

ВДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

В статті розглянуто вдосконалену систему вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів (або мікропроцесорів) під час виконання інструкцій, програм або їх фрагментів. Система забезпечує високу точність і завадостійкість. Її перевагою є те, що значення середнього енергоспоживання мікроконтролерів розраховується як добуток значень результатів вимірювань, проведених прецизійними засобами вимірювання постійної напруги та струму.

Ключові слова: Мікроконтролер, вимірювання енергоспоживання.

O.R. OSOLINSKIY

Ternopil National Economic University

ADVANCED SYSTEM MEASURING ENERGY CONSUMPTION OF MICROCONTROLLERS

The work shows advanced system for measuring average power consumption microcontroller (or microprocessor) during the implementation instructions, programs or their fragments. The system provides high accuracy and noise stability. Its advantage is that the value of the average power consumption microcontrollers calculated by multiplying the values of measurement results conducted by means of precision measuring DC voltage and current.

Keywords: Microcontroller, energy consumption.

Постановка задачі

Вбудовані комп'ютерні системи з автономним живленням використовуються щоразу ширше. Однією з актуальних задач при розробленні таких систем є збільшення часу роботи без відновлення заряду акумуляторів. Це вимагає оптимізації як апаратного, так і програмного забезпечення. Для оптимізації програмного забезпечення необхідно достатньо точно вимірювати енергоспоживання обчислювальних засобів при виконанні команд, інструкцій, фрагментів програм та програм в цілому. Через те, що характер енергоспоживання сучасних мікроконтролерів та мікропроцесорів (в подальшому МК) носить характер піків, прив'язаних о фронтів імпульсів тактового генератора [1, 2], вимірювання як миттєвої, так і середньої споживаної енергії є складною задачею.

В [1, 2] проведено аналіз методів та засобів вимірювання як миттєвого, так і середнього енергоспоживання МК і показано, що при вимірюванні миттєвого енергоспоживання найвищу точність забезпечує схема [3]. Однак у [2, 4] показано, що вона, по-перше, має відносно низьку завадостійкість (електромагнітні завади від електричної мережі впливають на результат вимірювання), а, по-друге, при вимірюванні енергоспоживання фрагментів програм та програм в цілому схемі [3] властиве накопичення похибки. Тому, як запропоновано у [2, 4], результати дослідження енергоспоживання МК при виконанні окремих інструкцій та команд за допомогою схеми [3] слід контролювати шляхом їх порівняння з результатами вимірювання середнього енергоспоживання, наприклад, за допомогою системи, описаної у [2, 4]. Додатковою перевагою системи, описаної у [2, 4], є те, що її структура близька до схеми пристрою, описаного у [3]. Це дозволяє без застережень порівнювати отримані результати вимірювань миттєвого і середнього енергоспоживання – адже схема живлення МК та елементи, що суттєво впливають на похибки вимірювання обох видів енергоспоживання, залишаються тими ж самими.

Запропонований в [4] метод вимірювання середнього енергоспоживання МК зберігає переваги запропонованого у [3] методу вимірювання миттєвого енергоспоживання МК:

Нормальний режим роботи МК – він заземлений і в колі його живлення є конденсатор.

Через те, що МК живиться від джерела струму, баланс струму в колі живлення строго описується першим законом Кірхгофа.

Однак система, описана у [2, 4], значно складніша, за пристрій, описаний у [3]. В її склад входить система вимірювання інтегралу спаду напруги на струмовідвідному резисторі, що захищає МК від перевищення допустимої напруги на ньому під час малого енергоспоживання.

Метою статті є розроблення системи вимірювання середнього енергоспоживання МК, що базується на структурах, які описані у [2 - 4], і зберігає їх переваги, але дає змогу розрахувати середнє енергоспоживання МК лише за результатами вимірювань, проведених прецизійними засобами вимірювання постійної напруги та струму.

