тоді вимірювання енергоспоживання МК втрачає зміст. Тому необхідно розробити систему вимірювання енергоспоживання МК, похибка якої була би меншою за різницю між енергоспоживанням виконання

різних інструкцій та команд, а також програм та їх фрагментів, що дало би змогу оптимізувати програмне забезпечення за енергоспоживанням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Якщо ввімкнути амперметр між конденсатором у колі живлення МК і самим МК, то різко зростає реактивний динамічний внутрішній опір кола живлення МК, що веде до збоїв. Увімкнення амперметра між конденсатором в колі живлення МК та блоком живлення [6] веде до неконтрольованого обміну енергією між МК та конденсатором. Тому енергія, спожита МК, може суттєво відрізнятись від вимірної через зміну напруги на конденсаторі за час вимірювання.

Часто вимірюють струм споживання МК за спадом напруги на резисторі, ввімкненому у коло його заземлення.

Для зменшення впливу на роботу МК опір резистора слід вибирати 0,1...0,3 Ома, інакше виникають збої. Але тоді зростає похибка вимірювання спаду напруги на цьому резисторі. Тому згадані методи вимірювання спожитої МК енергії не дають достовірної інформації. Побудовані за результатами таких вимірювань моделі мали похибку більше 10 % [7]. Використання спеціалізованих мікросхем [8] практично не змінює стан справ саме тому, що розглянуті похибки є методичними.

Більшу точність вимірювання енергоспоживання МК дає вимірювання миттєвого струму споживання МК за рахунок використання «струмового дзеркала» та цифрового осцилографа [9]. У цьому випадку осцилограф заземлений, а через нелінійні властивості транзисторів динамічний опір «струмового дзеркала» малий. Однак, при значних змінах струму через транзистори «струмового дзеркала», напруги на їх переходах баз-емітер змінюються на 0,2...0,3 В. Тобто у сумі спад напруги на «струмовому дзеркалі» змінюється на 0,4...0,6 В. Така зміна напруги веде до методичної похибки вимірювання енергії споживання МК.

Тому побудовані за результатами вимірювання моделі енергоспоживання МК мали похибку приблизно 7 %.

Для усунення цього недоліку у працях [10; 11] запропоновано пристрій вимірювання миттєвої потужності виконання команд МК, де останній живиться від стабілізатора струму (а не напруги). Це дає змогу обчислювати струми у схемі за першим законом Кірхгофа. При цьому МК працює у нормальному режимі. Він заземлений, паралельно до нього підключено конденсатор. Струм заряду або розряду конденсатора, можна обчислити за формулою [12]

$$I_C = \frac{\Delta U_C \cdot C}{T}, \quad (1)$$

де I_C — струм заряду або розряду конденсатора; ΔU_C — зміна напруги конденсатора при заряді або розряді; T — час заряду або розряду конденсатора; C — ємність конденсатора.

Якщо напруга на конденсаторі спадає, то струму від стабілізатора струму для живлення МК не вистачає. Тоді МК забирає з конденсатора енергію, якої не вистачає. Якщо напруга на конденсаторі зростає, то струм стабілізатора струму для МК є надлишковим. Тоді МК віддає конденсатору надлишкову енергію.

При попередньому налаштуванні пристрою [10; 11] струм стабілізатора струму та ємність конденсатора вибирають такими, щоб за час дослідження напруга на конденсаторі змінювалася в допустимих межах і ця зміна не впливала на роботу МК (зазвичай 0,5...1 %). Слід відзначити, що оцінка струмів заряду-розряду конденсатора згідно із формулою (1) при вимірюванні енергоспоживання МК є приблизною, бо розряд конденсатора відбувається по експоненті, а не по прямій. Але при дослідженні малих змін напруги (0,5...1 % від напруги живлення), похибка апроксимації експоненти прямою є малою (величина другого порядку малості). Для захисту МК напруга на конденсаторі у працях [10; 11] обмежена еквівалентом стабілітрона на операційному підсилювачі та напівпровідниковому діоді. Напругу спрацювання еквівалента стабілітрона задає стабілізатор, вихідна напруга якого рівна номінальній напрузі роботи досліджуваного МК. При перевищенні напруги на МК спрацьовує еквівалент стабілітрона і приймає на себе надлишковий струм, що поступає у коло живлення від стабілізатора струму. Послідовно з еквівалентом стабілітрона ввімкнено прецизійний резистор. За спадом напруги на ньому другий канал цифрового осцилографа вимірює струм, який забирає еквівалент стабілітрона.

