

## РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ З ЕНЕРГООБМЕЖЕНИМИ ВІДДАЛЕНИМИ МОДУЛЯМИ

*У роботі розроблено інформаційну та математичну моделі розподіленої комп'ютерної системи з енергообмеженими вимірювальними модулями. Здійснено оптимізацію енергоспоживання віддалених модулів за рахунок запропонованої ефективної диспетчеризації завдань. Розроблено програмний продукт, в якому реалізовані отримані положення. Проведений експеримент на базі віддалених п'єзоелектричних модулів показав переваги запропонованої в роботі оптимізації енергоспоживання розподілених комп'ютерних систем з енергообмеженими віддаленими модулями.*

**Ключові слова:** розподілені системи, енергообмежений віддалений модуль, енергоспоживання, диспетчеризація.

*В работе разработана информационная и математическая модели распределенной компьютерной системы с энергоограниченными измерительными модулями. Осуществлена оптимизация энергопотребления удаленных модулей за счет предложенной эффективной диспетчеризации задач. Разработан программный продукт, в котором реализованы полученные положения. Эксперимент на базе удаленных пьезоэлектрических модулей показал преимущества предложенной в работе оптимизации энергопотребления распределенных компьютерных систем с энергоограниченными удаленными модулями.*

**Ключевые слова:** распределенные системы, энергоограниченный удаленный модуль, энергопотребления, диспетчеризация.

*In this paper a mathematical and information model of distributed computer systems with energy-restricted remote modules were developed. Power consumption optimization of remote modules was done using efficient scheduling of tasks. A software product which got implemented theoretical provisions. Experiments based on remote piezoelectric modules showed the benefits of the proposed power optimization in the distributed computer systems with energy-restricted remote modules in solving random problems.*

**Key words:** distributed systems, energy-restricted remote module, power consumption, tasks scheduling.

### Вступ

Нині розробка сучасних електронних пристроїв вимагає великої уваги до аспекту їхньої енерго-ефективності, оскільки від цього залежить тривалість роботи пристроїв. Значимість цього фактора зростає з урахуванням того, що з'являються нові джерела живлення, такі як живлення від енергії вимірювального сигналу, хвилі радіофіри (наприклад, бездротова зарядка), а також у зв'язку з появою мікроконтролерів із низьким енергоспоживанням. Слід підкреслити, що це питання особливо актуальне в розподілених системах, таких як системи моніторингу різних середовищ, системи пожежної безпеки, інформаційно-вимірювальні системи, де розподілені модулі найчастіше мають автономне живлення, у зв'язку з

цим пошук більш ефективних рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання, займає одне з провідних місць у сучасних наукових дослідженнях.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує кілька підходів для підвищення енерго-ефективності даних систем. Аналіз різних джерел [1-7] дозволив сформулювати зведену таблицю основних особливостей різних підходів (таблиця 1). Але, незважаючи на те, що методи добре досліджені, вони мають кілька недоліків: ці підходи використовуються відокремлено один від одного; не враховується обмежене енергоспоживання віддалених модулів системи. Таким чином, **метою роботи** була розробка комплексної моделі розподілених комп'ютерних систем, яка враховує

обмеженість енергетичних ресурсів віддалених модулів.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: вирішити завдання диспетчеризації завдань для розподілених енергообмежених комп'ютерних

систем; оптимізувати енергоспоживання розподілених модулів; розробити комплексну (інформаційну та математичну) модель розподілених енергообмежених комп'ютерних систем.

Таблиця 1

Основні особливості різних підходів

Назва підходу	Переваги	Недоліки
Алгоритм динамічного масштабування частоти процесору (DVFS Scheduling Algorithms)	– Значно підвищує енергоефективність процесору при вирішенні випадкових задач. – Підвищує енергоефективність процесору при вирішенні періодичних задач	– Не враховуються можливі обмеження енергоспоживання віддалених модулів
Алгоритм динамічного масштабування частоти процесору на основі EDF підходу	– Значно підвищує енергоефективність процесору при вирішенні періодичних задач	– Не враховуються можливі обмеження енергоспоживання віддалених модулів. – Не такий ефективний при вирішенні випадкових задач
Рішення задачі диспетчеризації	Підвищення продуктивності системи, за рахунок ефективного планування та розподілу задач	– Не враховуються можливі обмеження енергоспоживання віддалених модулів

**Розробка комплексної математичної моделі розподіленої енергообмеженої комп'ютерної системи**

З урахуванням усіх значимих у процесі роботи комп'ютерних систем компонентів запропонована в роботі модель представлена у вигляді «сірого ящика» (рис. 1).

