

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

В статті розглянуто новий метод вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів під час виконання інструкцій, програм або їх фрагментів, який забезпечує високу точність і завадостійкість, а також малу похибку порівняння результатів вимірювання з відомим методом вимірювання миттєвої потужності споживання мікроконтролерів.

Ключові слова: Мікроконтролер, вимірювання енергоспоживання.

OLEKSANDR OSOLINSKIY, VOLODYMYR KOCHAN, PAVLO BYKOVYY, MYKHAYLO CHYRKA
Ternopil National Economic University

MEASUREMENT SYSTEM FOR ENERGY CONSUMPTION OF MICROCONTROLLERS

The work shows a new method of measuring the average power consumption microcontroller during execution of instructions, programs, or fragments thereof, which provides high accuracy and noise immunity and low error comparison of measurement results with the known method of measuring the instantaneous power consumption microcontrollers.

Keywords: Microcontroller, energy consumption.

ВСТУП

У ряді галузей народного господарства – зв'язку, медицині, авіації, автомобіле- та кораблебудуванні тощо все ширше використовуються вбудовані комп'ютерні системи з автономним живленням. Зазвичай, такі системи будуються на базі мікроконтролерів, які забезпечують максимальний набір методів економії заряду батарей або акумуляторів. Однією з актуальних задач розробки таких систем є збільшення часу роботи без відновлення заряду акумуляторів, що вимагає відповідної оптимізації.

ІСНУЮЧІ МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ СПОЖИВАЧІВ

Відповідно до [1, 2], існують три основні шляхи вирішення задачі збільшення часу роботи систем в автономному режимі: (i) збільшення енергоємності джерел живлення; (ii) вдосконалення технології виготовлення мікросхем; (iii) оптимізація програмного забезпечення за енергоспоживанням. Кожен з них має свої переваги і недоліки. Однак, якщо перші два шляхи вимагають фундаментальних досліджень, то третьому шляху їх не потрібно.

Слід відзначити, що складність вимірювання енергоспоживання таких імпульсних пристроїв, як мікропроцесори та мікроконтролери, визначається характером споживання ними струму. На рис. 1 подано типову осцилограму струму виконаного за КМОН технологією мікроконтролера під час виконання інструкцій (машинних кодів). Як видно, піки споживання прив'язані до фронтів тактових імпульсів і перевищують постійну складову струму в десятки разів. Це пояснюється зміною стану логічних елементів саме після поступлення кожного фронту тактового імпульсу.

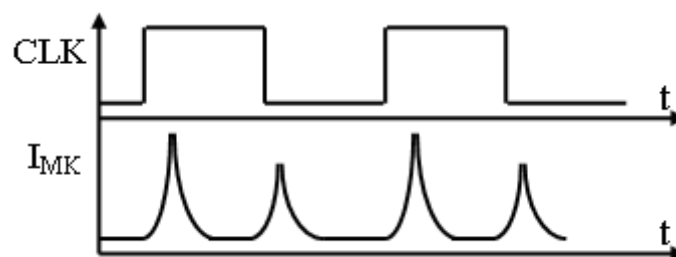


Рис. 1. Типова осцилограма струму споживання мікроконтролера

Перші дослідження [3, 4], дали змогу значно, на $\approx 40\%$ знизити енергоспоживання процесора i80486DX, хоча опиралися на результати вимірювання середнього струму споживання мікропроцесора при виконанні спеціальних програм. Аналіз показав, що отримані на базі вимірювань середнього струму моделі споживання енергії мікропроцесором мають значну похибку (10% і більше).

Група проф. Laoroulos'a з університету Салоніки (Греція) дослідила [5...7] енергоспоживання процесорного ядра ARM7TDMI шляхом вимірювання миттєвого струму споживання за допомогою симетричного "струмового дзеркала", яке дозволило заземлити під час вимірювання і мікропроцесор і осцилограф [5]. Але аналіз похибок, проведений у [8], показав невисоку точність "струмового дзеркала" через зміну спаду напруги на транзисторах при зміні струму споживання мікропроцесора. Крім того, при використанні "струмового дзеркала", схема живлення мікропроцесора не відповідає нормальній – конденсатори в колі живлення відділені від мікропроцесора "струмовим дзеркалом". Хоча його динамічний опір відносно малий, він впливає на значення струму, спожитого мікропроцесором. Такий режим роботи

мікропроцесора викликає методичну похибку, яку важко оцінити та відкоригувати. Тому похибки розроблених моделей споживання сягають 7...10%.

