

## ОРГАНІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ В БАГАТОЕТАПНИХ СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

© Скулиш М. А., Суліма С. В., 2015

Розглянуто проблеми систем з кількома етапами, кількома типами ресурсів, кількома типами сервісів. Представлено метод динамічного управління ресурсами для багатоетапних систем, що використовує гнучку аналітичну модель для визначення кількості ресурсів, яку необхідно виділити для кожного етапу системи.

Ключові слова: хмарні обчислення, багатоетапна система, система масового обслуговування, виділення ресурсів

M. A. Skulysh, S. V. Sulima  
National Technical University of Ukraine  
“Kiev Polytechnic Institute”

## MANAGEMENT OF MULTIPLE STAGE QUEUING SYSTEMS

© Skulysh M. A., Sulima S. V., 2015

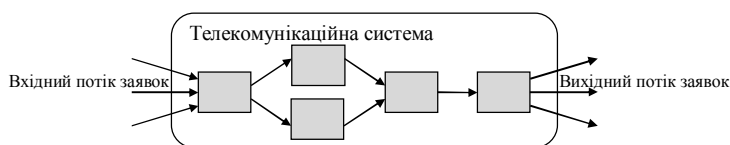
The problem of growth of the mobile data traffic and the number of services becomes global, moreover, volume and frequency of control traffic transmitted through the network are increasing, and therefore there is a need for its effective management to ensure the quality of service required by users and optimal use of mobile network resources. In such circumstances, the load on the server that is created in the process of establishing the connection and its serving has its considerations. Wide range of modern information communication systems implies stagewise processing of incoming requests. In response to a request such systems perform a sequence of data processing actions, including, in general, number of steps. Likewise the billing system of mobile telecommunication operator involves performing succession of operations. Each service provided by the operator or service provider to the customers is charged using a distinct scheme, thus a billing system is a bottleneck in the service provisioning. This paper is devoted to the problems of multiple stage multiple resource multiple service systems. Dynamic resource provisioning in multi-stage systems is a useful technique for handling the variations seen in communication systems workloads. Virtualization technology allows to implement this approach. It is non-trivial to extend provisioning mechanisms designed for single-stage scenarios to multi-stage scenarios. Classical approaches may merely shift the bottleneck to another downstream stage. For another thing, in the networks various stages may be located on the same physical machine, and thus it is necessary to consider a common pool of the resources. An analytic model of a system would be attractive as it would be able to evaluate system characteristics under a wide range of conditions, and to be computed comparatively easily. It is also can incorporate numerical optimization techniques for system design. Moreover, there is a need in formulation and solving of the multi-criteria problem of resource allocation among different nodes with consideration for beside the failure probability other criteria – such as the cost of utilization of additional amount of resources (i.e. cost of activation of the additional server) or benefit from the certain service provisioning and so on. In this paper we argue that dynamic provisioning of multi-stage information communication systems raises new challenges not addressed by prior work on provisioning single-stage systems. An extended dynamic provisioning technique for

**multi-stage multi-resource multi-service systems that employs a flexible queuing model to determine how much resources to allocate to each stage of the system is proposed. The whole system is modelled as sequence of multidimensional Markov chains. Since the numerical evaluation of the closed-form failure probability in such system will become numerically intractable for a large number of traffic classes, a simpler approximate method of calculation for the state probabilities of the traffic model described is used. To evaluate the proposed technique Mathcad system is used. The effectiveness of the method is confirmed by simulation example for the system with two service types, two resource types and three stages. The proposed model is very general and can be used for analysis of different systems.**

**Key words: cloud computing, multi-stage system, queuing system, resource allocation**

### Вступ

Найширший спектр сучасних інформаційних систем масового обслуговування передбачає поетапну обробку запитів (рис. 1), а система тарифікації оператора мобільного зв'язку – виконання певних операцій. Різноманітність послуг та випадковість процесу надходження заявок на їх тарифікацію робить білінгову систему вузьким місцем.



*Рис. 1. Системи багатоступінчастої обробки інформації*

Існують різні підходи до управління кількістю виділених ресурсів для кожної підсистеми: фіксовані та адаптивні. Сьогодні все більшої популярності набуває використання віртуальних серверів, які легко налаштовуються під зміну навантаження та дозволяють реалізувати адаптивний підхід. Процес управління ресурсами є складним завданням через коливання робочого навантаження. Однак багато навантажень в датацентрах зазвичай мають періодичні шаблони, проте виникатимуть і відхилення від історичних моделей через непередбачені фактори, такі як пікові навантаження тощо [1]. Через мінливість навантаження, що зазнають сучасні системи, розміщення віртуальних машин повинно постійно в режимі реального часу оптимізуватись [2]. Враховуючи труднощі у прогнозуванні пікових навантажень, система повинна використовувати комбінацію динамічного надання ресурсів та управління запитами, щоб вчасно відреагувати на зміни навантаження [3]. Зрештою, надання ресурсів не є безкоштовним [1]; існують різні пов'язані з цим витрати і ризики. Часте виконання процедури надання ресурсів спричиняє втрати і продуктивності, й енергії. Часті періодичні вмикання та вимикання потужності серверів викликають “зношення”, що може призвести до відмови сервера і перебоїв у обслуговуванні. Тому провайдери мають справу з компромісом щодо енергоефективності – мінімізацією споживання енергії з одночасним забезпеченням SLA (Service Level Agreement) [2].

