

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ВУЗЛІВ СЕРВЕРНОГО КЛАСТЕРА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЕНЬ

© Глоба Л. С., Степурін О. В., 2017

Запропоновано підхід до формування енергетичних моделей обчислювальних вузлів серверного кластера, що полягає в індивідуальному визначенні залежностей енергоспоживання кожного вузла від його завантаженості та подальшому використанні методу інтерполяції поліномом канонічного вигляду для отримання шуканих функцій. Запропонований метод дає змогу точно сформувати енергетичні моделі з урахуванням індивідуальних особливостей для кожного окремого вузла.

Ключові слова: енергетична модель, енергоефективні обчислення, серверний кластер, енергоспоживання.

O. Stepurin, L. Globa

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

FORMATION OF SERVER CLUSTER NODES ENERGY CONSUMPTION MODELS FOR ENERGY EFFICIENT COMPUTING

© Stepurin O., Globa L., 2017

In this paper the approach of server cluster nodes energy models forming is described. The approach is based on idea of each node's power consumption from central processor utilization individual dependencies defining and further usage of interpolation by a canonical polynomial method for functions forming. The proposed approach allows to form accurate energy models taking into account their individual character for each node.

Key words: energy model, energy efficient computing, server cluster, energy consumption.

Вступ

Обсяги даних, що потребують оброблення, стрімко зростають останнім часом. Разом із обсягами підвищуються і вимоги до швидкості обчислень. Це спричиняє зростання загального енергоспоживання центрів обробки та зберігання даних. Частка потужності, що споживається центрами обробки даних, становить близько 1,5 % всього обсягу енергоспоживання у світі [1]. Проблематиці зменшення енергоспоживання центрів обробки та зберігання даних приділяється значна увага, зокрема у зв'язку із розвитком сучасних технологій обробки даних, таких як Cloud Computing, IoT, SDN-мереж тощо. Тому визначення підходів щодо підвищення енергоефективності обчислень в центрах обробки та зберігання даних є актуальним завданням.

Існує низка методів підвищення енергоефективності обчислень, серед яких виділяють підходи на рівні архітектури апаратного забезпечення (серверів), системного програмного забезпечення, прикладних програм [2]. Частина цих методів використовує енергетичні моделі серверів, тобто залежність їх енергоспоживання від завантаженості центрального вузла обробки (процесора), для аналізу та прийняття рішення щодо оптимізації обчислень за критерієм енергоефективності.

Сучасні методи підвищення енергоефективності обчислень застосовують аналітичне визначення енергетичної моделі сервера, подання її у графічному вигляді або набором точок, тобто

функція може бути подана в табличному вигляді. Функції енергоспоживання апроксимуються деякою функцією, що вважається однаковою для конкретного виду обчислювальних машин. На практиці це може не відповідати дійсності, оскільки залежність загального енергоспоживання сервера від його завантаженості визначається багатьма факторами. В цій статті запропоновано метод визначення енергетичних моделей обчислювальних машин (серверів) за допомогою їх попередньої індивідуальної атестації та подальшого формування індивідуальних залежностей енергоспоживання від завантаженості центрального процесора інтерполяцією функції поліномом канонічного вигляду. Запропонований метод дає змогу комплексно врахувати всі фактори, що впливають на загальне енергоспоживання обчислювальної машини, та якомога точніше визначити енергетичні моделі індивідуально для кожного сервера. У результаті уможливлється врахування реальних залежностей енергоспоживання обчислювальних машин центру обробки даних під час подальшого оптимального розподілу обчислень з метою підвищення їхньої енергоефективності.

Основні недоліки сучасних методів визначення енергетичних моделей серверів

Одним із методів визначення енергетичних моделей вузлів обробки даних (серверів) є аналітичний метод [3], який полягає у математичному моделюванні енергоспоживання кожної структурної одиниці сервера та їх сукупного врахування під час знаходження кінцевого результату.

На фізичному рівні найпростіша модель енергоспоживання поодинокого сервера виглядає наступним чином [4]:

$$E_{serv} = E_{cpu} + E_{memory} \quad (1)$$

У даному виразі враховано лише енергоспоживання основних компонентів сервера: E_{cpu} – енергоспоживання центрального процесора; E_{memory} – енергоспоживання пристроїв оперативної пам'яті.