Запропонований в [9, 10] метод вимірювання миттєвого значення струму споживання імпульсних споживачів використовує конденсатор як вимірювальний перетворювач струму споживання мікропроцесора (рис. 1). Залежність напруги на конденсаторі від струмів його заряду або розряду відома [11], а його наявність в колі живлення дозволяє мікропроцесору працювати в нормальному (штатному) режимі. Розроблені в [12] методи корекції похибок компонентів вимірювального каналу, навіть при заміні ділянки експоненти прямою під час визначення ємності згаданого конденсатора, забезпечують інструментальну похибку вимірювання енергоспоживання імпульсних споживачів не більше 0,75%.

Однак запропонований в [9, 10] метод, через вимірювання миттєвих значень спадів напруги на конденсаторі відносно невеликої ємності та резисторі, має малу завадостійкість. Це вимагає багатократного повторення експериментальних досліджень та детального відбору їх результатів, щоби уникнути промахів, викликаних дією завад.

Крім того, метод, запропонований в [9, 10], допускає накопичення похибки при вимірюванні енергії виконання програм або їх фрагментів, що також пов'язано з низькою завадостійкістю. Однак в цьому випадку повторення експериментальних досліджень та детальний відбір їх результатів практично не дає змогу уникнути додаткових похибок від дії завад.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Запропонований в [9, 10] метод вимірювання миттєвого значення струму споживання імпульсних споживачів має три суттєві переваги:

- 1) Мікропроцесор заземлений і в колі його живлення є конденсатор (штатний режим роботи).
- 2) Основне рівняння схеми відображає перший закон Кірхгофа (а не є наближеним).
- 3) Цифровий осцилограф працює в диференційному режимі, що зменшує похибку його дискретності та дозволяє використати дешеві 8-ми розрядні осцилографи.

Ці переваги дають змогу з високою точністю отримати значення енергії виконання окремих програмних інструкцій мікроконтролером.

Метою даної статті є розроблення системи вимірювання середнього енергоспоживання імпульсного споживача, зокрема, мікроконтролера або мікропроцесора, під час багатократного виконання однієї інструкції, фрагментів програм або цілих програм з високою точністю, без накопичення похибки. При цьому має бути забезпечена висока завадостійкість та можливість порівняння результатів вимірювання із результатами, отриманими системою вимірювання миттєвого значення струму споживання імпульсних споживачів, що працює за методом, запропонованим в [9, 10].

ПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Як відомо [11], імпульсна енергія визначається згідно математичної формули

$$E = \int_{t=0}^T u \cdot i \cdot dt, \quad (1)$$

де u – миттєве значення напруги на контактах живлення споживача; i – миттєве значення струму через контакти споживача; t – поточне значення часу; T – час, за який вимірюють енергію.

Основна ідея запропонованого в [9, 10] методу полягає в тому, що, якщо живити досліджуваний імпульсний споживач (мікроконтролер) від джерела струму (а не традиційно, від джерела напруги), то суму струмів у вузлі, куди приєднані стабілізатор струму, мікроконтролер, конденсатор в колі живлення останнього та захисний еквівалент стабілітрона (на базі операційного підсилювача) можна записати строго відповідно до першого закону Кірхгофа. Відповідним підбором ємності конденсатора в колі живлення мікроконтролера можна добитися, що максимальні відхилення його напруги живлення будуть відносно малі (не більше 0,5-1%).

При вимірюванні середнього енергоспоживання згідно пропонованого методу [13] доцільніше записати баланс генерованої та спожитої енергії

$$E_{REFI} = E_{MP} + E_C + E_{ST}, \quad (2)$$

де E_{REFI} – енергія стабілізатора струму (генерована, поступає у вузол); E_{MP} – енергія мікроконтролера (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 при захисті мікроконтролера при перевищенні напруги в колі живлення (на конденсаторі) допустимого значення (спожита, виходить з вузла).