Динамічне надання ресурсів – виділення і звільнення серверів для програм – вивчалось в контексті програм одного рівня, тоді як у процесі вивчення багаторівневих прикладних програм Інтернету увага зосереджувалась на питаннях управління доступом для підтримки цільового часу відповіді, але задачі виділення ресурсів не розглядалися. Розширення механізмів виділення ресурсів, розроблених для обслуговування сервісів в один етап, на багаторівневі сценарії є нетривіальною задачею. Класичні підходи можуть просто змістити вузьке місце на інший рівень [3]. Водночас, як правило, вивчають системи з єдиним типом ресурсів. Задачі розподілу ресурсів у системах багатоступінчастої обробки розглядаються переважно для інтернет-систем, тоді як такі задачі виникають в різних сферах, зокрема в процесі роботи серверів оператора мобільного зв'язку. В більшості робіт етапи розглядаються незалежно або з незалежними пулами ресурсів [3, 4]. Проте в мережах різні етапи можуть розміщуватись на одній фізичній машині. В таких випадках необхідно розглядати загальний пул ресурсів, і виникає додаткова задача – задача оптимального розподілу загальних ресурсів між різними етапами.

Зауважимо, що доцільніше застосовувати одноразове прийняття рішення про доступ під час надходження запиту. Таке одноразове рішення допомагає уникнути втрат ресурсів у результаті частково обслужених запитів, які можуть бути втрачені на пізніших рівнях.

Значну кількість досліджень здійснено з використанням теорії масового обслуговування для моделювання. Через труднощі в математичному моделюванні складних характеристик трафіку (наприклад, багатоетапної обробки заявок) більшість досліджень в літературі виконано з використанням імітаційного моделювання. Наприклад, робота, виконана в [5], ґрунтується на імітаційній моделі. Однак ретельна реалізація кожної деталі конкретної системи збільшує складність моделі і знижує ефективність, і така модель, як правило, може бути застосована лише в дуже обмежених ситуаціях. Отже, аналітична модель системи буде привабливою, оскільки вона зможе оцінити характеристики системи в широкому діапазоні умов за допустимий час, дозволить застосовувати під час проектування системи методи числової оптимізації.

Актуальною є задача побудови аналітичної моделі системи з кількома типами послуг, кількома типами використовуваних ресурсів та кількома етапами обслуговування запитів, особливо у сфері мобільних мереж зв'язку. Скотт Джордан ввів метод моделювання систем з багатьма типами сервісів та ресурсів у [6]. У статті модифіковано та розширено запропонований метод для задачі багатоетапного виділення ресурсів та застосовано його для управління дата-центром оператора мобільного зв'язку.

### Модель системи

Нехай кожному сервісу потрібна певна кількість ресурсів мережі. Такими ресурсами можуть бути канали зв'язку, оперативна пам'ять, процесорний час, дисковий простір. Нехай  $K$  – це кількість вузлів системи. Змоделюємо систему як  $K$ -вимірний ланцюг Маркова, стан якого визначається так:  $Z=(Z^1, \dots, Z^K)$ , де  $Z^j$  позначає стан вузла  $j$ .

Кожен вузол з ланцюга функціональних блоків (рис. 2), який обробляє заявку, моделюється так, як показано на рис. 2. Інтенсивність надходження заявок на кожен наступний блок розраховується як інтенсивність надходження заявок на попередній блок, помножена на ймовірність успішного обслуговування заявки цим попереднім блоком.

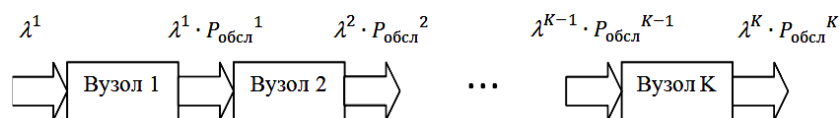


Рис. 2. Модель системи

Коли ми моделюємо систему онлайн-тарифікації, передбачається, що характер надходження заявок на тарифікацію визначається характером ініціалізації викликів абонентами телекомунікаційної мережі. У класичному випадку такий характер відповідає пуассонівському потоку. Дисципліни обслуговування окремих типів сервісів передбачають відправлення повторних заявок на тарифікацію через заданий інтервал часу, однак, оскільки кількість заявок, які одночасно надходять на обслуговування, велика, то в моделі повторні заявки на тарифікацію розглядаються як нові, оскільки проходять однакову процедуру обслуговування.