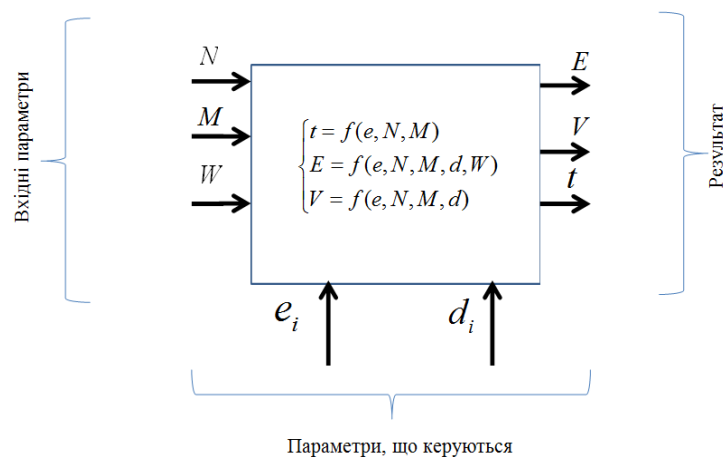


Рис. 1. Представлення системи у вигляді моделі «сірого ящика»

На вхід системи подаються параметри:

$N$  – кількість віддалених модулів,  $j = \overline{1, n}$ ;  
 $M$  – кількість завдань,  $i = \overline{1, m}$ ;  $W$  складається з  $W_j^{нак}$  – енергії, що накопилась;  $W_j^{поступ}$  – енергії, що отримана від сторонніх джерел (наприклад, джерел, що відновлюються);  $W_j^{комп}$  – енергоспоживання сторонніми електронними компонентами (АЦП, датчики, підсилювачі, тощо.);  $W_j^{проц}$  – енергоспоживання мікропроцесором.

Крім того, в систему подаються параметри завдань:  $e_i$  – час на виконання задачі;  $d_i$  – директивний строк. Оскільки ці параметри можуть корегуватися за межами системи, їх можна вважати параметрами, що керуються.

На виході системи будуть спостерігатися «цільові параметри»:  $W$  – енергоспоживання системи;  $t$  – час виконання системою входять завдань,  $V$  – продуктивність системи.

У свою чергу, відомі деякі співвідношення між вхідними та вихідними параметрами системи:

$$\begin{cases} t = f(e, N, M) \\ E = f(e, N, M, d, W) \\ V = f(e, N, M, d) \end{cases} \quad (1)$$

Для вивчення взаємозв'язків елементів системи в роботі використаний топологічний аналіз.

Визначимо систему у вигляді  $S = \{X, R\}$ , де  $X$  – множина елементів;  $R$  – деяке співвідношення між елементами. Визначимо для співвідношення  $R$  матрицю інцидентів  $r$ , яка влаштована за принципом «хто кому передає інформацію».

Якщо один елемент матриці має перевагу над іншим або другий передає інформацію першому, тобто відношення  $R$  виконується, то в клітку  $(i, j)$  записується 1; якщо ж співвідношення  $R$  не виконується, то в клітку  $(i, j)$  записується 0. Отже, Матриця інцидентів складається з нулів та одиниць (табл. 2). Матриця побудована на основі узагальненої інформації про структуру розподіленої системи з енергообмеженими віддаленими модулями [6-10].

Таким чином, інформаційну модель можна відобразити у вигляді орієнтованого графа (рис. 2), на якому використовуються такі позначення: Д – модуль диспетчеризації завдань; К – модуль-

координатор; ПЖ – підсистема живлення;  $ВМ_1.. ВМ_m$  – підсистема віддалених модулів.

Зважаючи на сформульовані завдання, для отримання математичної моделі необхідно отримати рішення для кожної задачі. На першому етапі, згідно з теорією роботи [12], вводиться обмеження безперервної роботи розподіленої системи.