Енергії спожиті вимірювальними колами малі порівняно з переліченими, ними можна нехтувати. Енергію, накопичена конденсатором, можна, згідно [11], визначити як

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

а її зміну – як

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

Де $E_C, \Delta E_C$ – енергія, накопичена конденсатором, та її зміна; $U_C, \Delta U_C$ – напруга на конденсаторі та її зміна.

При реалізації пропонованого методу [13] спочатку налаштовують струм стабілізатора струму таким чином, щоби інтеграл відхилення напруги на мікроконтролері від початкового значення за час

вимірювання 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 мікроконтролера, практично не змінює баланс енергії генерування-споживання (використовуються керамічні конденсатори, що мають струми витоку), тобто його енергію можна виключити з (2) і переписати (2) як

$$E_{MP} = E_{REFI} - E_R. \quad (5)$$

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

$$E_{REFI} = U_{REF} \cdot I_{REFI} \cdot T_{VYM}. \quad (6)$$

В періоди малого споживання енергії мікроконтролером (виконується набір команд, кожна з яких вимагає відносно мало енергії) напруга на конденсаторі в колі живлення може зростати вище допустимої для цього мікроконтролера. Тоді еквівалент стабілітрона спрацьовує та „відводить” надлишковий струм з вузла живлення мікроконтролера. Цю „відведену” надлишкову енергію враховують шляхом контролю струму через еквівалент стабілітрона. Для цього послідовно з еквівалентом стабілітрона увімкнено резистор R (шунт), спад напруги на якому вимірюється вимірювальною підсистемою. Через те, що струм через еквівалент стабілітрона протікає не постійно, а тільки коли напруга на мікроконтролері перевищує допустиму, необхідно інтегрувати цю енергію за час вимірювання енергоспоживання. Таким чином, можна записати

$$E_R = \int_{t=0}^T u_{MP} \cdot i_R \cdot dt = \int_{t=0}^T u_{MP} \frac{u_R}{R} dt, \quad (7)$$

де u_{MP}, i_R – поточні значення напруги на імпульсному споживачі та струму через резистор R (шунт) відповідно.

Слід відзначити, що у нашому випадку $u_{MP} \approx U_{REF}$, тоді (7) можна переписати як

$$E_R \approx \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt. \quad (8)$$

Відповідно (5) можна переписати як

$$E_{MP} = U_{REF} \cdot I_{REFI} \cdot T_{VYM} - \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt. \quad (9)$$

Відповідно до (9) енергію, яку споживає мікроконтролер, можна визначити знаючи напругу U_{REF} опорного джерела (її можна виміряти прецизійним цифровим вольтметром постійного струму), струм I_{REF} стабілізатора струму (його можна виміряти прецизійним цифровим амперметром постійного струму), час T проведення вимірювання (його можна виміряти цифровим лічильником, на який поступають імпульси кварцового генератора з виміряною прецизійним частотоміром частотою), опір R резистора, увімкненого послідовно з еквівалентом стабілітрона (його можна виміряти прецизійним цифровим омметром постійного струму) та інтеграл спаду напруги на цьому резисторі. Під час виконання самого експериментального визначення необхідно виміряти лише інтеграл спаду напруги на резисторі R . Для такого вимірювання доцільно використати метод двотактного інтегрування – один з найточніших та найбільш завадостійких методів аналого-цифрового перетворення [14].

Для забезпечення високої точності та завадостійкості вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R слід виконати наступні вимоги:

1) час T вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R не повинен бути меншим деякого значення, згідно якого розраховано елементи вимірювальної системи;

2) час T вимірювання інтегралу спаду напруги на резисторі R (тривалість першого такту при використанні аналого-цифрового перетворювача двотактного інтегрування) повинен бути кратним заваді від мережі живлення, для чого необхідно відповідним чином сформулювати набір виконуваних інструкцій (або програму) та, при вимірюванні енергії виконання команд мікропроцесором, синхронізувати час запуску виконання програми та кінця вимірювання з однойменними переходами напруги мережі живлення через нуль;

3) в процесі вимірювання енергії багатократного виконання інструкції необхідно вести підрахунок кількості цих виконань для того, щоби можна було визначити енергію її виконання як частку від ділення обчисленої згідно (9) енергії E_{MP} на кількість циклів виконання інструкції.

СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ

Для забезпечення малої похибки порівняння результатів вимірювання енергоспоживання мікропроцесорів за допомогою розглянутого вище методу і методу, запропонованого у [9, 10], необхідно базувати вимірювальну схему на одній і тій же основі. Максимальна кількість елементів такої об'єднаної вимірювальної схеми, що впливають на точність вимірювання, повинна входити в обидві системи таким чином, щоби їх похибка по можливості однаково впливала на результати вимірювання енергоспоживання обома методами.

Пропонований метод вимірювання середнього енергоспоживання мікропроцесором реалізує система, структурно-принципова схема якої представлена на рис. 2. Вона складається з досліджуваного мікроконтролера МК, що живиться від стабілізатора струму СтС. В коло живлення СтС ввімкнено прецизійний амперметр постійного струму A , конденсатор C , ключ K та еквівалент стабілітрона на базі операційного підсилювача ОП та діода D . В схему також введено опорний стабілізатор напруги СтН, прецизійний вольтметр постійного струму V , резистор R , ввімкнений послідовно з еквівалентом стабілітрона, а також систему регулювання, систему вимірювання та обчислювальний пристрій. Останній складається із пристрою віднімання $\bar{\Sigma}$ та перемножувачів $X1$ та $X2$.

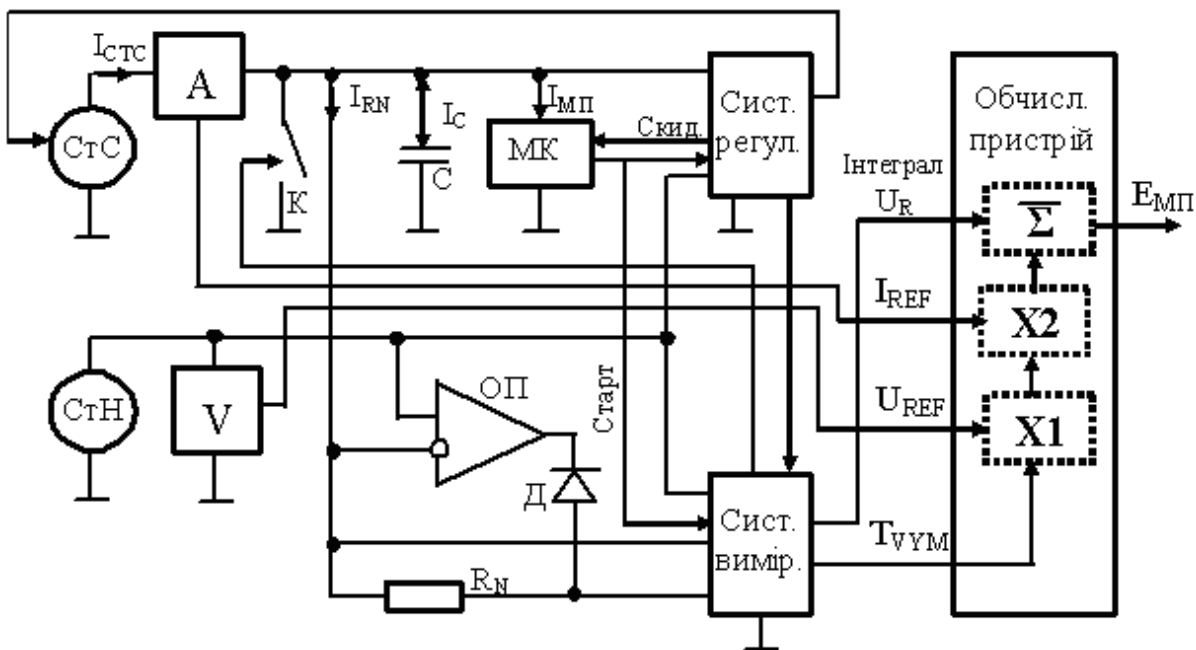


Рис. 2. Система вимірювання середнього енергоспоживання мікропроцесора

Під час дослідження в пам'ять програми мікроконтролера МК записують підпрограму його самоналаштування (встановлення потрібного режиму роботи своїх вузлів) та послідовність інструкцій, середнє енергоспоживання яких досліджують (це може бути як багатократно повторена одна з інструкцій, так і досліджувана програма в цілому або її фрагмент). Робота схеми починається подачею сигналу початку роботи на систему керування, яка після відповідної підготовки власних вузлів посилає на МК імпульс скидання, який ініціює початок його роботи.