Розглянемо систему з  $n$  типами сервісів. Для обробки кожному сервісу потрібна множина з  $m$  типів ресурсів. Заявки на обслуговування надходять як незалежні пуассонівські потоки. Кожна заявка займає необхідну кількість заданого ресурсу на випадковий однаково розподілений проміжок часу, що має експоненційний розподіл і не залежить від інших значень часу обслуговування. Ми моделюємо цю систему як ланцюг Маркова і використовуємо такі позначення. Для вузла  $j, j=1, 2, \dots, K$ :

$A^j$  – матриця розміром  $(m \times n)$ , де у стовпці  $i$  визначено кількість кожного з  $m$  типів ресурсів, що потребує сервіс  $i$ ;

$b^j$  – вектор довжиною  $m$ , що визначає кількість ресурсів кожного типу в системі;

$I^j = (I_1^j, \dots, I_n^j)$ , інтенсивності надходження заявок на обслуговування;

$m^j = (m_1^j, \dots, m_n^j)$ , інтенсивності обслуговування;

$r^j = (r_1^j, \dots, r_n^j)$ , навантаження, визначається як  $r_i^j = \lambda_i^j / m_i^j$ ;  
 $x^j = (x_1^j, \dots, x_n^j)$ , стан системи, де  $x_i^j$  – кількість заявок типу  $i$ , що оброблюються системою;  
 $Z^j = \{x^j \mid A^j x^j \leq b^j\}$ , тобто  $x^j$  заявок можуть одночасно оброблюватись доступними ресурсами;  
 $F_i^j = \{x^j \mid x^j \in Z^j \text{ but } (x_1^j, \dots, x_i^j + 1, \dots, x_n^j) \notin Z^j\}$ , повна множина типу сервісу  $i$ , тобто підмножина станів множини  $Z^j$ , таких, що надходження заявки типу  $i$  спричинить її відкидання;  
 $E_i^j = \{x^j \mid x^j \in Z^j \text{ but } (x_1^j, \dots, x_i^j - 1, \dots, x_n^j) \notin Z^j\}$ , порожня множина для сервісу типу  $i$ ;  
 $\pi(x)$  – стаціонарні ймовірності.

Припущення стосовно процесів надходження та обслуговування дають ланцюг Маркова з простором станів  $Z^j$  з інтенсивностями переходів:

$$r_{xy}^j = \begin{cases} I_i^j, & \text{if } x \notin F_i^j \text{ and } y = (x_1^j, \dots, x_i^j + 1, \dots, x_n^j) \\ x_i^j m_i^j, & \text{if } x \notin E_i^j \text{ and } y = (x_1^j, \dots, x_i^j - 1, \dots, x_n^j) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

Ланцюг Маркова зворотний і має добре відому форму стаціонарного розподілу:

$$p^j(x) = p^j(0) \prod_{i=1}^n \frac{(r_i^j)^{x_i^j}}{x_i^j!}, \quad p^j(0) = \frac{1}{\sum_{x^j \in Z^j} \prod_{i=1}^n \frac{(r_i^j)^{x_i^j}}{x_i^j!}}. \quad (2)$$

Використовуючи отриманий стаціонарний розподіл, ймовірність успішного обслуговування  $P_i^j$  на вузлі  $j$  для сервісу  $i$  можна обчислити як:

$$P_i^j = 1 - \sum_l p_l^j(x), \text{ where } l = \{x^j \mid x^j \in F_i^j\}. \quad (3)$$

Інтенсивність надходження заявок на обслуговування для вузла  $j$ ,  $j=2, \dots, K$  можна виразити як:  $I^j = (I_1^{j-1} P_1^{j-1}, \dots, I_n^{j-1} P_n^{j-1})$ .

Оскільки числовий розрахунок добутків стане нерозв'язним для великої кількості класів трафіку, можна застосовувати простіші рекурсивні або приблизні методи розрахунку ймовірностей станів моделі.

Моделювання запропонованого вище методу проведено в системі Mathcad з використанням числової процедури з [7], що основана на принципі укрупнення станів, для знаходження стаціонарного розподілу. Алгоритм запропонованої процедури передбачає наявність двох типів сервісів у системі й міститиме наведені нижче кроки для знаходження стаціонарного розподілу на кожному вузлі системи обслуговування, що розглядається.

