Боровий А., Кочан В., Турченко В. Стенд дослідження миттєвого значення струму споживання мікропроцесора // Вісник ТДТУ. – 2009. - Том 14. - №1. – ст.. 131-138. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні системи).

УДК 681.2.084

А. Боровий; В. Кочан; В. Турченко

Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету

СТЕНД ДОСЛІДЖЕННЯ МИТТЄВОГО ЗНАЧЕННЯ СТРУМУ СПОЖИВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРА

У даній статті описано розроблений стенд дослідження миттєвого значення струму споживання мікропроцесора, який може забезпечити високу точність оцінки енергії виконання мікропроцесором окремих інструкцій. При вимірюванні струму ввімкнення мікропроцесора відповідає нормальній схемі. Результати оцінки можуть служити основою для побудови коректної моделі енергоспоживання мікропроцесора, яка буде використовуватися для оптимізації його програмного забезпечення за мінімумом енергоспоживання.

Ключові слова: *стенд, мікропроцесор, струм,модель.*

A. Borovyi, V. Kochan, V. Turchenko

SETUP FOR MEASURING INSTANT CURRENT VALUES OF CPU'S POWER CONSUMPTION

Abstract. In this paper measurement setup is described. This setup will be used for measuring instant current values of CPU and may provide a high accuracy during estimating power consumption of CPU while it executes instructions. Plug-in of the CPU during the measurements correspond to the regular circuit. Gained results may be used for the development of the appropriate mathematical model of CPU's power consumption. This model will be used for optimizing software according to the minimum of power consumption.

Key words: *bench, microprocessor,current, model.*

Умовні позначення

ΔU_C – зміна напруги на конденсаторі;

I_C – струм заряду або розряду конденсатора;

t – час заряду або розряду;

C – ємність конденсатора;

I_{REF} – струм джерела живлення (стабілізатора струму);

I_{MK} – струм споживання мікропроцесора;

I_R – струм стабілітрона і послідовно ввімкненого з ним резистора;

R – опір резистора, послідовно ввімкненого із стабілітроном;

U_R – спад напруги на резисторі R ;

U_{REF} – напруга джерела опорної напруги;

E_i – елементарні енергії, що споживаються при виконання інструкції;

n – кількість елементарних енергій, що споживаються за час повного виконання інструкції;

T_{CLK} – період імпульсів тактового генератора мікропроцесора;

Δt – час перетворення аналого-цифрового перетворювача цифрового осцилографа;

F_{MAX} – максимальна частота дискретизації цифрового осцилографа;

I_i – струм споживання мікропроцесора за час Δt ;

U_i – напруга живлення мікропроцесора за час Δt ;

U_{O1i} , U_{O2i} – результати вимірювання першого і другого каналу цифрового осцилографа відповідно.

Вступ

Для зменшення енергоспоживання вбудованих систем і збільшення часу роботи автономних систем використовують різні методи. Умовно їх можна поділити на три великі групи: вдосконалення джерел живлення, апаратного забезпечення і програмного забезпечення. Кожна з груп має свої переваги і недоліки. Однак, якщо в перших двох групах давно ведуться розгалужені фундаментальні та прикладні дослідження, то в третій групі перші дослідження американський вчений Тіварі почав лише у 1994 році. Він запропонував першу модель енергоспоживання процесорів [1, 2]. Його підхід передбачає дослідження енергоспоживання виконання інструкцій, міжінструкційних переходів та інших операцій процесорного ядра (зупинка конвеєра і т.п.). Використання запропонованої ним методики для процесорного ядра Intel i80486DX дозволило знизити енергоспоживання на 40%. Однак точність побудови моделі у відомих працях детально не аналізувалася, хоча є вказівки, що її похибка досягала 10%.