Розглядаючи конструкцію сервера більш детально, враховують також енергоспоживання пристроїв вводу/виводу, пристроїв постійної пам'яті та мережевої карти ($E_{I/O}$, E_{disk} та E_{NIC} (NIC – Network Interface Card – мережева карта) відповідно) [4]. Тоді, вираз для визначення повного енергоспоживання матиме вигляд:

$$E_{total} = E_{cpu} + E_{memory} + E_{disk} + E_{I/O} + E_{NIC} \quad (2)$$

Наведений вираз для визначення енергоспоживання сервера дає змогу отримати лише наближений результат. Насправді фізичні ресурси сервера, такі як процесор, оперативна пам'ять, тощо, не використовуються постійно на 100%. Для точнішого математичного моделювання необхідно врахувати нерівномірність використання ресурсів. Оскільки параметр енергоспоживання є інтегральним значенням на основі базової формули $E = \int P dt$, для реальних систем спрощено можна вважати, що енергоспоживання є добутком значення середньої потужності електричного струму за період на час роботи системи:

$$E = \bar{P} \cdot T_{syst} \quad (3)$$

Тоді вираз (2) можна переписати так:

$$E_{total} = \bar{P}_{cpu} T_{syst} + \bar{P}_{memory} T_{syst} + \bar{P}_{disk} T_{syst} + \bar{P}_{I/O} T_{syst} + \bar{P}_{NIC} T_{syst}, \quad (4)$$

де T_{syst} – час роботи системи (сервера); \bar{P}_{cpu} , \bar{P}_{memory} , \bar{P}_{disk} , $\bar{P}_{I/O}$, \bar{P}_{NIC} – середні потужності споживання структурних елементів сервера за час його роботи відповідно.

Загальна потужність споживання сервера є сумою середніх потужностей споживання його структурних елементів [4]:

$$P_{total} = \bar{P}_{cpu} + \bar{P}_{memory} + \bar{P}_{disk} + \bar{P}_{I/O} + \bar{P}_{NIC}. \quad (5)$$

Для визначення середньої потужності споживання кожного елемента сервера необхідно врахувати фактичне використання елемента за проміжок часу, що досліджується. Введемо величину $u(t)$, що показує відсоток використання ресурсу за одиницю часу. Тоді:

$$\begin{aligned} P_{total}(t) &= C_{cpu} u_{cpu}(t) \Delta t + C_{memory} u_{memory}(t) \Delta t + C_{disk} u_{disk}(t) \Delta t + C_{I/O} u_{I/O}(t) \Delta t + C_{NIC} u_{NIC}(t) \Delta t = \\ &= \Delta t (C_{cpu} u_{cpu}(t) + C_{memory} u_{memory}(t) + C_{disk} u_{disk}(t) + C_{I/O} u_{I/O}(t) + C_{NIC} u_{NIC}(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

де $u(t)$ – ступінь використання фізичного ресурсу за час t ($0 < u_t < 1$); C_{cpu} , C_{memory} , C_{disk} , $C_{I/O}$, C_{NIC} – константи, що відображають максимальну потужність споживання структурних елементів сервера за одиницю часу.

Величину $u(t)$ можна вважати постійною у незначні проміжки часу Δt . Упродоаж великих проміжків значення цієї величини можуть коліватися. Тому справедливо стверджувати, що:

$$\frac{dP_{total}}{dt} = \sum_i C_i u_i(t),$$

де $C_i u_i$ – частка споживання i -го структурного елемента сервера.

За деякий проміжок часу T споживання потужності сервера становитиме:

$$P_{total,T} = \int_0^T \sum_i C_i u_i(t) dt = \sum_i \int_0^T C_i u_i(t) dt. \quad (7)$$

За точних розрахунків необхідно враховувати споживання потужності всіх структурних i -х елементів сервера. На практиці ступінь використання кожного ресурсу окремо є випадковою функцією часу. Усереднені розрахунки загальної потужності споживання можна виконати, знаючи розподіли випадкової величини u для кожного елемента.

