

УДК 004.08.01

**Збишек ДОМБРОВСЬКИЙ,  
Анатолій САЧЕНКО,  
Андрій БОРОВИЙ**

## ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АУТОНОМНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Обґрунтовано новий підхід щодо зменшення енергоспоживання засобів автономних інформаційних систем за рахунок оптимізації програмних засобів, що базується на вимірюванні миттєвого струму енергії команд процесорного ядра з підвищеною точністю та прогнозуванні.*

*New approach in relation to diminishing of energy consumption of facilities of off-line information systems due to optimization of programmatic facilities, which is based on measuring of instantaneous current of energy of commands of processor kernel with the promoted exactness and prognostication, is given.*

**Ключові слова:** автономні інформаційні системи, енергоспоживання, оптимізація програмних засобів, прогнозування.

**Keywords:** off-line information systems, energy consumption, programming tools optimization, forecasting.

---

Інформаційна технологія як така не є конкурентною перевагою, для її формування потрібен набір конкурентних якостей, а також технологія підтримки процесів управління і стратегії конкуренції. Переваги на ринку досягають тим, що переможці швидко реагують на потреби ринку та впроваджують свої новаторські заходи: чим швидшою є реакція на вимоги ринку, тим вищий прибуток підприємства. При цьому потрібна більш гнучка і дешева організація інформаційного забезпечення.

З давніх часів людство розвивало інноваційні методи щодо подання, збереження і оброблення інформації. Основні винаходи, інноваційні засоби і технології забезпечують постійний розвиток і використання інформаційних систем (ІС), а постійне впровадження інноваційних досягнень вплинуло на значне зменшення вартості засобів ІС і розширення можливостей застосування цілого спектру нових виробів, які значною мірою впливають на життя підприємства.

Однією з характеристик, яка значною мірою сприяє широкому використанню ІС упродовж останніх десятиліть, є їх здатність до роботи в автономному режимі. Останнім часом вони спричиняють революційні зміни в управлінні бізнесом і використовуються для вирішення багатьох завдань менеджменту. Їх перелік доволі широкий: комунікатори,

планшетні комп'ютери, ноутбуки тощо. Автономні системи надають нові можливості щодо своєчасного прийняття рішень у динамічному ринковому середовищі.

Поширення таких систем пояснюється стійкістю їхнього ринку протягом світової кризи, а також прогнозованим його зростанням до 13,8 млрд. одиниць до кінця 2013 р. [1]. За прогнозами Intel, до 2015 р. кількість інформаційних систем з автономним живленням перевищить 15 млрд. одиниць. Для живлення автономних систем використовують енергетично обмежені ресурси (акумулятори), тому зменшення потужності їхнього споживання є важливою проблемою подальшого використання таких систем.

Дослідження у сфері збільшення тривалості роботи інформаційних систем при автономному живленні проводять за трьома напрямками:

- удосконалення джерел живлення;
- оптимізація апаратної складової (АЗ);
- оптимізація програмної складової (ПЗ).

Дослідження в межах цих напрямків мають різні завдання залежно від потреб споживача та умов експлуатації. Так, нині переважають заходи щодо зменшення енергоспоживання за рахунок удосконалення джерел живлення та оптимізації апаратної складової інформаційних систем. Завдання мінімізації енергоспоживання на етапі проектування інформаційних систем [2] вирішують, використовуючи стандартизовані методи проектування [3]. Наприклад, мова аналізу та проектування архітектури (Architecture Analysis and Design Language, AADL) дає змогу зменшити видатки на проектування системи загалом і окремих компонентів з урахуванням їх енергоспоживання [3]. Аналіз вхідних даних, які впливають на роботу системи, проводиться за допомогою її емуляції з використанням абстрактної моделі системи, яка є частиною програмного пакета Simulink [4]. На етапі проектування системи є можливим моделювання енергоспоживання її окремих компонентів [5].

В той час, як велика кількість виробників зосереджується на апаратній оптимізації кінцевого пристрою з точки зору енергоспоживання, програмна складова часто залишається поза увагою, хоча її оптимізація також суттєво впливає на кінцеве енергоспоживання процесора. Це пояснюється тим, що процес оцінювання енергоспоживання ПЗ є складною комплексною проблемою, пріоритетним завданням, яке треба вирішити, є аналіз та оцінювання компонентів автономних систем за величиною енергоспоживання.