Зміни напруги на конденсаторі, ввімкненому в коло живлення МК, вимірює перший канал

цифрового осцилографа. Земля цифрового осцилографа підключена до виходу стабілізатора напруги. Це дає змогу працювати цифровому осцилографу у диференційному режимі. Тобто напруги, які поступають на його обидва входи, не перевищують 100 мВ, що забезпечує його високу чутливість до змін напруги у колі живлення МК.

Основним недоліком пристрою [10; 11] є низька стійкість до наведених завад нормального виду, головним джерелом яких є мережа живлення. Цифрова фільтрація у цьому випадку має малу ефективність через дуже велику розбіжність частоти завади і тактової частоти досліджуваного МК. Мінімальні тактові частоти МК при дослідженні складають 10–20 МГц. А завада має частоту 50 Гц. Для ефективної фільтрації необхідна вибірка тривалістю 20–50 періодів завади, тобто 1–2,5 сек. А для дослідження імпульсного споживання МК необхідно вловлювати щонайменше десятку гармоніку струму споживання. Тобто період дискретизації осцилографа повинен складати 5–10 наносекунд. У такому випадку необхідна для фільтрації вибірка буде складати від 100 до 500 МБ. Цифрові осцилографи, що мають такі об'єми буферної пам'яті, на сьогодні не випускаються. Крім того, цифрова фільтрація вибірки такого об'єму за прийнятний час вимагає використання суперкомп'ютерів. Більшу точність забезпечує система вимірювання середнього енергоспоживання МК [13; 14].

Мета статті

Метою даної статті є забезпечення завадостійкості результату вимірювання системою енергоспоживання МК під час виконання набору інструкцій, команд, фрагментів програм або програм у цілому.

Метод вимірювання середньої енергії МК

Значно вищу завадостійкість має система вимірювання середнього енергоспоживання МК [13; 14], яка базується на пристрої [10; 11] і використовує для ітераційного налагодження струму кола живлення МК інтегруючий аналого-цифровий перетворювач. Структурна схема системи подана на рис. 1.

У склад системи входять програмно-керований стабілізатор струму ССт, завадостійкий інтегруючий амперметр А, програмно-керований магазин конденсаторів Маг.С, досліджуваний мікроконтролер або мікропроцесор МК, вимірювальна підсистема ВС, підсистема прийняття рішень СПР, блок керування БК, стабілізатор напруги СН (його вихідна напруга рівна номінальній напрузі живлення МК), два цифро-аналогові перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2, два компаратори КП1 і КП2, два перемножувачі Пер1 і Пер2, лічильник імпульсів Ліч і дешифратор Дш1.

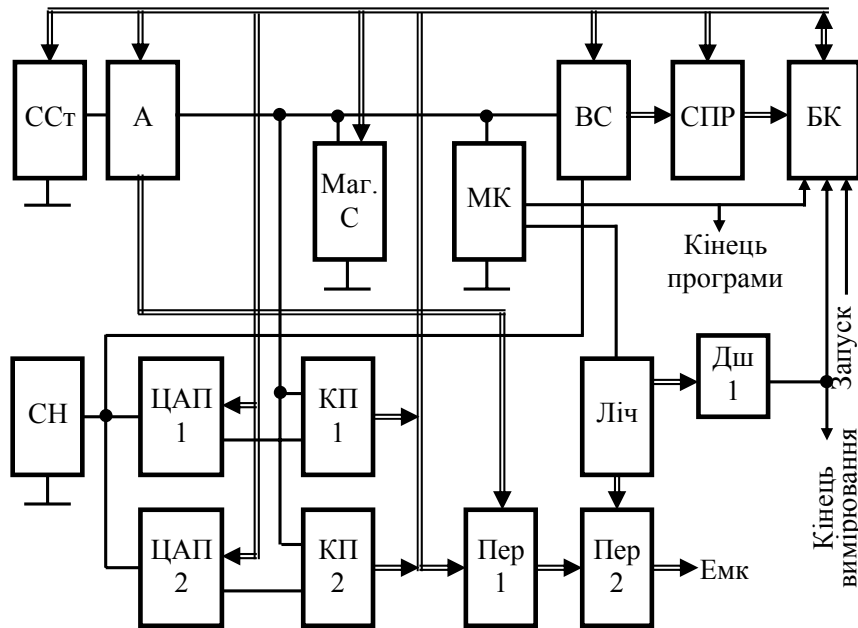


Рис. 1. Структурна схема системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

Процес вимірювання у цій системі поділений на ряд циклів вимірювання, під час яких проходить налаштування параметрів ССт, Маг.С, ЦАП1 і ЦАП2. Метою налагодження є встановлення такого вихідного струму ССт, при якому відхилення напруги живлення МК будуть не більшими заданих при мінімальному значенні ємності Маг.С.