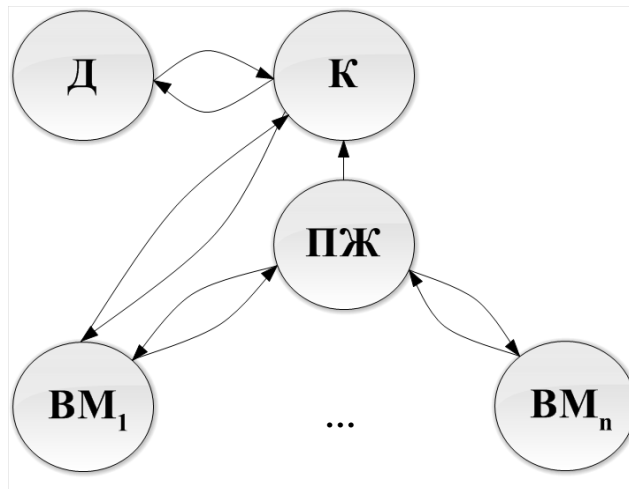
Для вирішення першого завдання слід сформулювати функцію мети: мінімізація максимального часу роботи вузла при виконанні завдання.

Цільова функція формується згідно з вимогами, що описані в роботі [2].

Таблиця 2

**Матриця інцидентів  $r$  для структури розподіленої системи з енергообмеженими віддаленими модулями**

	Модуль-координатор	Модуль диспетчеризації завдань	Підсистема живлення	Підсистема віддалених модулів
Модуль-координатор	0	1	1	1
Модуль диспетчеризації завдань	1	0	0	0
Підсистема живлення	1	0	0	1
Підсистема віддалених модулів	1	0	1	0



**Рис. 2.** Орієнтований граф взаємозв'язків елементів розподіленої системи з енергообмеженими віддаленими модулями

У зв'язку зі специфікою розглянутої системи, а саме автономним живленням віддалених модулів для виконання  $i$ -го завдання обирається модуль із максимальним запасом енергії. Таким чином вводиться обмеження:

$$W_j^{нак} = \max_{j=1}^n \{W_j^{нак}\}. \quad (2)$$

Для підвищення енергоефективності віддаленого модуля під час виконання  $i$ -го завдання сформулюємо функцію мети на основі підходу EDF (Earliest deadline first), суть якого полягає в такому виборі режиму роботи процесора, при якому запізнення завершення робіт буде мінімальним.

Режим роботи  $s_i$ , частота  $f_{ij}$  та енергоспоживання  $E_i$  процесора для  $i$ -ого

завдання обирається згідно з вимогами роботи [12].

Цільова функція – мінімізація енергоспоживання при виконанні  $i$ -ої роботи має вигляд:

$$C_j U_{ij}^2 f_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $C$  – динамічна ємність;  $U_{ij}$  – напруга на процесорі при виконанні  $i$ -ої роботи.

Під час дослідження експериментально було отримано ще одне обмеження: чим більша різниця між директивним терміном виконання  $i$ -ї роботи, тим ефективніше буде енергоспоживання  $j$ -им модулем:

$$|e_i - d_i| > 0, \quad (4)$$

Наступна необхідна умова: енергія, що споживається процесором при виконанні  $j$ -им модулем  $i$ -ої роботи, повинна бути не менше суми накопиченої енергії і тієї, що буде отримана (якщо така буде):

$$W_j^{nproc} \leq W_j^{нак} + W_j^{поступ}. \quad (5)$$

Оскільки в моделі «сірого ящика» присутній вихідний параметр продуктивності, скористаємося відомою формулою, підставляючи знайдену раніше частоту:

$$V = \sum_{i=1}^n f_{ij} \times N_{ij} \times I_{ij}, \quad (6)$$

де  $N_{ij}$  – кількість ядер, задіяних при вирішенні  $j$ -им модулем  $i$ -ої роботи;  $I_{ij}$  – кількість оброблюваної інформації при вирішенні при виконанні  $j$ -им модулем  $i$ -ї роботи.