Основним недоліком аналітичного методу визначення енергетичних моделей споживання серверів кластера є те, що для всіх окремих споживачів електроенергії у складі комп'ютера ступінь їх використання у той чи інший момент часу є величиною випадковою. Крім того, для точного визначення енергоспоживання необхідно прорахувати моделі для кожного структурного елемента сервера. Такі розрахунки доволі громіздкі та не дають остаточно правильного результату. Однак головне те, що громіздкі обчислення істотно збільшуватимуть час оброблення обчислювальних потоків.

Іншим широкозастосовуваним методом є апроксимація функції енергоспоживання усіх серверів певною функцією відомого вигляду. У роботах [5], [6] та [7] запропоновано відповідно апроксимацію прямою, ламаною та кривою, опорні точки яких отримано експериментально (рис. 1).

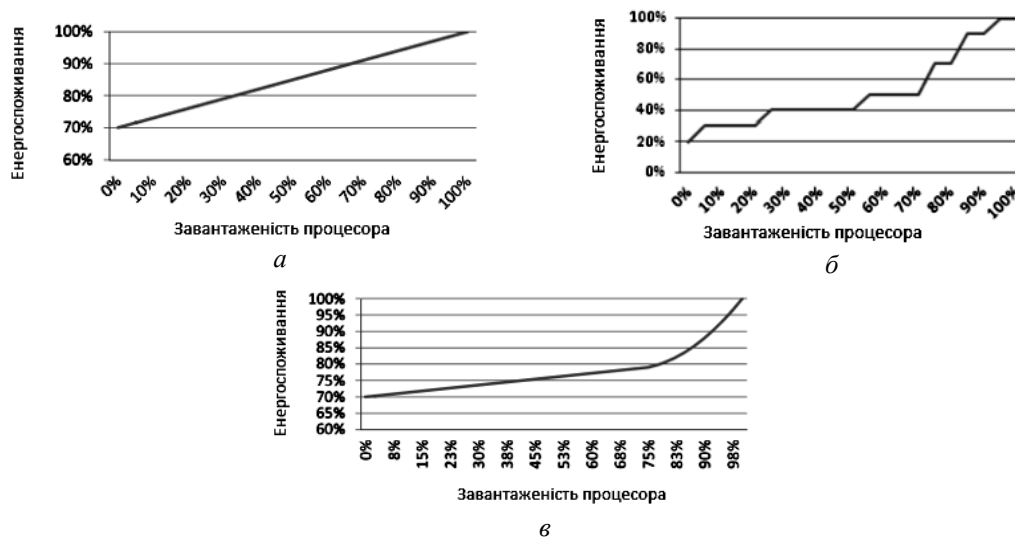


Рис. 1. Енергетичні моделі обчислювальних вузлів, отриманих апроксимацією: а – прямою; б – ламаною; в – плавною кривою

Цей метод дає змогу отримати вигляд залежності лише із деяким наближенням. Основним недоліком такого методу визначення енергетичних моделей є те, що функція вважається спільною для всіх обчислювальних вузлів подібного типу. На практиці залежність енергоспоживання від завантаженості вузла може різнитися від сервера до сервера і залежати від багатьох факторів (як технічних параметрів обчислювальної машини, так і її віку, умов навколишнього середовища тощо).

Метод формування енергетичних моделей обчислювальних вузлів центру обробки даних

Запропонований метод формування енергетичних моделей обчислювальних вузлів центру обробки даних передбачає індивідуальне визначення залежностей енергоспоживання вузлів від їх завантаженості та максимальне наближення функцій енергоспоживання до вигляду реальних залежностей.

Формулювання задачі: розглянемо серверний кластер як структурну одиницю центру обробки даних, що являє собою групу обчислювальних машин (вузлів кластера), з'єднаних високопродуктивними каналами зв'язку. Нехай серверний кластер містить N вузлів. Для підвищення енергоефективності обчислень доцільне активніше завантаження машин із вищими показниками енергоефективності. Це потребує визначення якомога точніших енергетичних моделей вузлів кластера для подальшого оцінювання енергоспоживання серверів залежно від характеру вхідного навантаження.