У системі [13; 14] баланс енергії у колі живлення МК можна записати як [12]

$$E_{CCT} = E_{MK} \pm \Delta E_C, \quad (2)$$

де E_{CCT} — енергія, генерована стабілізатором струму ССт; E_{MK} — енергія, спожита МК; ΔE_C — зміна енергії конденсатора С в колі живлення МК, що або відводиться з кола живлення МК (тоді енергія, накопичена конденсатором, зростає, тому її зміна E_C — має додатну полярність) або туди поступає (тоді енергія, накопичена конденсатором, спадає, тому її зміна ΔE_C має від'ємну полярність).

Енергію конденсатора С у колі живлення МК можна визначити як [12]

$$E_C = (C U_C^2) / 2, \quad (3)$$

а її зміну ΔE_C — як

$$\Delta E_C = (C \Delta U_C^2) / 2, \quad (4)$$

де U_C , ΔU_C — напруга на конденсаторі С та її зміна.

Якщо закінчити процес вимірювання середнього енергоспоживання МК у момент, коли зміна напруги на конденсаторі ΔU_C прямує до нуля, тобто коли

$$\Delta U_C \rightarrow 0, \quad (5)$$

то зміна енергії ΔE_C , накопиченої конденсатором С прямує до нуля, тобто $\Delta E_C \rightarrow 0$.

У такому випадку, відповідно до виразу (2), генерована стабілізатором струму живлення МК енергія рівна енергії, спожитої МК. А енергія E_{CCT} , генерована стабілізатором струму живлення МК може бути обчислена за формулою [12; 14]

$$E_{CCT} = U_{MK} I_{CCT} T_{MK}, \quad (6)$$

де U_{MK} — напруга живлення МК; I_{CCT} — вихідний струм стабілізатора струму ССт; T_{MK} — тривалість виконання набору інструкцій, команд, фрагментів програм або програм у цілому.

У системі рис. 1 значення U_{MK} після налаштування параметрів схеми повинні знаходитися у межах, заданих вихідними напругами ЦАП1 і ЦАП2. Це фіксується компараторами КП1 в КП2. Якщо компаратори за час поточного циклі вимірювання не спрацьовують, то очевидно, що

$$U_{DAC1} < U_{MK} < U_{DAC2}, \quad (7)$$

де U_{DAC1} , U_{DAC2} — напруги на виходах ЦАП1 і ЦАП2.

Якщо $U_{DAC1} - U_{DAC2} \rightarrow 0$, то $\Delta U_C \rightarrow 0$, тобто виконується умова (5). Однак у середині циклу вимірювання поточна напруга на Маг.С може бути суттєво вищою або нижчою за кінцеві значення (хоча і знаходиться у межах, заданих ЦАП1 і ЦАП2). Це веде до зростання похибки вимірювання E_{MK} . Для зменшення цієї похибки необхідно додати ще одну вимогу, яка повинна виконуватися у успішному циклі вимірювання

$$\int_{t=0}^T \Delta u_{MK} dt \rightarrow 0, \quad (8)$$

де $\Delta u_{MK} = \Delta u_C$ — зміна поточної напруги у колі живлення МК.

Тоді можна прийняти, що U_{MK} відповідає середньому значенню напруги спрацювання компараторів КП1 і КП2, тобто

$$U_{MK} = (U_{DAC1} + U_{DAC2}) / 2, \quad (9)$$

Струм I_{CCT} не залежить від того, чи проходить процес вимірювання чи ні. Тому цей струм може бути вимірний після вимірювання за допомогою завадостійкого інтегруючого амперметра А, який, для зменшення рівня завад нормального виду, може бути вилученим із схеми на час вимірювання енергоспоживання МК.

Тривалість виконання набору інструкцій, команд, фрагментів програм або програм у цілому T_{MK} повинна визначатися за частотою тактового генератора МК за допомогою лічильника Ліч. У такому випадку

$$T_{MK} = N_{LICH} / F_{MK}, \quad (10)$$

Таким чином, енергію, спожиту МК під час виконання набору інструкцій, команд, фрагментів програм або програм у цілому може бути згідно із (6) визначена як добуток напруги, визначеної відповідно до (9), струму, вимірюваного амперметром А та часу, визначеного відповідно до (10). Ці добутки отримуємо за допомогою перемножувачів Пер1 і Пер2. Очевидно, що Пер1 і Пер2 доцільно реалізувати програмно, так само як СПР і БК.

Як уже біло сказано, процес вимірювання у цій системі поділений на ряд циклів вимірювання, під час яких проходить налаштування параметрів ССт, Маг.С, ЦАП1 і ЦАП2 для виконання умов (5) і (8). Метою налаштування є встановлення такого вихідного струму ССт, при якому відхилення напруги живлення МК будуть не більшими заданих при мінімальному значенні ємності Маг.С.