Продовжила дослідження школа проф. Laopoulos'a з університету Салоніки [3…5] на прикладі мікроконтролерів на базі широко розповсюдженого процесорного ядра ARM7TDMI, розробці одного з лідерів ринку - ARM Ltd. Однак аналіз похибок експериментального обладнання, проведений в [6], показав його невисоку точність. Тому похибки розроблених моделей споживання сягають 7…10% [3…5]. Крім того, схема живлення процесорного ядра, використана при цих дослідженнях (схема струмового дзеркала), не відповідала схемі нормальної роботи мікропроцесора, що зумовило додаткові методичні похибки, які важко оцінити, а тим більше – скоригувати.

Очевидно, що основою побудови високоточної та коректної математичної моделі енергоспоживання процесорів є результати експериментальних досліджень енергії виконання окремих інструкцій цим процесором. Але відоме обладнання не дозволяє достатньо точно вимірювати миттєвий струм споживання пристроїв, що працюють в імпульсному режимі на високій частоті та вимагають малого внутрішнього опору джерела живлення саме на високій частоті, а власне такими пристроями є мікропроцесори та мікроконтролери. Таким чином, проблема оптимізації програмного забезпечення вбудованих і автономних систем з метою мінімізації енергоспоживання на сьогодні не може бути вирішена на достатньо високому рівні через відсутність потрібного апаратного забезпечення вимірювання енергії виконання інструкцій з достатньою точністю (похибка не більше 1%) при умові роботи їх процесорного ядра в режимі, близькому до режиму нормальної експлуатації. Метою даної статті є розробка апаратного забезпечення (спеціалізованого стенду) вимірювання енергії виконання інструкцій процесорним ядром, вільного від перелічених недоліків.

Метод вимірювання миттєвого значення струму споживання мікропроцесора

Запропонований в [7] метод вимірювання миттєвого значення струму споживання імпульсних споживачів базується на широко відомій залежності напруги на конденсаторі від струмів його заряду або розряду [8]

$$\Delta U_C = \frac{I_C \times t}{C} \quad , \qquad (1)$$

де ΔU_C – зміна напруги на конденсаторі; I_C – струм заряду або розряду конденсатора; t – час заряду або розряду; C – ємність конденсатора.

В той же час усі відомі мікропроцесори та мікроконтролери вимагають для нормальної роботи ввімкнення високочастотного конденсатора в колі живлення. Тому використання конденсатора як вимірювального перетворювача струму споживання мікропроцесора дає можливість йому працювати в нормальному режимі. Однак для визначення струму споживання саме мікропроцесора з високою точністю необхідно забезпечити строгий контроль поступлення струму в коло його живлення. Цього можна досягнути за рахунок живлення схеми від стабілізатора струму (а не традиційним шляхом від стабілізатора напруги). Узагальнена структура пристрою, що реалізує такий метод вимірювання струму споживання мікропроцесора, представлена рис. 1.

Основною перевагою схеми рис. 1 є можливість строгого контролю балансу струмів, які втікають та витікають в коло живлення мікропроцесора, що дає можливість записати співвідношення

$$I_{REF} = I_C + I_{MK}, \quad (2)$$

де I_{REF} – струм джерела живлення (стабілізатора струму); I_C – струм конденсатора, що визначається згідно з (1) за напругою на ньому, яка вимірюється високочастотним цифровим осцилографом; I_{MK} – шуканий струм споживання мікропроцесора.