Обґрунтування запропонованого методу вимірювання

Узагальнена структурна схема системи, що реалізує запропонований у [4] та описаний у [2] метод, подана на рис. 1. Основна ідея методу полягає в тому, що, якщо живити досліджуваний МК від джерела струму (а не традиційно, від джерела напруги), то суму струмів у вузлі, куди приєднані стабілізатор струму, МК, конденсатор С в колі його живлення та захисний еквівалент стабілітрона (на базі операційного підсилювача) можна записати строго відповідно до першого закону Кірхгофа. При цьому баланс генерованої

та спожитої енергії можна записати наступним чином

$$E_{REFI} = E_{MK} + E_C + E_{ST} + E_{VYM}, \quad (1)$$

де E_{REFI} – енергія стабілізатора струму (генерована, поступає у вузол); E_{MK} – енергія МК (спожита, виходить з вузла); E_C – енергія конденсатора (спожита, виходить з вузла, коли напруга на конденсаторі росте і повернута, поступає у вузол, коли напруга на конденсаторі падає); E_{ST} – енергія, відведена через еквівалент стабілітрона під час захисту МК при перевищенні напруги в колі живлення (на конденсаторі) допустимого значення (спожита, виходить з вузла); E_{VYM} – енергія, спожита вимірними колами, мала порівняно з переліченими, нею можна нехтувати.

Відповідним підбором ємності конденсатора в колі живлення МК можна добитися, що максимальні відхилення його напруги живлення будуть настільки малі (не більше 0,5-1%), що не спотворюють енергоспоживання МК.

При реалізації запропонованого у [4] методу спочатку, за допомогою підсистеми регулювання ПСР, налаштовують струм стабілізатора струму I_{REF} таким чином, щоби інтеграл відхилення напруги на МК від початкового значення (що задається джерелом опорної напруги U_{REF}) за час вимірювання T_{VYM} прямував

до нуля, тобто $\int_0^T (U_i - U_{REF}) dt \rightarrow 0$. Тоді зміна енергії, накопиченої конденсатором, буде прямувати до

нуля, тобто $\Delta E_C \rightarrow 0$. Таким чином, конденсатор, створюючи штатні умови роботи МК, практично не змінює баланс енергії генерування-споживання (використовуються керамічні конденсатори, що мають малі струми витоку та інші втрати). Тобто енергію E_C можна виключити з (1) і переписати (1) як

$$E_{MK} = E_{REFI} - E_R, \quad (2)$$

В свою чергу енергія E_{REFI} , генерована джерелом струму I_{REF} , не залежить від енергії споживання МК. Вона може бути визначена як

$$E_{REFI} = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T_{VYM}, \quad (3)$$

Якщо МК деякий час споживає мало енергії (виконується набір команд, кожна з яких вимагає відносно мало енергії), напруга на конденсаторі C може зрости вище допустимої для цього МК. Тоді еквівалент стабілітрона спрацьовує та „відводить” надлишковий струм з вузла живлення МК. Цю „відведену” надлишкову енергію при реалізації методу, запропонованого у [4], враховують шляхом контролю струму через еквівалент стабілітрона. Для цього послідовно з еквівалентом стабілітрона увімкнено резистор R (шунт), спад напруги на якому вимірюється вимірною підсистемою ВПС. Через те, що струм через еквівалент стабілітрона протікає не постійно, а тільки коли напруга на МК перевищує допустиму, при реалізації методу, запропонованого у [4], необхідно інтегрувати цю енергію за час вимірювання енергоспоживання.

Однак, якщо так підібрати ємність конденсатора C та струм стабілізатора струму I_{REF} , що будуть виконуватися наступні вимоги:

1. напруга на конденсаторі C під час вимірювання енергоспоживання МК буде постійно наближатися до напруги джерела опорної напруги U_{REF} ;
 2. напруга на конденсаторі C під час вимірювання енергоспоживання МК буде постійно нижчою за напругу спрацювання еквівалента стабілітрона;
 3. зміна напруги на конденсаторі C під час вимірювання енергоспоживання МК буде настільки малою (не більше 0,5-1%), що не буде спотворювати енергоспоживання МК;
- то враховувати енергію, яку „відводить” еквівалент стабілітрона не потрібно (вона рівна нулю). В такому випадку (2) можна переписати як

$$E_{MK} = E_{REFI}, \quad (4)$$

і обчислювати спожиту МК енергію згідно (3).