Таким чином, математична модель розподілених систем із енергообмеженими віддаленими модулями буде мати вираз (7), де перша нерівність є умовою безперервної роботи системи, другий вираз – рішення задачі диспетчеризації розподілених систем

із енергообмеженими віддаленими модулями, третій і четвертий вираз є рішенням задачі оптимального енергоспоживання віддаленим модулем при виконанні завдань, п'ятий вираз є формулою продуктивності системи, шостий – описує множини завдань для виконання та віддалених модулів.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n (W_j^{нак} + W_j^{поступ} - W_j^{комн} - W_j^{nproc}) > 0, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \cdot t_{ij} \rightarrow \min, \text{ при } \sum_{i=1}^m x_{ij} \cdot V_i^{RAM} \leq V_j^{RAM}, W_j^{нак} = \max_{j=1}^n \{W_j^{нак}\}, \\ C_j U_{ij}^2 f_{ij} \rightarrow \min, \text{ при } f_{ij} = \min_{z=1}^y \{r_z \mid r_z \geq \max_{i=1}^n \{u_{ij}\}\} \times f_j^{\max}, |e_i - d_i| > 0, \\ W_j^{nproc} \leq W_j^{нак} + W_j^{поступ}, \\ V = \sum_{i=1}^n f_{ij} \times N_{ij} \times I_{ij}, \\ j = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (7)$$

### Експериментальні дані та їх обробка

У роботі із залученням студента комп'ютерного факультету Чорноморського державного університету ім. Петра Могили Жереги О. М. було розроблено програмне забезпечення на мові C++, за допомогою якого було перевірено адекватність розроблених моделей. Деякі з вікон програми показані на рис. 3.

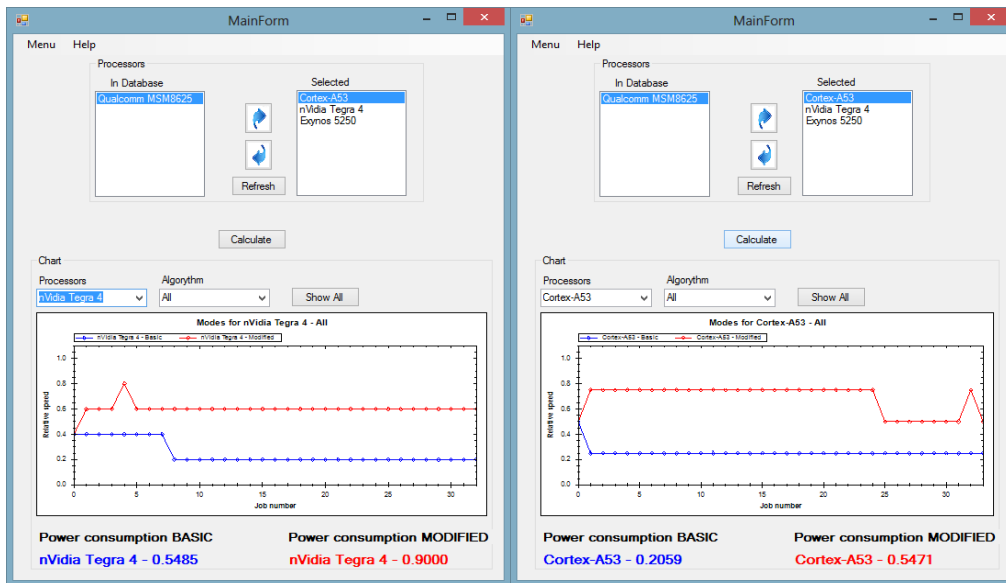


Рис. 3. Скріншоти вікон роботи розробленого програмного забезпечення

У прикладі за рис. 3 промодельовано роботу процесора при виконанні випадкових та періодичних задач при використанні математичної моделі оптимізації енергоспоживання при виконанні  $j$ -им модулем  $i$ -ої роботи та на основі алгоритму динамічного управління продуктивністю процесора. Через інтерфейс користувача розробленого програмного забезпечення було введено такі значення: кількість робіт – 25, кількість режимів роботи процесора – 5 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1). У ролі віддалених модулів було обрано п'єзодатчики з п'єзокерамічного елемента ЦТС-19

та пристроїв попередньої обробки інформації на базі Microstick for dsPIC33F Development Board. Як мікроконтролер застосовано обчислювальні ресурси Raspberry Pi (model B). Результати проведених вимірювань були попередньо занесені до бази даних розробленого програмного забезпечення.

На рис. 4 показано енергоспоживання системою (у мВт) при вирішенні потоку з 25 випадкових задач на 3-х модулях, при цьому енергоживлення знизилося приблизно на 6 %.