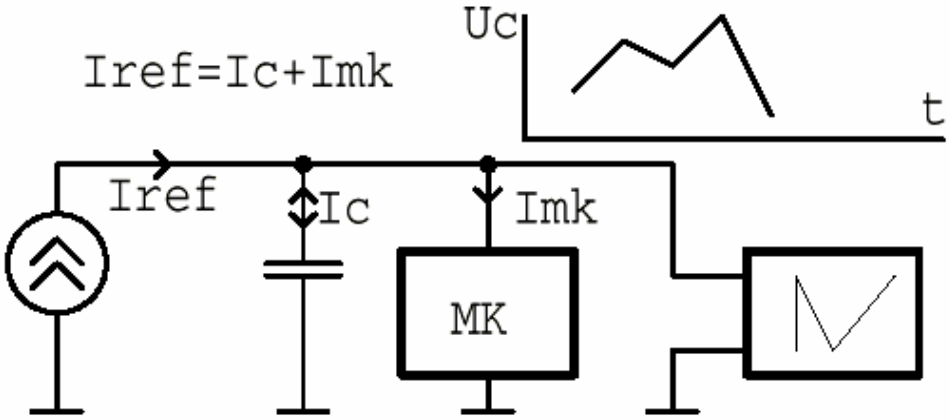

Рисунок 1- Узагальнена структура пристрою вимірювання струму споживання мікропроцесора шляхом перетворення його в напругу на конденсаторі

Для забезпечення нормальної роботи мікропроцесора зміни напруги на конденсаторі в схемі рис. 1 мають бути малими, щоби забезпечити нормальну напругу живлення мікропроцесора та не спотворювати режим його роботи. Цього легко досягти при малих змінах струму споживання I_{MK} шляхом відповідного вибору струму живлення I_{REF} та ємності конденсатора C. Однак практично всі мікропроцесори на сьогодні виготовляють за КМОН технологією, яка характеризується якраз дуже великими відношеннями струмів споживання в робочому режимі і в стані спокою. Це змушує доповнити схему рис. 1 вузлом обмеження напруги на мікроконтролері.

Такий обмежувач можна виконати на стабілітроні, створивши схему, аналогічну схемі відомого параметричного стабілізатора, як це показано на рис. 2. Стабілітрон ZD, пропускаючи надлишок струму під час малого споживання мікропроцесора, обмежує напругу, до якої заряджається конденсатор C. Але таким чином стабілітрон порушує баланс струмів, який відповідає (2). Тому робота схеми рис. 2 характеризується іншим балансом струмів, який враховує струм стабілітрона I_R шляхом вимірювання спаду напруги на резисторі R, що ввімкнений послідовно зі стабілітроном

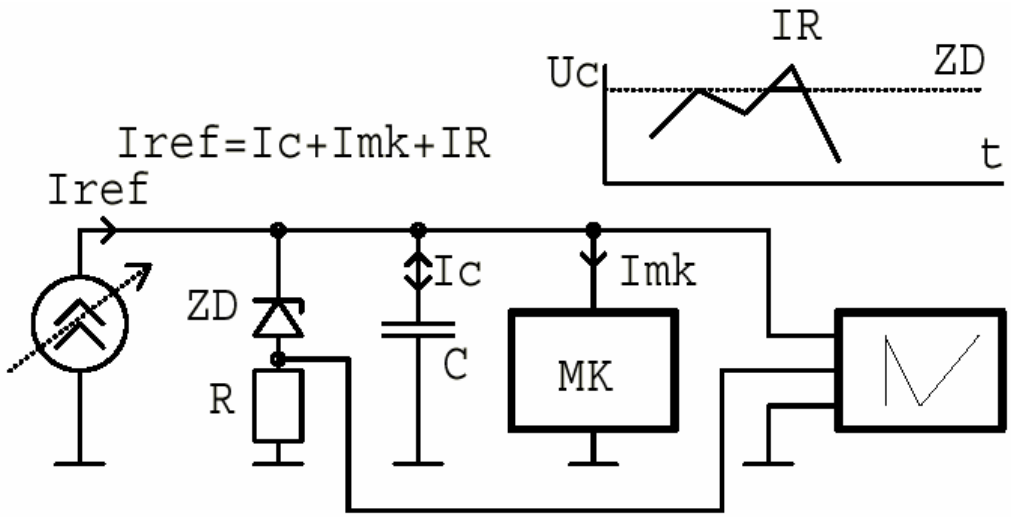

Рисунок 2 - Узагальнена структура пристрою вимірювання струму споживання мікропроцесора з обмеженням напруги на конденсаторі

$$I_{REF} = I_C + I_{MK} + I_R \quad . \tag{3}$$

Струм стабілітрона I_R визначається за законом Ома за результатами вимірювання спаду напруги U_R на резисторі R другим каналом цифрового осцилографа

$$I_R = U_R / R \quad . \tag{4}$$

Структура спеціалізованого стенду

Недоліками представленої на рис. 2 узагальненої структури пристрою вимірювання струму споживання мікропроцесора є:

1. Обмеження напруги на конденсаторі напругою спрацювання стабілітрона, яка має значний розкид відносно номінальної. Це вимагає спеціального підбору стабілітронів.
2. Відносно мала швидкодія звичайних стабілітронів, яка не дозволить ефективно обмежувати напругу на мікропроцесорі, що веде до методичної похибки результатів вимірювання, яку важко оцінити.
3. Відносно швидкодіючі стабілітрони мають малу площу кристалу, що веде до значного і неконтрольованого їх самонагрівання струмом, який через них проходить. Це веде до значної похибки встановлення напруги живлення мікропроцесора, що збільшує методичну похибку результатів вимірювання.
4. Відносно велика бар'єрна ємність стабілітронів виявляється під'єднаною паралельно до конденсатора C . Її значення може бути враховане під час калібрування схеми, однак бар'єрна ємність стабілітронів, по-перше, має значну нелінійну залежність від напруги на його p-n переході, а, по-друге, має значні температурні та часові зміни, що, враховуючи самонагрівання стабілітронів, не дає змоги досягнути високої ефективності калібрування.
5. Цифровий осцилограф змушений вимірювати повну напругу на конденсаторі C . Якщо в цифровому осцилографі використано 8-ми розрядний аналого-цифровий перетворювач, то при зміні напруги на конденсаторі на 1…3% (що практично виключає методичну похибку вимірювання енергії за рахунок нелінійного споживання мікропроцесора) ми отримаємо зміну показу цифрового осцилографа на 3…8 квантів, тобто похибку дискретності на рівні 30…12%, що цілком неприйнятно. Тому схема рис. 2 вимагає використання щонайменше 14-розрядного аналого-цифрового перетворювача, а такі цифрові осцилографи дорогі.

Перелічені недоліки використання стабілітронів для обмеженням напруги на конденсаторі в схемі рис. 2 змушують замінити стабілітрон його високочастотним

еквівалентом на базі операційного підсилювача. Відповідна схема представлена на рис. 3. Вона використовує джерело опорної напруги U_{REF}, виконане як компенсаційний стабілізатор напруги, операційний підсилювач DA, діод D та резистор R. Якщо напруга на мікропроцесорі нижча за напругу джерела U_{REF}, то напруга на виході операційного підсилювача DA додатна, діод D запертий, спад напруги на резисторі R рівний нулю, і еквівалент стабілітрона на роботу схеми не впливає – струм джерела I_{REF} іде на живлення мікропроцесора і на заряд конденсатора C. Якщо ж напруга на мікропроцесорі перевищує напругу джерела U_{REF}, то напруга на виході операційного підсилювача DA стає від'ємна, діод D відкривається і відводить надлишок струму на вихід операційного підсилювача DA. При цьому надлишок струму створює спад напруги на резисторі R, який вимірюється другим каналом цифрового осцилографа.

При використанні високочастотного еквівалента стабілітрона на базі операційного підсилювача додаткова паразитна ємність, підключена паралельно до конденсатора C, визначається вхідною ємністю операційного підсилювача DA (одиниці пікофарад) та вхідними ємностями обох каналів цифрового осцилографа (близько 100 пікофарад кожна з врахуванням ємності вхідного кабеля), які є досить стабільними та не мають самонагрівання, що дозволяє врахувати їх значення при калібруванні схеми.