Слід відзначити, що наперед підібрати ємність конденсатора C та струм стабілізатора струму I_{REF} так, щоби виконувалися всі три перелічені вище умови, практично неможливо. Слід врахувати також те, що високочастотний конденсатор C , для виконання вимоги п. 3, повинен мати доволі значну ємність (0,1 – 1 мкФ). Це вимагає використання керамічних конденсаторів на основі титанату барію, які мають відносно великий температурний коефіцієнт. Тому необхідно забезпечити автоматизований підбір ємності конденсатора C в процесі вимірювання енергоспоживання МК.

Структурна схема вдосконаленої системи

Структурна схема вдосконаленої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК подана

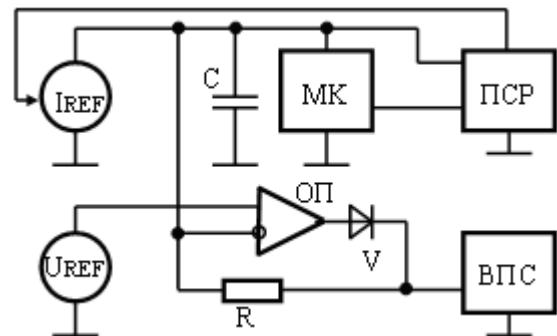


Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

на рис. 2. В її склад входять стабілізатор струму СтС, система регулювання його струму СР, прецизійний амперметр постійного струму А, керований магазин ємності Маг.С, досліджуваний МК, стабілізатор опорної напруги СтН, два цифро-аналогових перетворювачі ЦАП1 і ЦАП2, два компаратори напруги КП1 і КП2 та пристрій керування, в склад якого входять два послідовно ввімкнуті перемножувачі Х1 і Х2, блок визначення середнього значення вхідних кодів цифро-аналогових перетворювачів U_c та лічильник ЛЧ часу виконання досліджуваної інструкції, команди або програми.

Пристрій працює наступним чином. Перед початком експерименту (перед ввімкненням) ємність магазину Маг.С встановлюють максимальною (щоби надлишковий струм СтС не міг зарядити Маг.С до напруги, небезпечної для МК) а струм СтС встановлюють мінімальним. Також межі спрацювання компараторів КП1 і КП2 встановлюють максимальними (шляхом задання відповідних кодів на входах ЦАП1 і ЦАП2).

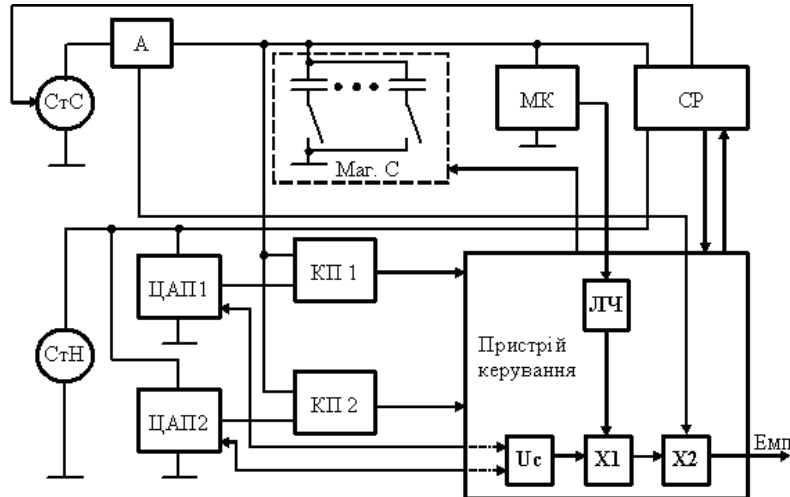


Рис. 2. Структурна схема вдосконаленої системи вимірювання середнього енергоспоживання МК