Вперше такі дослідження проводив В. Тіварі, однак він не дослідив усіх деталей енергоспоживання ПЗ, хоча саме цей науковець обґрунтував доцільність таких досліджень. Значний внесок у вивчення енергоспоживання систем з автономним живленням, крім В. Тіварі, зробили Е. Масій, М. Педрам, С. Сегарс, К. Брандолезе, С. Стайнке, Т. Лаопулос та ін. [1–3]. Отримані при цьому результати уможливили створення математичної моделі затрат енергії процесорним ядром при виконанні команд, яка враховує ряд енергочутливих факторів, таких як спосіб адресації, типи операндів і номери регістрів.

Відомі концепції аналізу споживаної потужності процесора ІС при виконанні інструкцій можна поділити на групи, які ґрунтуються на фізичних вимірюваннях та моделюванні. У підходах, які базуються на моделюванні, енергія, витрачена ПЗ, оцінюється вимірюванням

витрат енергії різними складовими процесора, які, в свою чергу, отримують за допомогою симуляцій, що можуть бути проведені на різних рівнях: схеми, передачі чи регістра. Спільним недоліком усіх цих підходів є те, що вони не забезпечують можливості обчислити витрати енергії ПЗ безпосередньо з послідовності команд.

Отже, виконані дослідження у сфері аналізу й оцінювання напрямів зменшення споживаної потужності [6–8] показують, що на сьогодні розроблено недостатньо методів, які б сприяли оцінюванню ефективності ІС з точки зору споживаної потужності.

Отже, необхідною є розробка методів і засобів щодо оцінювання енергії виконання програми мікропроцесором з достатньою для практики точністю (1%) шляхом дослідження енергії виконання окремих команд і аналізу дезасембльованого коду програми з точки зору споживаної потужності. Це уможливить оптимізувати програмне забезпечення за споживаною енергією, що є актуальним для інформаційних систем, особливо з автономним живленням.

Мета роботи – розробити методи й засоби оцінювання та прогнозування енергоспоживання автономних ІС при виконанні інструкцій.

Одним із обмежень застосування автономних ІС є невелика тривалість роботи з батарейним живленням, тому ефективне використання останніх є завданням першочергового вирішення [9]. Аналіз, проведений у [6–7], вказує на те, що одним з найбільш енергоємних компонентів ІС є процесор, енергоспоживання якого становить 20%–30% від загального. Для ноутбуків найбільшим споживачем енергії може бути дисплей. Однак наявність останнього для автономних систем не завжди є обов'язковою (наприклад, система збору даних може передавати дані радіоканалом або ж зберігати у пам'яті для подальшої обробки, не виводячи інформацію на екран тощо).

Отже, процесор є одним з енергоємних пристроїв, тому оптимізація його енергоспоживання (і, як наслідок, збільшення тривалості роботи системи на одному заряді) є першочерговою задачею. Для мінімізації споживання енергії та забезпечення максимального терміну роботи при живленні від автономних джерел без обмежень на виконання інформаційних задач застосовують різні методи [7]:

- впровадження нових архітектурних і технологічних рішень на етапі проектування системи;
- оптимізація програмного забезпечення існуючих систем.

Оптимізація апаратного забезпечення для зменшення споживання енергії досягається шляхом розширення номенклатури модифікацій мікропроцесорів (МП) та збільшення кількості спеціалізованих режимів роботи. Одним із методів, який дає змогу абстрагуватися від детального аналізу апаратного забезпечення, є використання методів оцінювання енергоспоживання системи з точки зору програмного забезпечення. У цьому випадку згідно з кожною інструкцією програми на мові «Асемблер» аналізується енергоспоживання процесора для подальшої заміни ряду асемблерних інструкцій на одну або декілька відповідних інструкцій вручну.

Іншим методом зменшення енергоспоживання є аналіз складності алгоритму [4], який оптимізується шляхом зменшення звертань до пам'яті та шини даних. У результаті такої оптимізації досягають зменшення енергоспоживання на 70%.

На противагу апаратній, програмна оптимізація дає змогу зменшувати енергоспоживання процесора при його експлуатації. Завдяки цьому сфера застосування зазначеного методу є ширшою і може охоплювати не лише наявне програмне забезпечення (його оптимізація за енергоспоживанням може проводитися методом дизасемблювання програм та їх повторного асемблювання з урахуванням заданих параметрів), а й нове, на етапі проектування й розробки. Методи мінімізації енергоспоживання програмного забезпечення є новими та перспективними, оскільки їх можна використати і для нових систем, і для тих, що експлуатуються.