Процесом налаштування керує підсистема прийняття рішень СПР.

Вона протягом кожного циклу вимірювання аналізує стан компараторів КП1 і КП2, що фіксують вихід напруги на МК за задані U_{DAC1} і U_{DAC2} , а після закінчення циклу вимірювання – виконання умов (5) і (8). При керуванні СПР реалізує наступні правила:

1. Якщо під час циклу вимірювання спрацювали і перший компаратор (напруга на Маг.С перевищує U_{DAC1}), і другий компаратор (напруга на Маг.С менша за U_{DAC2}), то треба збільшити ємність Маг.С.

2. Якщо напруга на Маг.С під час циклу вимірювання перевищує U_{DAC1} (спрацював перший компаратор), то, якщо умова (8) не виконується, треба зменшити струм ССт, а якщо умова (8) виконується, треба збільшити ємність Маг.С.

3. Якщо напруга на Маг.С під час циклу вимірювання буває меншою за U_{DAC2} (спрацював другий компаратор), то, якщо умова (8) не виконується, треба збільшити струм ССт, а якщо умова (8) виконується, треба зменшити ємність Маг.С.

4. Якщо під час циклу вимірювання обидва компаратори не спрацьовували (зміни напруги на Маг.С знаходяться у допустимих межах), то, якщо умова (8) не виконується, треба, при додатному значенні інтегралу, зменшити струм ССт, а при від'ємному значенні інтегралу — збільшити його.

5. Якщо під час циклу вимірювання обидва компаратори не спрацьовували (зміни напруги на Маг.С входять у допустимі межі) і якщо умова (8) виконується, треба зменшити різницю між U_{DAC1} і U_{DAC2} .

6. Якщо виконуються всі вимоги п. 4, а різниця між U_{DAC1} і U_{DAC2} вже мінімальна (її зменшення веде до ситуації, описаної у п. 1), то процес налаштування закінчено і за останнім результатом вимірювання обчислюють спожиту МК енергію за час одного циклу вимірювання.

Через використання для обчислення енергоспоживання МК результату вимірювання I_{CCT} завадостійкого інтегруючого амперметра А система вимірювання середнього енергоспоживання МК [13; 14] має доволі високу завадостійкість. Для контролю виконання умови (8) також використано аналого-цифровий перетворювач двотактного інтегрування. Але номінальна завадостійкість перетворювачів, що випускаються промисловістю, у даному випадку не реалізується через можливу невідповідність тривалості його першого такту та моменту виконання умов (5) і (8). Тому необхідно створити умови, при яких аналого-цифровий перетворювач, що входить у ВС, зможе мати високу завадостійкість.

Підвищення завадостійкості системи вимірювання середньої енергії МК

Як було вже вказано, на результат вимірювання середнього енергоспоживання МК впливає напруга, наведена зовнішніми електромагнітними полями на вхідні кола вимірювальної підсистеми ВС. Для підвищення завадостійкості у схемі рис. 1 необхідно забезпечити умови, при яких тривалість першого такту аналого-цифрового перетворювача, що входить у ВС, буде близькою

до одного або кількох періодів мережі живлення. Тоді буде виконуватися рівність [12]

$$\int_{t=0}^T \sin(u) dt \rightarrow 0, \quad (11)$$

де T — період завади, який повинен бути кратним часу вимірювання T_{MK} .

Однак час вимірювання T_{MK} визначається одночасним виконанням умов (5) і (8).

Крім того, час вимірювання T_{MK} повинен бути кратним тривалості виконання МК досліджуваного набору інструкцій, команд, фрагментів програм або програм у цілому.

Також час вимірювання T_{MK} повинен знаходитися у допустимих для аналого-цифрового перетворювача межах. Ці вимоги можна сформулювати як п'ять умов:

1. Час вимірювання T_{MK} повинен бути не менший за мінімально допустимий T_{MIN} та не більший за максимально допустимий T_{MAX} ;

2. Час вимірювання T_{MK} повинен знаходитися знаходиться у межах заданого допуску відносно періоду напруги мережі;

3. Різниця напруг ΔU_C на конденсаторі у колі живлення МК перед початком циклу вимірювання та після його закінчення повинна бути меншою за допустиме значення, тобто має виконуватися умова (5);

4. За час вимірювання T_{MK} досліджувані інструкція, команда, фрагмент програми або програма у цілому повинні виконуватися відому цілу кількість разів n ;

5. За час вимірювання T_{MK} інтеграл відхилення напруги на конденсаторі у колі живлення мікроконтролера $\int_{t=0}^T \Delta U_C$ не повинен перевищувати допустимого, тобто має виконуватися умова (8).