В пам'ять МК записують підпрограму його самоналаштування (встановлення потрібного режиму роботи своїх вузлів) та послідовність команд, середнє енергоспоживання яких досліджують (це може бути як багатократно повторена одна з команд, так і досліджувана програма або її фрагмент). Перед початком виконання досліджуваної команди (програми), МК посилає регулюючій та вимірювальній системі код старту дослідження. Система регулювання починає інтегрувати відхилення напруги живлення МК від напруги СтН (остання рівна номінальній напрузі живлення МК). Після виконання записаних в пам'ять МК команд (програми) на пристрій керування поступає сигнал закінчення дослідження. Лічильник ЛЧ визначає час виконання програми і перемножувачі Х1 і Х2, згідно (7), визначають енергію, спожиту МК.

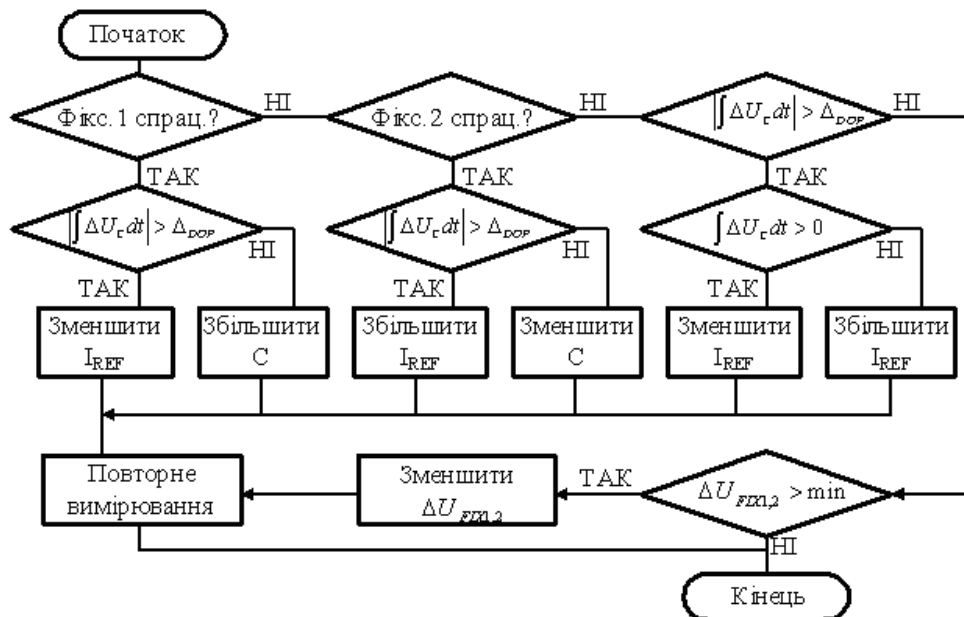


Рис. 3. Алгоритм ітераційного процесу автоматизованого підбору ємності конденсатора С в процесі вимірювання енергоспоживання МК

В процесі налаштування пристрій керування змінює струм СтС та ємність магазину Маг.С згідно алгоритму, поданого на рис. 3. Спочатку пристрій керування аналізує стан першого компаратора, що фіксує

перевищення напругою на МК верхнього допустимого значення. Якщо КП1 спрацював, то пристрій керування опитує систему регулювання. Якщо інтеграл відхилення напруги на МК за час вимірювання перевищує допустиму зміну, то необхідно зменшити струм стабілізатора струму живлення МК (формований стабілізатором струм надто великий, що і викликало перевищення напругою на МК верхнього допустимого значення). Якщо інтеграл відхилення напруги на МК за час вимірювання не показав її зростання, то причиною спрацювання КП1 не є струм стабілізатора струму, а ємність магазину ємності $Mag.C$, її необхідно збільшити, щоби зміни напруги живлення від коливання струму споживання МК стали менші.