МК спочатку виконує налаштування своїх вузлів (встановлює потрібні при даних дослідженні режими їх роботи). Перед початком виконання саме досліджуваної інструкції (програми), МК посилає вимірювальній системі та системі керування код старту дослідження. Система регулювання починає інтегрувати відхилення напруги живлення МК від напруги СтН (остання рівна номінальній напрузі живлення МК). Після виконання перелічених вище трьох умов система регулювання відключає свій вхід від напруги живлення МК та вимірює відхилення інтегралу відхилення напруги живлення МК від напруги СтН. Якщо відхилення напруги живлення МК від номінальної не рівне нулю (перевищує допустиме значення), то система регулювання змінює струм СтС так, щоби наблизити зміну напруги в колі живлення МК за час виконання вимірювання до нуля. Тоді система регулювання скидає МК і описаний процес налаштування повторюється. За декілька ітерацій відхилення напруги живлення МК від номінальної стане близьким до нуля (не буде перевищувати допустиме значення). Тоді система регулювання фіксує значення струму СтС, дає дозвіл виконання вимірювань вимірювальній системі та знову скидає МК. Система вимірювання, після поступлення стартового сигналу з МК, починає інтегрування спаду напруги на резисторі R . Після кінця вимірювання (виконання перелічених вище трьох умов) система регулювання знову перевіряє відхилення інтегралу відхилення напруги живлення МК від напруги СтН. Якщо відхилення напруги живлення МК від номінальної не рівне нулю (перевищує допустиме значення), то система регулювання не закінчує процес дослідження, а проводить наступне наближення струму СтС до потрібного значення (щоби інтеграл відхилення напруги живлення МК від напруги СтН наближався до нуля). Потім система регулювання

ініціює новий цикл вимірювання енергоспоживання.

Якщо інтеграл відхилення напруги живлення МК від номінальної близький до нуля (не перевищує допустиме значення), то система регулювання закінчує процес дослідження та ініціює обчислення обчислювальним пристроєм середнього значення енергії виконання команди (або програми) МК згідно (9). Для цього обчислювальний пристрій замикає ключ К, запам'ятовує дійсне значення струму СтС, виміряне амперметром A та дійсне значення напруги, виміряне вольтметром V . На основі цих значень, а також значення часу вимірювання (може поступати від системи вимірювання або регулювання) перемножувачі та пристрій віднімання обчислюють згідно (9) значення середньої енергії E_{MP} , спожитої мікроконтролером МК за час вимірювання.

ВИСНОВКИ

Розроблена система вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів дозволяє виміряти середню споживану ними енергію з високою точністю. Разом із системою, описаною в [9, 10] вона дозволяє надійно вимірювати енергію виконання окремих інструкцій. Самостійно вона дає змогу вимірювати енергію, спожиту при виконанні програм у цілому або їх фрагментів.

Слід зазначити, що запропонованій системі притаманні методичні похибки, пов'язані зі спрощеннями при виведенні (9). Перша з них пов'язана з приблизним характером рівності (8), за участю якої виведено рівняння вимірювання (9). Було вказано, що $u_{MP} \approx U_{REF}$, а це веде до відповідної методичної похибки. Однак відхилення u_{MP} від U_{REF} не перевищує допустимого відхилення напруги на мікроконтролері, а воно прийняте

$\pm(0,5\dots1\%)$. Слід теж врахувати, що у (9) $U_{REF} \cdot I_{REF} \cdot T_{VYM} \gg \frac{U_{REF}}{R} \int_{t=0}^T u_R dt$, тобто ця методична

похибка є величиною другого порядку малості.