Усі перелічені умови обов'язково необхідно виконати одночасно. Інакше похибка вимірювання середнього енергоспоживання МК значно зростає. Можливість одночасного виконання перших чотирьох умов ілюструє рис. 2.

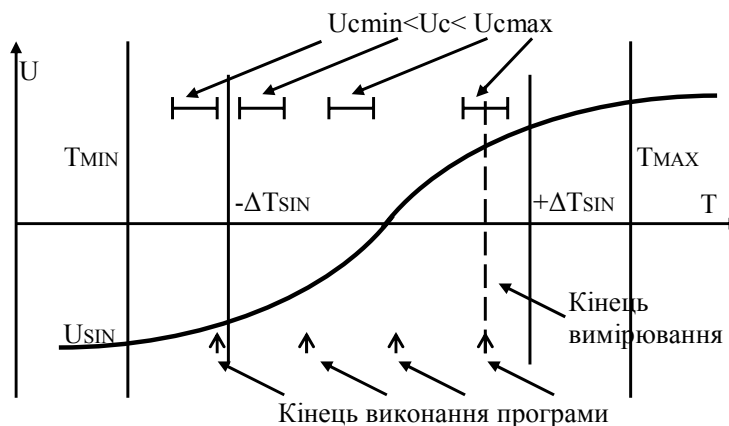


Рис. 2. Виконання умов забезпечення високої завадостійкості вимірювання середнього енергоспоживання МК

Початок виконання вимірювання синхронізовано з переходом поданого на рис. 2 фрагмента синусоїди U_{SIN} через нуль (на рис. 2 цей момент не показаний).

Межі часу вимірювання (вимога 1) позначено вертикальними прямими T_{MIN} і T_{MAX} . Межі часу вимірювання також уточнено вертикальними прямими $-\Delta T_{SIN}$ та $+\Delta T_{SIN}$, що відповідає виконанню вимоги 2. Інтервалам, під час яких виконується вимога 3 (спрацював компаратор КП2, а КП1 не спрацював), відповідають відрізки $U_{C_{MIN}} < U_C < U_{C_{MAX}}$. Моменти, при яких виконується вимога 4 (закінчення виконання набору досліджуваних інструкцій, команд, фрагментів програми або програми у цілому) на рис. 2 по-

значено короткими вертикальними стрілками. При цьому можна вибрати два режими: (i) виконання заданої кількості наборів досліджуваних інструкцій; (ii) режим обліку n , що відповідає одночасному виконанню деякої цілої кількості наборів досліджуваних інструкцій. Другий варіант гнучкіший. Тому вибраний саме він. Момент одночасного виконання чотирьох умов позначений на рис. 2 вертикальною штриховою лінією. Він відповідає команді «Кінець вимірювання» (див. рис. 1).

Виконання п'ятої умови у реальному часі перевірити неможливо. Про її виконання у даному циклі вимірювання ВС повідомляє СПР лише після закінчення другого такту інтегрування свого аналого-цифрового перетворювача.

Якщо всі п'ять умов виконані, то результат вимірювання $E_{МК}$ є коректним. Зокрема, він отриманий за час, що відхиляється від періоду завади на задану допустиму величину. Тому дія наведеної на коло живлення МК завади знаходиться у допустимих межах. Таким чином, можна адаптувати завадостійкість системи до умов її експлуатації. Хоча, слід зауважити, що більшість із п'яти поданих умов є суперечливою. Тому їх одночасне виконання у кожному циклі вимірювань малоймовірне. Для забезпечення виконання всіх умов необхідно повторити вимірювання декілька разів. Якщо одночасного співпадання умов не вдалося досягнути, то необхідно пере-

глянути допустимі відхилення при виконанні всіх умов.

Апаратні засоби забезпечення завадостійкості вимірювання середньої енергії МК

Для реалізації описаного методу необхідно забезпечити синхронність початку кожного циклу вимірювання з переходом синусоїди через нуль та кінець кожного циклу вимірювання при одночасному виконанні перелічених вище п'яти умов (див. рис. 2).

Структура вузла запуску кожного циклу вимірювання подана на рис. 3. Він складається із тригера Тг1, трьох формувачів імпульсів Ф1...Ф3, подільника частоти ПЧ та першої схеми І.