Вхідні дані: серверний кластер містить N вузлів, різних за технічними параметрами. Використання обчислювального ресурсу кожного сервера позначимо величиною CPU (від англ. *central processor utilization*) з областю значень від 0 до 1 (або від 0 до 100 %). Нехай завантаженість вузлів CPU має M дискретних значень (у загальному випадку $M \rightarrow \infty$).

Вихідні дані: функції $P = f(CPU)$, де P – потужність споживання сервера для кожного вузла кластера.

Формування функцій запропонованим методом

Згідно із запропонованим у цій статті підходом, залежності енергоспоживання серверів кластера від завантаженості їх компонентів, зокрема центрального процесора, визначаються індивідуальною попередньою атестацією кожного вузла кластера. Під час попередньої атестації значення потужності споживання визначають безпосередньо у колі живлення кожного сервера. Для цього у коло живлення вмикається мультиметр. Так знаходять діюче значення струму та напруги у колі живлення. Вибірка, отримана безпосереднім вимірюванням, підлягає статистичній обробці. Кінцевий результат подається у вигляді:

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x)_\alpha; \delta\% = \frac{\Delta x}{\bar{x}} * 100 \%,$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення вимірюваної величини (напруги або струму відповідно); Δx – абсолютна похибка за формулою розподілу Стюдента; $\delta\%$ – відносна похибка у відсотках.

Після визначення середніх значень струму та напруги у колі живлення конкретного сервера (за сталої завантаженості центрального процесора) обчислюють потужність споживання сервера за досліджуваної завантаженості центрального процесора за базовою формулою:

$$P = \bar{U} \cdot \bar{I},$$

де \bar{U} та \bar{I} – обчислені значення напруги та струму відповідно.

Результатом обчислень є матриця розмірністю M на N , номери стовпців якої відповідають номерам досліджуваних серверів, а рядки – ступеню завантаженості центрального процесора, за яких проводяться вимірювання (на практиці кількість значень M необхідно обмежити, здійснюючи вимірювання із деяким дискретним кроком k величини CPU).

$$\begin{array}{l} \text{Завантаженість CPU 0\%} \\ \vdots \\ \text{Завантаженість CPU 100\%} \end{array} \begin{array}{ccc} \text{Сервер 1} & \dots & \text{Сервер N} \\ \left(\begin{array}{ccc} P_{11} & \dots & P_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & \dots & P_{MN} \end{array} \right) \end{array}$$

Аналогічні розрахунки виконують для всіх N серверів кластера за всіх M ступенів навантаження центрального процесора.

Для визначення функціональних залежностей енергоспоживання серверів від завантаженості їх центрального процесора можна застосувати метод найменших квадратів як один із найзастосовніших методів регресійного аналізу або метод інтерполяції функції $P(CPU)$, що визначена в M точках, деякою функцією $g(x)$.

Застосування методу найменших квадратів для формування функцій

Нехай у точках x_n незалежної змінної x отримані виміри Y_n . У межах дослідження, що проводиться у роботі, незалежними змінними є ступені завантаженості центрального процесора $x_i = CPU_i$, залежними змінними є значення потужності споживання досліджуваного вузла кластера за навантаження x_i . Потрібно знайти залежність середнього значення величини \bar{Y} від величини x , тобто:

$$\bar{Y} = f(x|a),$$

де a – вектор невідомих параметрів a_i .

Розглянемо випадок застосування методу найменших квадратів для чотирьох точок (x, y) , де x – завантаженість процесора у частках від одиниці (від 0 до 1), y – потужність споживання j -го сервера, Вт. Нехай значення експериментально отриманих точок $(0,25; 94)$, $(0,5; 102)$, $(0,75; 115)$, $(1; 127)$ (для простоти розрахунків вибрана невелика кількість точок. Зі збільшенням кількості точок M точність застосування методу зростає).