Друга методична похибка пов'язана з припущенням, що коли після виконання операції 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 імпульсний споживач лінійний, а закон розподілу відхилень напруги на імпульсному споживачі рівномірний. Однак, напівпровідникові елементи, з яких складається мікропроцесор, є нелінійними елементами, в зв'язку з чим і виникає згадана методична похибка. Однак її значення буде досить малим – ємність конденсатора C вибирають таким чином, щоби зміни напруги на досліджуваному імпульсному споживачі під час вимірювання не перевищували $\pm(0,5\dots1\%)$, а значить методична похибка буде значно менша за $\pm 1\%$. При нелінійності енергоспоживання імпульсного споживача $\pm 10\%$ ця методична похибка буде не перевищувати $\pm 10\%$ від $\pm 1\%$, тобто $\pm 0,1\%$. Однак треба відзначити, що дослідження нелінійності споживання мікропроцесорів авторам не відомі, а приведені значення нелінійності $\pm 10\%$ стосуються окремого МОН транзистора, а не мікроконтролера.

Тому в подальшому автори планують провести дослідження нелінійності залежності струму споживання мікроконтролерів від зміни напруги на ньому та більш строго оцінити методичні похибки розробленої системи вимірювання енергоспоживання мікроконтролерів.

Література

1. Боровий А. Аналіз схем дослідження енергії виконання команд мікропроцесора [Текст] / А. Боровий, В. Кочан. // Вісник Хмельницького національного університету. — №2, т. 1. — 2007. — С. 105-109.
2. Боровий А. Аналіз характеру енергоспоживання інструкцій опрацювання даних [Текст] / А. Боровий. // Збірник тез XII Наукової конференції Тернопільського Державного Технічного Університету імені І. Пулюя, 14-15 травня 2008. — Тернопіль, 2008. — С. 86.
3. V. Tiwari. Power Analysis of Embedded software: A First Step Towards Software Power Minimization [Text] / Vivek Tiwari, Sharad Malik and Andrew Wolfe // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — Vol. 2, No. 4. — December 1994. — pp. 437-445.
4. V. Tiwari. Instruction Level Power Analysis and Optimization of Software [Text] / Vivek Tiwari, Sharad Malik, Andrew Wolfe, Mike Tien-Chien Lee // Journal of VLSI Signal Processing. — Vol. 13, No. 2-3., August 1996. — pp. 223-238.
5. Instruction-level power measurement methodology [Text]: Deliverable / AUTH; Authors: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos. — Thessaloniki, 2002. — 24 p. — Bibliogr.: p. 24. — Project ID.: IS/2000-30093. — Doc. ID EASY/WP2/AUTH/DL/P/D8/B1.
6. S. Nikolaidis. Instruction level energy modeling for pipelined processors [Text] / S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos, L. Bisdounis and S. Blonias // International Workshop Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation: proceedings / Turin, Italy, 2003. — pp. 279-288. — Bibliogr.: p. 288.
7. Th. Laopoulos. Measurement of current variations for the estimation of software-related power consumption [Text] / Th. Laopoulos, P. Neofotistos, C. A. Kosmatopoulos, and S. Nikolaidis // IEEE Transactions

on instrumentation and measurement. — Vol. 52(4). — 2003. — pp. 1206-1212.

8. Borovyi. Analysis of CPU's instructions energy consumption device circuits [Text]/ A. Borovyi V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // The fourth IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007): proceedings / September 9-11, 2007, Dortmund, Germany. — Dortmund, 2007. — pp. 42-47.

9. Патент 90922 України, МПК7 G05F 5/00, G01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів [Текст] / Боровий А. М., Майків І. М., Кочан Р. В., Домбровський З. І., Кочан В. В.; заявник і патентовласник Боровий А. М., Майків І. М., Кочан Р. В., Домбровський З. І., Кочан В. В. — № а2008 06325; заявл. 13.05.08; опубл. 10.06.10, Бюл. №11. — 4 с.: іл.

10. Боровий А. Стенд дослідження миттєвого значення струму споживання мікропроцесора [Текст] / Боровий А., Кочан В., Турченко В // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. — 2009. — №1, т. 14. — ст. 131-138.

11. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. /Х. Кухлинг. — М.: Мир, 1982. — 520 с.

12. Боровий Андрій Модестович. Інформаційно-вимірювальна система дослідження параметрів енергоспоживання мікропроцесорів [Текст] : 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.