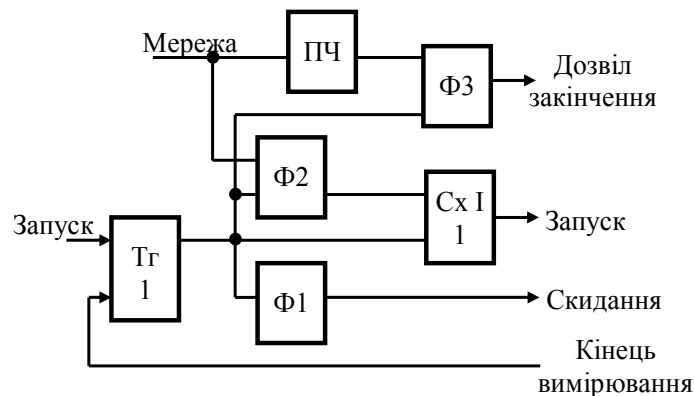


Рис. 3. Структура вузла запуску кожного циклу вимірювання

Після надходження імпульсу «Запуск» перекидається тригер Тг1 даючи дозвіл спрацювання Ф1...Ф3. Формувач Ф1 за фронтом перекидання Тг1 формує імпульс «Скидання» всіх тригерів, лічильників і подільника частоти ПЧ, які входять у систему. Формувач Ф2 формує імпульси у момент переходу мережі живлення через нуль.

Перша схема І відповідно до дозволу Тг1, подає на БК (див. рис. 1) імпульси «Запуск», синхронні з переходом мережі живлення через нуль. Формувач Ф3 (рис. 3) формує імпульс «Дозвіл закінчення», фронти якого відповідають вертикальним прямим $-T_{SIN}$ та $+T_{SIN}$ (див. рис. 2). Затримка формування імпульсів формувачем Ф3 (рис. 3) відносно імпульсів «Запуск» задається подільником частоти ПЧ, який задає кількість періодів синусоїди напруги мережі, що відповідає мінімально допустимій тривалості циклу вимірювання T_{MIN} (див. рис. 2). Подільник частоти ПЧ також блокує формування імпульсу «Скидання» до закінчення циклу вимірювання, якщо задана тривалість циклу перевищує один період синусоїди напруги мережі живлення.

Слід відзначити, що поданий на рис. 3 вузол запуску кожного циклу вимірювання дає змогу виконати лише другу умову із п'яти, перелічених

вище. Тому у систему вимірювання середнього енергоспоживання МК (див. рис. 1) для забезпечення синхронності кінця кожного циклу вимірювання з переходом синусоїди напруги мережі живлення через нуль (див. рис. 2) введено вузол закінчення вимірювання, структура якого подана на рис. 4.

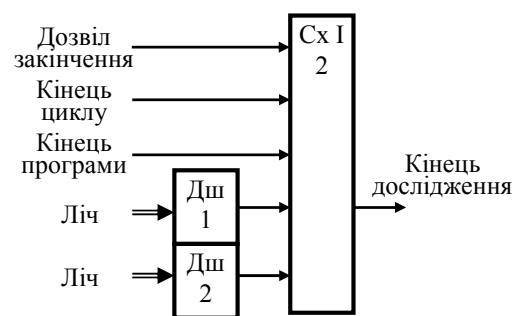


Рис. 4. Структура вузла закінчення вимірювання

У цю схему входять два дешифратори Дш1 і Дш2, а також друга схема І. Дешифратор Дш1 задає мінімально допустиму тривалість циклу вимірювання T_{MIN} , а дешифратор Дш2 – максимально допустиму T_{MAX} (див. рис. 2). На входи Дш1 і Дш2 (рис. 4) поступає поточне значення коду лічильника Ліч (див. рис. 1).

Тобто робота системи вимірювання середнього енергоспоживання МК синхронізована з тактовим генератором МК, що забезпечує відсутність збоїв через неспівпадання моментів закінчення виконання програми та роботи системи. Виходи Дш1 і Дш2 (див. рис. 2) формують дозвіл закінчення циклу вимірювання відповідно до першої умови із п'яти, перелічених вище. На інші входи другої схеми І поступають сигнали:

– «Дозвіл закінчення» із формувача ФЗ (див. рис. 3), який забезпечує виконання другої умови;

– «Кінець циклу» із блоку керування БК (див. рис. 1), який забезпечує виконання третьої та п'ятої умови;

«Кінець програми» із досліджуваного МК (див. рис. 1), який забезпечує виконання четвертої умови. Вузол закінчення вимірювання (точніше друга схема І) формує сигнал «Кінець дослідження», який повертає перший тригер Тг1 (див. рис. 3) у початковий стан. Тоді Тг1 забороняє проведення подальших циклів вимірювання. Одночасно на виході другого перемножувача Пер2 (див. рис. 1) отримуємо значення спожитої МК енергії при виконанні ним досліджуваних інструкцій, команд, набору команд, програм та їх фрагментів.