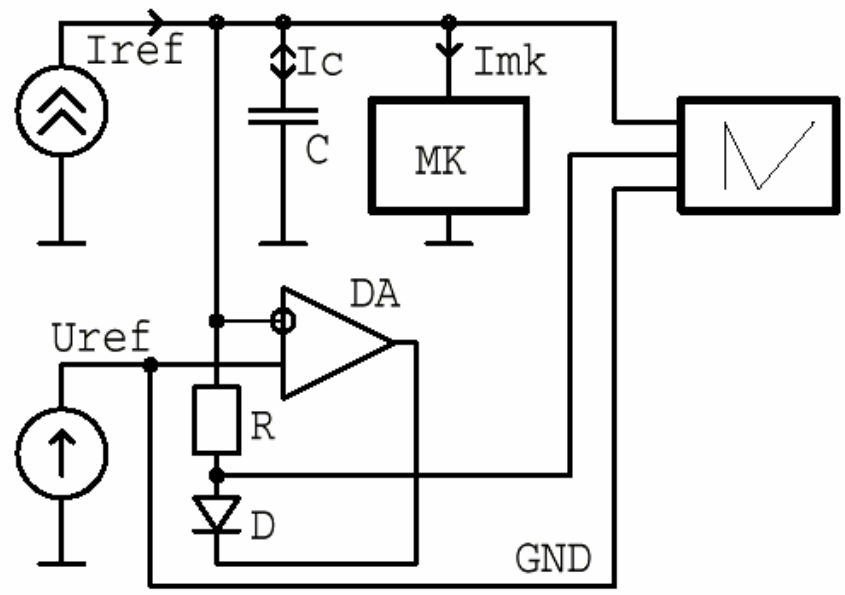

Рисунок 3 - Робоча структура стенду вимірювання струму споживання мікропроцесора

Незважаючи на використання для побудови високочастотного еквівалента стабілітрона високочастотних операційного підсилювача і діода, все ж є деяка затримка спрацювання еквівалента стабілітрона, якою не можна нехтувати на частотах роботи сучасних мікропроцесорів. Однак ця затримка веде тільки до незначного підвищення напруги на конденсаторі C, яке визначається часом спрацювання схеми діод D – операційний підсилювач DA. Однак головне – ця затримка не порушує баланс струмів (3) – струм споживання мікропроцесора буде визначено правильно, незважаючи на його перерозподіл між струмами I_R та I_C.

Важливою особливістю схеми рис. 3 є використання диференційного методу вимірювання. Це досягається підключенням спільного ("земляного") проводу GND цифрового осцилографа не до спільного ("земляного") проводу схеми живлення мікроконтролера, а до виходу опорного джерела U_{REF}. В такому випадку перший канал цифрового осцилографа вимірює не всю напругу на конденсаторі C, а тільки її

відхилення від номінального значення, викликані змінами струму споживання, які змінюють напругу на конденсаторі C . Це веде до того, що всі розряди першого каналу виявляються ефективними, тобто несуть в собі інформацію про струм споживання мікропроцесора. Другий канал осцилографа теж використовує диференційний метод вимірювання. Якщо еквівалент стабілітрона не пропускає надлишок струму, то спад напруги на резисторі R рівний нулю, тобто обидва канали цифрового осцилографа вимірюють однакову напругу. Якщо еквівалент стабілітрона пропускає надлишок струму, то спад напруги на резисторі R визначає різницю напруги між обома каналами цифрового осцилографа. Таким чином, навіть при використанні в цифровому осцилографі 8-ми розрядного аналого-цифрового перетворювача похибка дискретності буде меншою від 1%.

Методика оцінки енергії виконання мікропроцесором окремих інструкцій

Оцінити енергію виконання мікропроцесором окремих інструкцій можна шляхом обробки ряду результатів вимірювання струму споживання мікропроцесора, отриманих з допомогою розробленого стенду. Приклад результатів вимірювання обох каналів цифрового осцилографа при виконанні команди представлено на рис. 4, з якого видно, що для проведення оцінки енергії виконання мікропроцесором окремих інструкцій потрібне оброблення багатьох результатів вимірювання. Тому така оцінка може бути віднесена до сукупних вимірювань і вимагає розроблення відповідної методики обробки результатів окремих вимірювань.