Якщо КП1 не спрацював, проводиться аналогічний аналіз спрацювання КП2. Однак в цьому випадку рішення приймаються протилежні, адже КП2 фіксує вихід напругою на МК за нижнє допустиме значення.

Далі аналізується перевищення допустимого значення інтегралом відхилення напруги на МК за час вимірювання. Якщо допустиме значення перевищене та інтеграл зріс, то струм стабілізатора струму живлення МК необхідно зменшити, якщо інтеграл зменшився – то струм слід збільшити.

Якщо перелічені перевірки не ствердили вихід напруги на МК та інтегралу її зміни за допустимі межі, то алгоритм передбачає зменшення допустимого рівня відхилення напруги на МК, що фіксуються компараторами КП1 і КП2. Для цього пристрій керування зменшує різницю напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2. Далі описаний процес налаштування схеми повторюється до того часу, доки допустимий рівень відхилення напруги на МК від напруги StH та зміни напруги на МК за час вимірювання не стане настільки малим, що не впливатиме на результат вимірювання енергії. Тоді ітераційний процес автоматизованого підбору ємності конденсатора C закінчується.

Пристрій керування обчислює значення спожитої МК енергії згідно (3). Для цього він використовує середнє значення вихідних напруг ЦАП1 і ЦАП2. Це середнє значення повинно бути рівне вихідній напрузі стабілізатора StH (при виконанні алгоритму рис. 3 зменшення різниці напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2 повинно проводитися симетрично до напруги StH). Але в деяких випадках, в процесі ітераційного зменшення різниці напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2, може виникнути несиметричність зміни напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2. Хоча ця несиметричність не перевищує одиниці молодшого розряду, використання при обчисленні, згідно (3), спожитої МК енергії середнього значення напруг на виходах ЦАП1 і ЦАП2 забезпечує вищу точність, ніж використання номінальної напруги живлення МК (яка рівна напрузі StH). Струм IREF стабілізатора струму StC вимірюється прецизійним амперметром A після закінчення процесу вимірювання (щоби зменшити вплив імпульсного характеру споживання МК на результат вимірювання). Час вимірювання T_{VYM} визначається за частотою тактового генератора МК та кількістю тактових імпульсів, що поступили на лічильник ЛЧ за час виконання заданої кількості інструкцій, команд або програми. Таким чином, всі співмножники, що входять у (3), відомі з високою точністю – вони можуть бути виміряні на постійному струмі за допомогою прецизійних вимірювальних приладів. Час вимірювання T_{VYM} визначається за частотою кварцового генератора, яку також можна виміряти прецизійним частотоміром.

Висока завадостійкість результатів вимірювань, як і в системі, описаній у [2, 4], визначається вибором часу вимірювання T_{VYM} , по-перше, достатньо великим, і, по-друге, кратним періоду мережі живлення.

Слід відзначити, що вдосконаленій системі вимірювання середнього енергоспоживання МК, як і системі, описаній у [2, 4], притаманна методична похибка, пов'язана з припущенням: коли після виконання

налаштування $\int_0^T (U_i - U_{REF}) dt \rightarrow 0$, то можна вважати, що $\int_0^T u_i \cdot i_i \cdot dt = U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T_{VYM}$.

Остання рівність безумовно має місце, коли МК був би лінійним споживачем енергії (його еквівалентний опір не залежав би від споживаного струму або напруги живлення). Однак, напівпровідникові елементи, з яких складається МК, є нелінійними елементами, в зв'язку з чим і виникає згадана методична похибка. Але її значення, оцінене у [2], буде досить малим. Допустимі межі зміни напруги на досліджуваному МК вибирають таким чином, щоби зміни напруги на ньому під час вимірювання не перевищували $\pm 1\%$. Тоді, згідно [2], методична похибка не буде перевищувати $0,02\%$.