Для цього потрібні дані щодо споживання енергії процесорним ядром при виконанні кожної команди, а для практичного застосування необхідною є наявність компіляторів, які оптимізують програмний код за енергоспоживанням, що вимагає створення відповідних математичних моделей оцінювання енергоспоживання мікропроцесорів при виконанні інструкцій. Однак ця проблема пов'язана із складністю забезпечення точного аналізу та оцінки енергоспоживання виконання програми. Напрями досліджень у сфері оцінювання енергоспоживання з використанням різноманітних методів забезпечують різну точність та вимагають різного рівня знань про об'єкт дослідження.

Аналіз [8] показує, що для побудови математичної моделі енергоспоживання вбудованої системи необхідно знати її внутрішню архітектуру. Однак така інформація не завжди є доступною, тому створення моделі вимагає аналізу апаратної частини системи. Для здійснення такого вибору, який є доволі складним через велику кількість невідомих складових, створюють спеціальні засоби [1]. Їх основою є експериментальні дослідження відповідних компонентів, які отримують за допомогою симуляторів або реальних вимірювань.

У [6] подано параметричний часовий аналіз виконання програми, її окремих циклів та формування теоретичної бази для розрахунку енергоспоживання. Такий аналіз проводиться у два етапи: на першому етапі відбувається автоматична ідентифікація відомих параметрів, а на другому – значення параметрів корегуються оператором. Водночас велика увага приділяється завданню знаходження енергозатрат на виконання інструкцій у найменш сприятливій ситуації.

З відомих методів оцінювання енергоспоживання процесора при виконанні інструкцій найбільше застосування має метод, який передбачає багатократне виконання однієї інструкції й оцінку середньої енергії за час виконання відомої кількості повторів [4]. При багатократному виконанні однієї інструкції вимірюють середню потужність за час виконання заданої кількості інструкції і міжінструкційних переходів, тому вимоги до смуги пропускання схеми вимірювання струму споживання мікропроцесора можуть бути значно знижені. У цих способах, які ґрунтуються на фізичних вимірюваннях, витрати енергії ПЗ характеризуються даними, отриманими від реального вимірювання енергії споживання. Перевагою методик фізичного вимірювання є те, що результати є дуже близькими до реальної енергетичної поведінки процесора, оскільки дані отримуємо безпосередньо з результатів вимірювання.

Відомі моделі та методи оцінювання енергоспоживання мікропроцесорів мають велику похибку (до 10%). Це пов'язано з оцінюванням на базі результатів вимірювання середнього значення струму споживання мікропроцесорів (що не дає змоги коректно оцінити

енергоспоживання кожної інструкції), або ж вимірювання миттєвого значення струму споживання під час роботи мікропроцесора в нештатному режимі.

Отримані у такий спосіб значення можуть коливатися в межах до 10% [3], тому є непридатними для точного оцінювання енергоспоживання мікропроцесорів.

Отже, існуючі моделі не дають однозначної відповіді щодо мінімізації енергоспоживання шляхом модифікації програмного забезпечення (ПЗ). Побудова повної моделі енергоспоживання процесора вимагає експериментального оцінювання енергії виконання всіх інструкцій у всіх режимах та усіх міжінструкційних переходів, що характеризується високою трудомісткістю. У зв'язку з цим є потреба розроблення відповідних методів інтелектуального прогнозу енергоспоживання інструкцій мікропроцесора.

Для підвищення точності оцінки енергоспоживання окремих інструкцій мікропроцесора необхідно вимірювати миттєве значення струму споживання, від чого, у свою чергу, залежить ефективність управління енергоспоживанням системи. Окремі компоненти інструкцій зазвичай мають декілька варіантів реалізації і різний вплив на швидкодію та енергоспоживання системи, а тому для їх відбору використовують спеціальні методи [1; 3; 8].

Оскільки сучасні мікропроцесори використовують конвеєрну організацію роботи, то виникає завдання розмежування енергії мікропроцесора, спожитої на кожному конвеєрі, у момент опрацювання різних інструкцій. Для цього вперше запропоновано інноваційний метод вимірювання миттєвого струму споживання імпульсних пристроїв, зокрема, мікропроцесорів, який захищено патентом [10].

Для підвищення точності оцінювання запропоновано метод, який передбачає послідовне калібрування каналів вимірювання, що забезпечує похибку вимірювання миттєвого струму споживання імпульсних пристроїв не більше 0,5% [6].