Завдання регресійного аналізу в цьому випадку – пошук функції, що найточніше описує залежність змінної y від змінної x за заданими значеннями в окремих точках. Інакше кажучи, треба знайти такі числа β_1 та β_2 , що дають приблизний роз’язок надвизначеної системи:

$$\begin{cases} \beta_1 + 0,25\beta_2 = 94 \\ \beta_1 + 0,5\beta_2 = 102 \\ \beta_1 + 0,75\beta_2 = 115 \\ \beta_1 + 1\beta_2 = 127. \end{cases}$$

Підхід найменших квадратів до вирішення цієї проблеми полягає у спробі зробити якомога меншою суму квадратів похибок між правою і лівою сторонами цієї системи, тобто необхідно знайти мінімум функції:

$$S(\beta_1, \beta_2) = [94 - (\beta_1 + 0,25\beta_2)]^2 + [102 - (\beta_1 + 0,5\beta_2)]^2 + [115 - (\beta_1 + 0,75\beta_2)]^2 + [127 - (\beta_1 + 1\beta_2)]^2$$

Мінімум визначимо через обчислення часткової похідної від $S(\beta_1, \beta_2)$ щодо β_1 та β_2 і прирівняємо їх до нуля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \beta_1} = 0 &= 8\beta_1 + 5\beta_2 - 876 \\ \frac{\partial S}{\partial \beta_2} = 0 &= 5\beta_1 + 3,75\beta_2 - 575,5 \end{aligned}$$

Це приводить до системи з двох рівнянь і двох невідомих, які називають нормальними рівняннями:

$$\begin{cases} 8\beta_1 + 5\beta_2 = 876 \\ 5\beta_1 + 3,75\beta_2 = 575,5 \end{cases}$$

Розв’язавши їх, отримуємо:

$$\beta_1 = 81,5$$

$$\beta_2 = 44,8$$

Наведені розрахунки дають змогу отримати рівняння прямої, що найточніше проходить через задані в умові точки. Це пряма:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x = 81,5 + 44,8x$$

Графічний вигляд знайденої функції подано на рис. 2. Точками зображено вихідні дані до розрахунків.

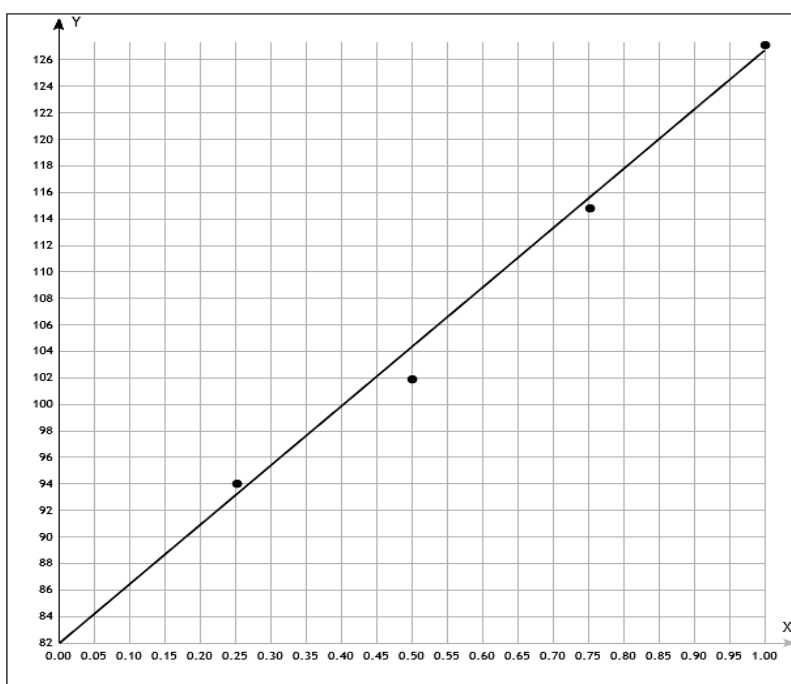


Рис. 2. Енергетична модель, отримана методом найменших квадратів після індивідуального визначення опорних точок

Для цього випадку мінімальна сума квадратів похибок становить: $S(81,5; 44,8) = 5,8$.

Використання лінійного методу найменших квадратів дає змогу отримати загальний вигляд залежності, проте не забезпечує достатньої точності моделі. Цей метод доцільно використовувати лише у випадку, коли вигляд моделі має бути якомога простішим. Для отримання точнішого та наближенішого до реальності вигляду моделі доцільніше використовувати методи інтерполяції.