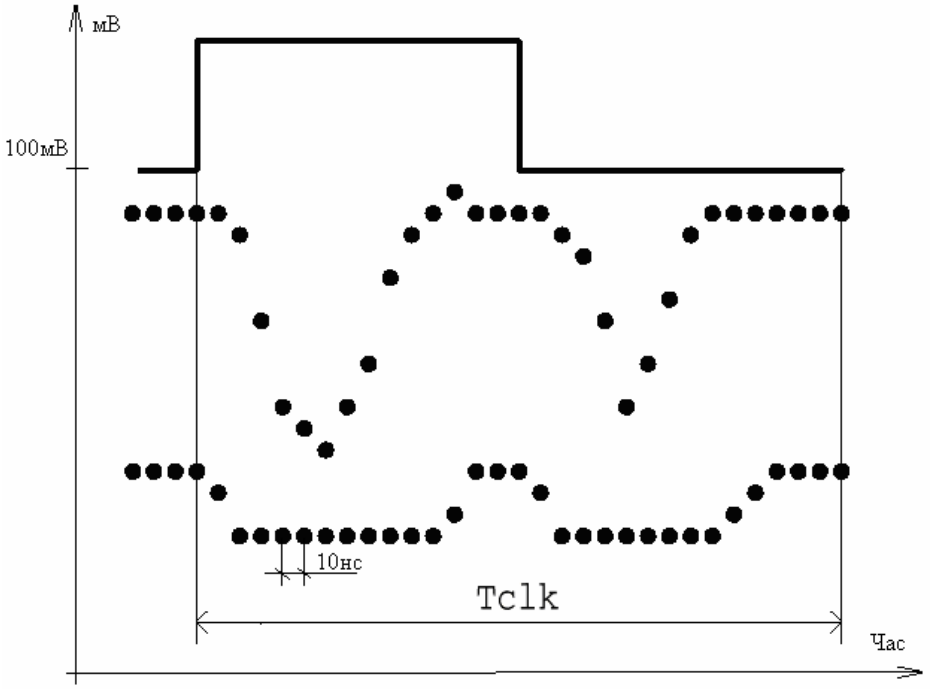

Рисунок 4 - Приклад результатів вимірювання обох каналів цифрового осцилографа при виконанні команди

Енергію виконання мікропроцесором окремих інструкцій можна оцінити як суму за час виконання інструкції елементарних енергій E_i, визначених за результатами вимірювання напруги цифровим осцилографом

$$E_{INS} = \sum_{i=1}^{n} E_i \quad . \tag{5}$$

Кількість n елементарних енергій E_i при сумуванні визначається періодом T_{CLK} імпульсів тактового генератора мікропроцесора та часом Δt перетворення

аналого-цифрового перетворювача цифрового осцилографа. При виконанні інструкції за один такт (що характерне для RISC процесорів, до яких належить ARM7TDMI)

$$n = T_{CLK} / \Delta t \quad . \tag{6}$$

Час Δt перетворення аналого-цифрового перетворювача, в свою чергу, можна визначити за максимальною частотою дискретизації F_{MAX} цифрового осцилографа

$$\Delta t = 1 / F_{MAX} \quad . \tag{7}$$

Значення елементарної енергії E_i можна оцінити як добуток результатів вимірювання напруги живлення U_i та струму споживання I_i мікропроцесора за час Δt

$$E_i = U_i \times I_i \times \Delta t \ . \tag{8}$$

В свою чергу, напругу U_i можна знайти за результатами вимірювання першого каналу цифрового осцилографа U_{O1i}, знаючи напругу U_{REF} опорного джерела (рис. 3)

$$U_i = U_{REF} + U_{O1i} \quad , \tag{9}$$

Струм споживання I_i мікропроцесора під час Δt визначимо, перетворивши (3)

$$I_i = I_{REF} - I_{Ci} - I_{Ri} \quad , \tag{10}$$

де I_{Ci} – струм заряду або розряду конденсатора (при заряді струм I_{Ci} має знак плюс, при розряді – знак мінус); I_{Ri} – струм через резистор (завжди із знаком плюс).