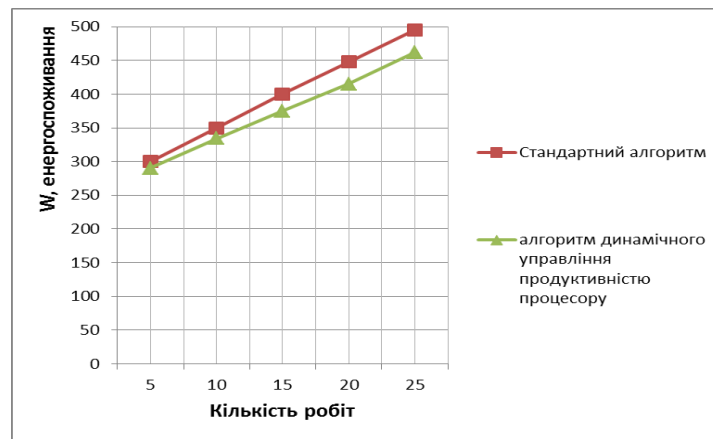


Рис. 4. Залежність енергоспоживання (у мВт) від кількості робіт при виконанні випадкових задач

### Висновки

Таким чином, у роботі розроблено інформаційну та математичну моделі розподіленої комп'ютерної системи з енергообмеженими вимірювальними модулями. Розроблено програмний продукт, в якому реалізовані отримані результати. Проведено

експеримент на базі віддалених п'єзоелектричних модулів, що показав переваги запропонованої в роботі оптимізації енергоспоживання розподілених комп'ютерних систем з енергообмеженими вимірювальними модулями при вирішенні випадкових задач.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Бумагин А. Методы снижения энергопотребления в строго самосинхронных микропроцессорных схемах [Электронный ресурс] / [А. Бумагин, Е. Гладкова, А. Гондарь, М. Куляс, А. Руткевич, В. Стешенко, М. Тайлеб, Г. Шишкин] // Электронный журнал компоненты и технологии. – Режим доступа : [http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2009\\_09\\_109.pdf](http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_09_109.pdf). – 02.04.2012 г.
2. Тягунова М. Ю. Методы диспетчеризации задач в распределенных компьютерных системах : автореф. дис. на получение научной степени канд. техн. наук : спец. 05.13.05 «Компьютерные системы и компонентны» / М. Ю. Тягунова. – Київ, 2010. – 18 с.
3. Kim J.-K. Dynamic resource management in energy constrained heterogeneous computing systems using voltage scaling [Text] / J.-K. Kim, H. J. Siegel, A. A. Maciejewski, R. Eigenmann // IEEE Trans. on Parallel and Distrib. Syst. – 2008. – Vol. 19 (11). – P. 1445–1457.
4. Kim K. H. Power Aware Scheduling of Bag-of-Tasks Applications with Deadline Constraints on DVS-enabled Clusters [Text] / K. H. Kim, R. Buyya, J. Kim // Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. – 2007. – P. 541–548.
5. Pering, T. The simulation and evaluation of dynamic voltage scaling algorithms / Pering, T., Bird, T., Brodersen, R. – ISLPED 1998. – P. 76–81.
6. Huang, S. Energy-Efficient Cluster Computing via Accurate Workload Characterization / Huang, S., Feng, W. – Proc. CCGRID'09 Proceedings of the 2009 9th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid. – P. 68–75.
7. Белоус А. И. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС [Текст] / А. И. Белоус, И. А. Мурашко, В. С. Сякерский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 2. – С. 39–44.
8. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа [Текст] / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1981. – 488 с.
9. Миротин Л. Б. Системный анализ в логистике [Текст] : учебник / Л. Б. Миротин, И. Э. Тышбаев. – М. : Экзамен, 2002. – 480 с.
10. Шарапов О. Л. Системный анализ [Текст] / О. Л. Шарапов, Л. Л. Терехов, С. П. Сіднев. – К. : Вища школа, 1993. – 303 с.
11. Волкова В. Н. Основы теории систем и системного анализа [Текст] : учебник / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – [изд. 2]. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.
12. Савинов В. Ю. Уменьшение энергопотребления распределённых компьютерных систем с энерго-ограниченными измерительными модулями / В. Ю. Савинов // Журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва», 2013. – № 6. – С. 56–61.

© Савинов В. Ю., 2014

Дата надходження статті до редколегії 14.06.2014 р.

**САВИНОВ Володимир Юрійович** – аспірант кафедри інформаційних технологій і програмних систем Чорноморського державного університету імені Петра Могили.

**Коло наукових інтересів:** інформаційні системи, бази даних.