Застосування методу інтерполяції канонічним поліномом для формування функцій

Нехай на відрізку $[a, b]$ задана функція $f(x)$ (у цьому випадку функція $P = f(CPU)$), що визначена на відрізку від 0 до 1). Завдання інтерполяції полягає у побудові функції $g(x)$, такої, що збігається із заданою $f(x)$ у деякому наборі точок $\{x_1, x_2, \dots, x_{n+1}\}$ з відрізка $[a, b]$. Ці точки називаються вузлами інтерполяції. В цьому випадку повинні виконуватись такі вимоги:

$$g(x_k) = y_k, \quad k = 1, 2, \dots, n + 1,$$

де y_k – відомі значення функції $f(x)$ в точках x_k . Функція $g(x)$ називається інтерполянтом функції $f(x)$:

$$g(x) = \sum_{k=1}^{n+1} a_k \varphi_k(x)$$

Візьмемо для прикладу значення функції у тих самих точках, що і в разі застосування методу найменших квадратів: (0,25; 94), (0,5; 102), (0,75; 115), (1; 127).

Згідно з методом інтерполяції поліномом канонічного вигляду, складемо систему алгебраїчних рівнянь з $M-1$ рівнянь (інтерполяція поліномом ступеня $M-1 = 3$):

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 = y_1 \\ a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 = y_2 \\ a_0 + a_1x_3 + a_2x_3^2 + a_3x_3^3 = y_3 \\ a_0 + a_1x_4 + a_2x_4^2 + a_3x_4^3 = y_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_0 + 0,25a_1 + (0,25)^2a_2 + (0,25)^3a_3 = 94 \\ a_0 + 0,5a_1 + (0,5)^2a_2 + (0,5)^3a_3 = 102 \\ a_0 + 0,75a_1 + (0,75)^2a_2 + (0,75)^3a_3 = 115 \\ a_0 + 1a_1 + (1)^2a_2 + (1)^3a_3 = 127 \end{cases}$$

Розв'язком цієї системи є значення:

$$\begin{cases} a_0 = 97 \\ a_1 = -42 \\ a_2 = 136 \\ a_3 = -64 \end{cases}$$

Отже, отримано функцію інтерполянт у вигляді канонічного полінома

$$g(x) = 97x^0 - 42x^1 + 136x^2 - 64x^3.$$

Графічно цю функцію зображено на рис. 3.

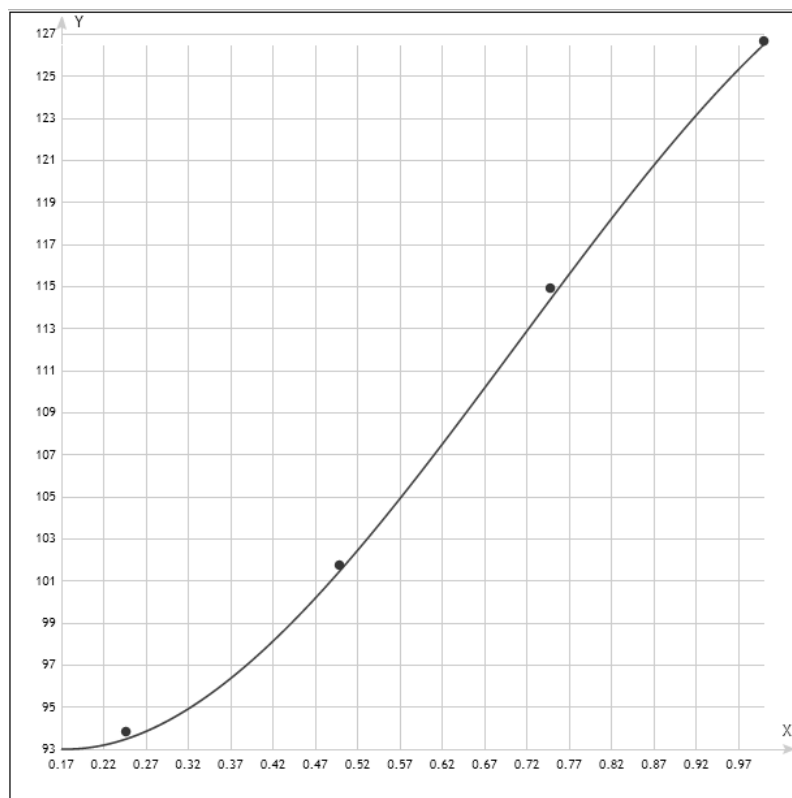


Рис. 3. Енергетична модель, отримана методом інтерполяції поліномом канонічного вигляду після індивідуального визначення опорних точок