Висновки

Запропонована система вимірювання середнього енергоспоживання МК має високу точність та, за рахунок використання запропонованих заходів, високу завадостійкість. Проведені імітаційні дослідження показали, що при відхиленнях допустимого періоду завади від мережі живлення $|T_{\text{SIN}}| \leq 0,4 \text{ms}$ (тобто $\pm 2\%$ від періоду напруги мережі живлення), вплив завад амплітудою до 60 мВ викличе похибку вимірювання енергоспоживання МК не більше 0,012%. Така похибка від дії завад цілком прийнятна навіть для дуже точних вимірювань енергоспоживання МК і дозволяє однозначно вирішувати питання про перевагу за енергоспоживанням одних досліджуваних інструкцій, команд, набору команд, програм та їх фрагментів над іншими.

Це дає змогу оптимізувати програмне забезпечення МК щодо споживання енергії. Тим самим можна продовжити час автономної роботи пристроїв при їх живленні від батареї або акумуляторів без відновлення їх заряду.

Також перспективним є використання запропонованої системи при оцінці ефективності нестандартних апаратних рішень. Наприклад, при оцінці економії енергоспоживання нових методів

виявлення помилок у цифрових пристроях. При екстремальних умовах, зокрема, при критично низькій напрузі живлення, дослідження таких схем традиційними методами викликає значні труднощі через збої, викликані порушенням нормальних умов експлуатації апаратних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Al-Daajeh, S. H.**, Al-Qutaish, R. E., & Al-Qireem, F. (2011). Engineering dependability to embedded systems software via tactics. *International Journal of Software Engineering and its Applications*. 5(4), 45–62.
2. **Joshi, A.** (2012). *Embedded Systems: Technologies and Markets*. BCC Research.
3. **Macci, E.** (2004). *Ultra low-power electronics and design*. Kluwer Academic.
4. **Dorf, R. C.** (2017). *Systems, controls, embedded systems, energy, and machines*. CRC press.
5. **Gamatie, A.**, Delaval, H. Y., & Rutten, E. (2009). A Case Study on Controller Synthesis for Data-Intensive Embedded Systems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Embedded Software and Systems, (ICCESS'09)* (Pp. 75–82). Hangzhou, China. doi:10.1109/ICCESS.2009.12
6. **Tiwari, V.**, Malik, S., & Wolfe, A. (1994). Power analysis of embedded software: a first step towards software power minimization. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2(4) Pp. 437–445.
7. **Tiwari, V.**, Malik, S., Wolfe, A., & Lee, M. T. C. (1996). Instruction level power analysis and optimization of software. In *Technologies for wireless computing* (Pp. 139–154). Springer.
8. **Lee, M. T. C.**, Tiwari, V., Malik, S., & Fujita, M. (1995, September). Power analysis and low-power scheduling techniques for embedded DSP software. In *Proceedings of the 8th international symposium on System synthesis* (Pp. 110–115).
9. **Konstantakos, V.**, Kosmatopoulos, K., Nikolaidis, S. & Laopoulos, T. In-Chip Configuration for Monitoring Power Consumption in Micro-processing Systems. In *Proceedings of the Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems: Technology and Application (IDAACS'2005)*, (pp. 156-161). Sofia, Bulgaria. doi: 10.1109/IDAACS.2005.282962.
10. **Боровий, А.**, Майків, І., Кочан, Р., Домбровський, З. & Кочан, В. (2008). Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів. *Патент України № 90922*
11. **Боровий, А.** (2012). *Інформаційно-вимірювальна система дослідження параметрів енергоспоживання мікропроцесорів*. (Дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, ТНЕУ) Тернопіль.

12. Кухлінг, Х., & Лейкин, Е. М. (1982). *Справочник по физике*. Мир.

13. Осолінський, О., Кочан, В., Домбровський, З. & Кочан, О. (2015). Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації. *Патент України 110142*.

14. Kochan, V., Kochan, O., Osolinskiy, O. (2013). Method of Microprocessors Average Energy Consumption measurements. In *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (pp. 94-98), Berlin, Germany. doi: 10.1109/IDAACS.2013.6662647.

Кочан В. В.