При проведенні експериментальних досліджень струму споживання процесора встановлено, що для дослідження усіх можливих комбінацій інструкцій ПЗ потрібно багато часу, тому для зменшення тривалості та кількості експериментів узагальнено результати аналізу залежності оцінки енергоспоживання МП за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ) та запропоновано метод формування тренувального набору ШНМ для оцінювання енергоспоживання МП. Він базується на поєднанні функціональних ознак інструкцій та їх ваги за Хеммінгом для формування масивів даних, які мають однорідне енергоспоживання та спільну семантику з мінімальною кількістю відмінних елементів. Реалізація такого підходу уможливила підвищення точності прогнозу за рахунок кращого виявлення неявних закономірностей енергоспоживання мікропроцесорів при виконанні інструкцій або міжінструкційних переходів [3].

Отже, використання запропонованого методу та нового засобу вимірювання миттєвого струму споживання мікропроцесорів забезпечує вирішення завдання оцінювання енергоспоживання готових програмно-апаратних рішень при виконанні інструкцій щодо реалізації ІС тривалого функціонування в автономному режимі.

На основі результатів виконаних досліджень енергоспоживання мікропроцесорів запропоновано метод побудови моделі енергії споживання мікропроцесорів при виконанні інструкцій та міжінструкційних переходів. Він базується на використанні комплексу (каскаду)

штучних нейронних мереж, кожна з яких навчається на вибірці, яка охоплює результати точного миттєвого вимірювання енергії виконання інструкцій у декількох режимах або під час міжінструкційних переходів. Це дасть змогу прогнозувати енергію споживання у всіх (також і недосліджених експериментально) режимах або міжінструкційних переходах і, відповідно, значно скоротити обсяг необхідних експериментальних досліджень. Використання такого підходу підвищує ефективність застосування автономних інформаційних систем, що розширює можливості їх застосування при прийнятті рішень в сучасному динамічному інформаційному суспільстві.

### Література

1. Jackson, Joab. *IDC: Embedded systems market to double by 2015* IDC. Framingham, MA, USA : IDG News Service, 2011. September. URL [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.networkworld.com/news/2011/090911>
2. *Modeling Instruction-Level Parallelism for WCET Evaluation* / J. Barre, C. Landet, C. Rochange, P. Sainrat // 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, (RTCSA '06). – Sydney, Australia : IEEE Computer Society, 2006. – August, 16–18. – P. 61–67.
3. Проблеми побудови моделі енергоспоживання процесорного ядра / А. Боровий, О. Гавришок, В. Кочан, З. Домбровський // Труды десятой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» / Одеський Національний Політехнічний Університет. – Т. 1. Одеса : Політехперіодика. – 2009, 18–22 травня. – С. 157.
4. *Instruction-level Power Measurement Methodology [Text]: Deliverable: EASY/WP2/AUTH/DLP/D8/B1* / Aristotle University of Thessaloniki ; Executor: S. Nikolaidis, N. Kavvadias, Th. Laopoulos. Thessaloniki, Greece. – 2002. March, 4.
5. *Measurements Analysis of the Software-related Power Consumption in Microprocessors [Text]* / N. Kavvadias, P. Neofotistos, S. Nikolaidis [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2004. – August. – Vol. 53, no. 4. – P. 1106–1112.
6. Borovyi, Andrii. *Predicting Power Consumption of CPU's Core for Base Cost of Data Processing Instructions [Text]* / Andrii Borovyi, Volodymyr Kochan // Proceedings of the 2008 International Conference on Embedded Systems and Application (ESA '08). Las Vegas, NV, USA : CSREA Press, 2008. P. 47–51.
7. *Device for Measuring Instant Current Values of CPU's Energy Consumption [Text]* / A. Borovyi, V. Kochan, Z. Dombrovskyy [et al.] // Proceedings of the 5th international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS'2009). – Rende, Cosenza, Italy : IEEE, 2009. September, 21–23. – P. 126–130.
8. Боровий, А. Нейромережевий метод прогнозу енергоспоживання процесорного ядра при виконанні інструкцій опрацювання даних / А. Боровий, В. Кочан // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2009. – № 446. – С. 41–48.
9. *Improved Sorting Methodology of Data-processing Instructions [Text]* / A. Borovyi, V. Kochan, Th. Laopoulos, A. Sachenko // International Journal of «Computing». – 2011. – Vol. V. 1. – P. 50–55.
10. Пат. 90922 UA, МПК (2009) G05F 5/00 G01K 17/00. Пристрій вимірювання енергії імпульсних споживачів / А. Боровий, І. Майків, Р. Кочан, З. Домбровський, В. Кочан. – № а 2008 06325 ; заявл. 13.05.2008 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.