Висновки і плани подальших досліджень

Розроблена система вимірювання енергоспоживання МК дозволяє виміряти середню споживану ними енергію з високою точністю. Разом із системою, описаною в [1] вона дозволяє надійно вимірювати енергію виконання окремих інструкцій. Самостійно вона дає змогу досить точно вимірювати енергію, спожиту при виконанні програм у цілому або їх фрагментів. Як було показано вище, система, за рахунок самоналаштування в процесі вимірювання, забезпечує високу точність результатів вимірювання енергоспоживання МК.

За рахунок вибору часу вимірювання, кратного періоду мережі живлення, система має високу завадостійкість.

В подальшому необхідно буде більш детально оцінити залежності методичної похибки від характеру енергоспоживання МК та амплітуди зміни напруги під час вимірювання спожитої енергії. Також треба буде дослідити завадостійкість як системи, описаної у [2, 4], так і запропонованої у даній статті.

Література

1. Боровий А.М. Інформаційно-вимірювальна система дослідження параметрів енергоспоживання мікропроцесорів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.05 - комп'ютерні системи та компоненти // Андрій Модестович Боровий. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – 266 С.
2. Осолінський О.Р. Система вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів / О.Р. Осолінський, В.В. Кочан, П.Є. Биковий, М.І. Чирка // Міжнародний науково-технічний журнал Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах - Хмельницький, 2014. №4 (49). –С. 109-113.
3. Патент 90922 України, МПК7 G05F 5/00, G01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів / А. М. Боровий, І. М. Майків, Р. В. Кочан, З. І. Домбровський, В. В. Кочан; заявник і патентовласник А. М. Боровий, І. М. Майків, Р. В. Кочан, З. І. Домбровський, В. В. Кочан — № а2008 06325; заявл. 13.05.08; опубл. 10.06.10, Бюл. №11. — 4 с.: іл.
4. Спосіб вимірювання середньої енергії імпульсного споживача та пристрій для його реалізації: Заявка: № а201403292 Україна: G01R 5/00; заявники Осолінський Олександр Романович, Кочан Володимир Володимирович, Домбровський Збішек Іванович, Кочан Орест Володимирович; заявл. 31.03.2014

References

1. Borovyi A.M. Informatsiino-vymiriuvalna systema doslidzhennia parametriv enerhospozhyvannia mikroprotsesoriv: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.13.05 - kompiuterni systemy ta komponenty // Andrii Modestovych Borovyi. – Ternopil : TNEU, 2012. – 266 S.
2. Osolinskyi O.R. Systema vymiriuvannia enerhospozhyvannia mikrokontroleriv / O.R. Osolinskyi, V.V. Kochan, P.Ie. Bykovyi, M.I. Chyrka // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal Vymiriuvalna ta Obchysliuvalna Tekhnika v Tekhnolohichnykh Protsesakh - Khmelnytskyi, 2014. №4 (49). –S. 109-113.
3. Patent 90922 Ukrainy, MPK7 G05F 5/00, G01K 17/00. Prystrij vymiriuvannia enerhii impulsnykh spozhyvachiv / A. M. Borovyi, I. M. Maikiv, R. V. Kochan, Z. I. Dombrovskiy, V. V. Kochan; zaiavnyk i patentovlasnyk A. M. Borovyi, I. M. Maikiv, R. V. Kochan, Z. I. Dombrovskiy, V. V. Kochan — № а2008 06325; zaiavl. 13.05.08; opubl. 10.06.10, Biul. №11. — 4 s.: il.
4. Sposib vymiriuvannia serednoi enerhii impulsnoho spozhyvacha ta prystrii dlia yoho realizatsii: Zaiavka: № а201403292 Ukraina: G01R 5/00; zaiavnyky Osolinskyi Oleksandr Romanovych, Kochan Volodymyr Volodymyrovych, Dombrovskiy Zbyshek Ivanovych, Kochan Orest Volodymyrovych; zaiavl. 31.03.2014

Рецензія/Peer review : 12.9.2015 р.

Надрукована/Printed :27.10.2015 р.