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СЕРЕДЬОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Робота присвячена розробленню системи вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів і мікропроцесорів (надалі МК) при виконанні інструкцій, команд, набору команд, програм та їх фрагментів. Ця система базується на відомій системі вимірювання миттєвого і середнього енергоспоживання МК, яка забезпечує роботу МК у нормальному (штатному) режимі за рахунок наявності у колі його живлення конденсатора і живлення МК від джерела струму. Це дає змогу обчислювати споживання струму МК за першим законом Кірхгофа. А за змінами напруги на конденсаторі у колі живлення МК можна оцінити баланс енергії у колі живлення МК і його енергоспоживання. Але похибка вимірювання описаною системою зростає при дії завад нормального виду від мережі живлення 220 В. Тому метою статті є вдосконалення описаної системи за рахунок синхронізації початку процесу вимірювання із переходом через нуль синусоїди напруги мережі (джерела завад) і закінченні процесу вимірювання при виконанні умов не перевищення змін напруги на конденсаторі у колі живлення МК та її інтегралу допустимих значень, відповідності тривалості першого такту аналого-цифрового перетворювача системи налаштування струму живлення МК у межах допустимого відхилення від поточного періоду напруги мережі та виконанні МК цілого числа досліджуваних інструкцій, команд, набору команд, програм та їх фрагментів. Виконання цих вимог забезпечує високу точність вимірювання середнього енергоспоживання в умовах дії завад нормального виду від напруги мережі живлення. У статті подано також схематичні рішення, які забезпечують виконання вказаних вимог. Результати дослідження енергоспоживання МК розробленою системою, через її високу точність і завадостійкість, дають змогу оптимізувати програмне забезпечення МК за енергоспоживанням і, тим самим, продовжити термін роботи пристроїв з автономним живленням без відновлення заряду акумуляторів.

Ключові слова: вимірювання; мікроконтролер; енергоспоживання; конденсатор; завади; мережа; завадостійкість; синхронізація.

Kochan V. V.

METHOD OF ENSURING NOISE RESISTANCE for MEASUREMENT OF MICROCONTROLLERS MEDIUM ENERGY CONSUMPTION

The paper considers the development of a system for measuring average power consumption of the microcontroller and microprocessor (hereinafter MC) during execution of instructions, commands, a set of commands, programs and their fragments. This system is based on the known system for measuring the instantaneous and average energy consumption of the MC, which ensures the operation of the MC in the normal operation mode with the presence of the capacitor in the power supply leg as well as the powering the MC from the current source. This allows calculating the current consumption of the MC using Kirchhoff's current law. Changes of the voltage across the capacitor in the power supply leg of the MC allow estimating the energy balance in the supply leg and energy consumption by the MC. However, the measurement error of the described system increases due to normal-mode noise induced by 220 V power network. The goal of the paper is to improve the described system by synchronizing the measurement process with zero crossing of the sinusoidal network voltage on conditions that both the voltage changes across the capacitor and their integral do not exceed the permissible levels. It is also necessary not to exceed the minimum and maximum durations of the measurement cycle as well as the deviation from the zero crossing for voltage of the power network. These conditions ensure high accuracy of measurements of average power consumption under influence of normal mode noise induced by the power supply network. The paper also presents the circuits that fulfill these conditions. The results of the study of the power consumption of the MC by the developed system, due to its high accuracy and noise immunity, allows optimizing the software of the MC for power consumption and, thus, extend the lifespan of autonomous devices without recharging the batteries.

Keywords: Instrumentation; microcontroller; energy consumption; capacitor; noise; network; noise resection; synchronization.

Кочан В. В.

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Работа посвящена разработке системы измерения среднего энергопотребления микроконтроллеров и микропроцессоров (далее МК) при выполнении инструкций, команд, набора команд, программ и их фрагментов. Эта система базируется на известной системе измерения мгновенного и среднего энергопотребления МК, которая обеспечивает работу МК в нормальном (штатном) режиме за счет наличия в цепи его питания конденсатора и питания МК от источника тока. Это дает возможность вычислить потребления тока МК за первым законом Кирхгофа. А за изменениями напряжения на конденсаторе в цепи питания МК можно оценить баланс энергии в цепи питания МК и его энергопотребления. Но погрешность измерения описанной системой возрастает при действии помех нормального вида от сети питания 220 В. Поэтому целью статьи является совершенствование описанной системы за счет синхронизации начала процесса измерения с переходом через нуль синусоиды напряжения сети (источника помех) и окончания процесса измерения при выполнении условий не превышения изменения напряжением на конденсаторе в цепи питания МК и ее интегралом допустимых значений, соответствия длительности первого такта аналого-цифрового преобразователя системы настройки тока питания МК в пределах допустимого отклонения от текущего периода напряжения сети и выполнения МК целого количества исследуемых инструкций, команд, набора команд, программ и их фрагментов. Выполнение этих требований обеспечивает высокую точность измерения среднего энергопотребления в условиях действия помех нормального вида от напряжения сети питания. В статье представлены также схемотехнические решения, обеспечивающие выполнение указанных требований. Результаты исследования энергопотребления МК разработанной системой, из-за ее высокой точности и помехоустойчивости, дают возможность оптимизировать программное обеспечение МК за энергопотреблением и, тем самым, продлить срок работы устройств с автономным питанием без восстановления заряда аккумуляторов.

Ключевые слова: измерение; микроконтроллер; энергопотребление; конденсатор; помехи; сеть; помехоустойчивость; синхронизация.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2020 р.
Прийнято до друку 23.09.2020 р.