13. 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

14. Уолт Кестер. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера. — М.: Техносфера, 2007. — 1016с.

References

1. Borovyi. Analiz skhem doslidzhennya enerhiyi vykonannya komand mikroprotsesora [Text] / A. Borovyi, V. Kochan. // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu.— #2, t. 1. — 2007. — P. 105-109.

2. Borovyi. Analiz kharakteru enerhospozhyvannya instruktysiy opratsyuvannya danykh [Text] / A. Borovyi. // Збірник тез XII Наукової конференції Тернопільського Державного Технічного Університету імені І. Пулюя, 14-15 травня 2008. — Тернопіль, 2008. — С. 86.

3. V. Tiwari. Power Analysis of Embedded software: A First Step Towards Software Power Minimization [Text] / Vivek Tiwari, Sharad Malik and Andrew Wolfe // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — Vol. 2, No. 4. — December 1994. — pp. 437-445.

4. V. Tiwari. Instruction Level Power Analysis and Optimization of Software [Text] / Vivek Tiwari, Sharad Malik, Andrew Wolfe, Mike Tien-Chien Lee // Journal of VLSI Signal Processing. — Vol. 13, No. 2-3., August 1996. — pp. 223-238.

5. Instruction-level power measurement methodology [Text]: Deliverable / AUTH; Authors: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos. — Thessaloniki, 2002. — 24 p. — Bibliogr.: p. 24. — Project ID.: IS/-2000-30093. — Doc. ID EASY/WP2/AUTH/DL/P/D8/B1.

6. S. Nikolaidis. Instruction level energy modeling for pipelined processors [Text] / S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos, L. Bisdounis and S. Blonias // International Workshop Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation: proceedings / Turin, Italy, 2003. — pp. 279-288. — Bibliogr.: p. 288.

7. Th. Laopoulos. Measurement of current variations for the estimation of software-related power consumption [Text] / Th. Laopoulos, P. Ncofotistos, C. A. Kosmatopoulos, and S. Nikolaidis // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. — Vol. 52(4). — 2003. — pp. 1206-1212.

8. Borovyi. Analysis of CPU's instructions energy consumption device circuits [Text]/ A. Borovyi V. Konstantakos, V. Kochan [et al.] // The fourth IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007): proceedings / September 9-11, 2007, Dortmund, Germany. — Dortmund, 2007. — pp. 42-47.

9. Energy measurement device for pulse users ukraine patent 90922 issued june 10, 2010 inventors: Andrii Borovyi, Roman Kochan, Zbyshek Dombrovsky, Ihor Maykiv, Volodymyr Kochan.

10. Borovyi A. Stend doslidzhennya myt'yevoho znachennya strumu spozhyvannya mikroprotsesora [Text] / Borovyi A., Kochan V., Turchenko V. // Visnyk Ternopil'skoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. — 2009. — #1, t. 14. — p. 131-138.

11. Kuchlynh Kh. Spravochnyk po fyzike:Per. s nem. /Kh. Kuchlynh. — М.: Myr, 1982. — 520s

12. Borovyy, Andriy Modestovych Informatsiyno-vymiryvalna systema doslidzhennya parametriv enerhospozhyvannya mikroprotsesoriv [Tekst] : dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk : spets. 05.13.05 - komp'yuterni systemy ta komponenty // Andriy Modestovych Borovyy. — Ternopil' : TNEU, 2012. — 266 s.

13. Sposib vymiryuvannya serednoyi enerhiyi impulsnoho spozhyvacha ta prystryi dlya yoho realizatsiyi: Zayavka: # a201403292 Ukrayina: G01R 5/00; zayavnyky Osolinsky Oleksandr Romanovykh, Kochan Volodymyr Volodymyrovych, Dombrovskyy Zbyshek Ivanovykh, Kochan Orest Volodymyrovych; zayavl. 31.03.2014

14. Uolt Kester. Analoho-tsifrovoe preobrazovanye / Pod red. Uolta Kestera. — М.: Tekhnosfera, 2007. — 1016s.

Рецензія/Peer review : 20.12.2014 р.

Надрукована/Printed :1.1.2015 р.