Струм конденсатора I_{Ci} можна визначити, перетворивши (1)

$$I_{Ci} = (U_{O1i} \times C) / \Delta t \quad , \tag{11}$$

а струм через резистор I_{Ri} з (4)

$$I_{Ri} = (U_{O2i} - U_{O1i}) / R \quad . \tag{12}$$

Таким чином, методика оцінки енергії виконання мікропроцесором окремої інструкції зводиться до виконання наступних кроків

1. Знаходження часових параметрів цифрового осцилографа згідно з (7) і (6);
2. Знаходження всіх n значень струмів I_{Ci} та I_{Ri} згідно з (11) і (12), потім n значень струмів мікропроцесора I_i згідно з (10);
3. Знаходження всіх n значень напруги U_i згідно з (9);
4. Знаходження всіх n значень елементарних енергій E_i згідно з (8) та їх сумування відповідно до (5);
5. Усереднення отриманих в декількох різних дослідах значень енергій виконання мікропроцесором окремих інструкцій E_{INS} та обчислення їх середньоквадратичного відхилення.

Висновки

Розроблений та описаний в даній статті стенд базується на схемі [7], яка дозволяє дослідити миттєве значення струму споживання мікропроцесора з достатньо малою похибкою та при роботі цього мікропроцесора в режимі, близькому до нормального. Це дозволяє, в свою чергу, з високою точністю оцінити енергію виконання мікропроцесором кожної окремої інструкції. Однак похибки елементів схеми, зокрема конденсатора С, не дозволяють безпосередньо отримати високу точність результату вимірювання. Запропонований метод калібрування схеми і аналіз результуючих похибок будуть предметом наступної статті.

Отримані результати вимірювання енергії можуть бути використані як база побудови коректної моделі енергоспоживання мікропроцесора, яка буде служити для оптимізації програмного забезпечення цього мікропроцесора з метою мінімізації енергоспоживання.

Література

1. Vivek Tiwari, Sharad Malik and Andrew Wolfe, “Power Analysis of Embedded software: A First Step Towards Software Power Minimization”, IEEE Transactions on very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 2, No. 4, pp 437-445, December 1994
2. Vivek Tiwari, Sharad Malik and Andrew Wolfe, “Instruction Level Power Analysis and Optimization of Software”, Journal of VLSI Signal Processing, 1-18Vol. 2, No. 4, pp 437-445, 1996
3. S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos, “Instruction-level power measurement methodology”, IST-2000-30093/EASY Project, Doc. ID: EASY/WP2/AUTH/DL/P/D8/B1, March 2002.
4. S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos, "Instruction level power measurements and analysis", IST-2000-30093/EASY Project, Doc. ID: EASY/WP2/AUTH/DL/P/ D15/B1, September 2002.
5. S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos, “Instruction-level power models for embedded processors”, IST-2000-30093/EASY Project, Doc. ID: EASY/WP2/AUTH/DL/I/21/B1, December 2002.
6. A. Borovyi, V. Kochan, A. Sachenko, V. Konstantakos, V. Yaskilka, "Analysis of Circuits for Measurement of Energy of Central Processor Unit's Instruction Executing", Proceedings of the Forth IEEE Workshop on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application", IDAACS'2007. - Dortmund, Germany. - 2007, September 6-8. P. 42-46
7. Заявка на винахід №а 2008 06325 Україна, МПК G01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів/А. Боровий, І. Майків, Р. Кочан, З. Домбровський, В. Кочан; заявл. 13.05.2008.
8. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

Одержано 12.02.2009 р.