Як видно з графіка, навіть за низьких ступенів полінома (і відповідно великого кроку завантаженості процесора під час вимірювання енергоспоживання) використання методу інтерполяції функції поліномом ступеня $M-1$ дає доволі точний результат.

Отже, застосування підходу індивідуального визначення енергетичних моделей вузлів із використанням методу інтерполяції поліномом канонічного вигляду для формування функції дає змогу отримати точні залежності енергоспоживання від завантаженості для кожного вузла обчислювального кластера окремо. Крім того, складність виконаних підрахунків значно нижча, ніж у випадку застосування аналітичного методу (немає необхідності окремо визначати енергоспоживання структурних одиниць сервера, а алгоритм інтерполяції простий та широко реалізований у програмних засобах). Використання отриманих точних енергетичних моделей збільшує ефективність подальшого використання підходів до підвищення енергоефективності обчислень, що застосовують одержані моделі.

Висновок

Огляд методів формування енергетичних моделей обчислювальних вузлів серверного кластера з метою підвищення енергоефективності обчислень показав, що аналітичні методи доволі громіздкі та не дають остаточно правильного результату, крім того, через наявність громіздких обчислень суттєво збільшують час оброблення обчислювальних потоків.

Методи апроксимації функції енергоспоживання іншою відомою функцією дають змогу отримати вигляд залежності лише із деяким наближенням, визначають енергетичні моделі, але така функція вважається спільною для всіх обчислювальних вузлів подібного типу, що не відповідає реальному процесу обчислень в центрі обробки даних, де залежність енергоспоживання від завантаженості вузла може різнитися від сервера до сервера і залежати від багатьох факторів.

У статті запропоновано метод формування енергетичних моделей обчислювальних вузлів серверного кластера як структурної одиниці центру обробки даних на основі індивідуально визначених залежностей енергоспоживання вузлів від їхньої завантаженості з максимальним наближенням функцій енергоспоживання до вигляду реальних залежностей.

Цей метод дає змогу формувати точні енергетичні моделі вузлів з метою їх подальшого використання для підвищення енергоефективності обчислень, які виконуються в центрі обробки даних, що одночасно підвищить продуктивність оброблення потоків задач.

1. Koomey J. G. *Worldwide electricity used in data centers* / J. Koomey // *Environmental Research Letters*, vol. 3, no. 3, p., 2008. 2. Möbius C. *Power Consumption Estimation Models for Processors, Virtual Machines, and Servers* / Christoph Möbius, Walteneus Dargie, Alexander Schill // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 25, no. 6, June 2014. 3. Warkozek G. *A new approach to model energy consumption of servers in Data Centers* / Ghaith Warkozek, Elisabeth Drayer, Vincent Debusschere, Seddik Bacha // *ICIT 2012*, 2012. 4. Dayarathna M. *Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey* / Miyuru Dayarathna, Yonggang Wen, Senior Member, IEEE, and Rui // *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, VOL. 18, NO. 1, FIRST QUARTER 2016. 5. Beloglazov A. *Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing* / A. Beloglazov, J. Abawajy, and R. Buyya // *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 28, no. 5. P. 755–768, May 2012. 6. Luo J. *Hybrid shuffled frog leaping algorithm for energy-efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers* / J. Luo, X. Li, and M. Chen // *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 13. P. 5804–5816, Oct. 2014. 7. Gao Y. *An Energy and Deadline Aware Resource Provisioning, Scheduling and Optimization Framework for Cloud Systems* / Y. Gao, Y. Wang, S. K. Gupta and M. Pedram // in *Proceedings of the Ninth IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, Piscataway, NJ, USA, 2013*. – P. 31:1–31:10.