Крок 1. Розглядається розщеплення фазового простору станів  $Z^j$  за значеннями другої компоненти:  $Z^j = \bigcup_{g=0}^d Z_g^j, Z_g^j \cap Z_{g'}^j = \emptyset, g \neq g'$ .

$$Z_g^j = \{(f, g) \in Z^j : f = \overline{0, c}\}, \quad g = \overline{0, d},$$

$$c = \max_c x_1^j, \quad C = \{x_1^j \mid x^j \in Z^j \wedge x_2^j = g\}, \quad d = \max_D x_2^j, \quad D = \{x_2^j \mid x^j \in Z^j\}.$$

Крок 2. Всі мікростани з підкласу  $Z_g^j$  об'єднуються в один укрупнений стан  $\langle g \rangle$ ,  $g=0, 1, \dots, d$ .  
Всі такі укрупнені стани утворюють укрупнену модель з простором станів  $Z^{\%j} = \{\langle g \rangle : g = \overline{0, d}\}$ .

Крок 3. Знаходять стаціонарний розподіл всередині розщеплених класів  $Z_g^j$ ,  $g=0, 1, \dots, d$ .

Стаціонарну ймовірність стану  $(f, g)$  усередині класу  $Z_g^j$  можемо визначити за допомогою формули Ерланга:

$$ps^g(f) = \frac{\frac{(r_1^j)^f}{f!}}{\sum_f \frac{(r_1^j)^f}{f!}}, f = 0, 1, \dots, c. \quad (4)$$

Крок 4. Знаходять елементи породжуючої матриці  $Q=q(\langle g \rangle, \langle g' \rangle)$  – укрупненої моделі. Елементи породжуючої матриці визначаємо як:

$$q(\langle g \rangle, \langle g' \rangle) = \sum_{\substack{(f,g) \in Z_g^j \\ (f',g') \in Z_{g'}}} q((f,g), (f',g')) ps^g(f), \quad (5)$$

де  $q((f,g), (f,g+1)) = r_2^j/g$ .

Крок 5. Визначається стаціонарний розподіл укрупненої моделі  $\pi(\langle g \rangle)$ ,  $g=0, 1, \dots, d$ , де  $\pi(\langle g \rangle)$  означає стаціонарну ймовірність стану  $\langle g \rangle$ .

При цьому укрупнена модель являє собою одновимірний ланцюг з породжуючою матрицею  $Q$ . Стаціонарну ймовірність станів укрупненої моделі визначаємо за допомогою таких виразів:

$$\begin{aligned} p(\langle g \rangle) &= p(\langle g-1 \rangle) q(\langle g-1 \rangle, \langle g \rangle), g = 1, 2, \dots, d \\ p(\langle g \rangle) &= \frac{1}{1 + \sum_{h=1, d} q(\langle h-1 \rangle, \langle h \rangle)}, g = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Крок 6. Стаціонарний розподіл вихідного двовимірного ланцюга визначається як:

$$p^j(f, g) \cong ps^g(f) \cdot p(\langle g \rangle), (f, g) \in Z^j. \quad (7)$$

Отримання стаціонарного розподілу дає змогу обчислити ймовірність відмов та оптимізувати її як функцію від кількості ресурсів, виділених кожному вузлу із загального пулу ресурсів. Задамо цільову функцію ймовірності неуспішного обслуговування (ймовірність відмов)  $F$  як функцію від кількості ресурсів, виділених кожному вузлу,

$$F(b^1, b^2, \dots, b^K) = \sum_{i=1}^n \left( 1 - \prod_{j=1}^K P_i^j \right), \quad (8)$$

де  $P_i^j$  обчислюється за формулою (3); кількість ресурсів, виділених кожній підсистемі, тут є неявно, у формі фазового простору станів  $Z$  як обмеження кількості сервісів кожного типу, що можуть бути обслужені одночасно.

Нехай дано  $B$  – вектор довжиною  $m$ , що визначає загальну кількість ресурсів кожного типу в системі. Задача оптимізації матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \min F(b^1, b^2, \dots, b^K) \\ \text{за обмеження } \sum_j b^j \leq B \end{aligned} \quad (9)$$

Результати моделювання системи з двома типами сервісів, трьома вузлами та двома типами ресурсів показали, що можливо отримати вигреш у тисячі разів, використавши динамічну процедуру перерозподілу ресурсів між етапами у разі зміни інтенсивності вхідного навантаження, тобто розподіляючи ресурси відповідно до значення виразу (9). Вигреш запропонованого вище методу порівняно з методом, за яким ресурси розподіляються між етапами рівномірно, проілюстровано на прикладі рис. 3. Значення вигрешу від застосування запропонованого методу змінюється у разі зміни конфігурації системи, тому задача визначення умов доцільного застосування методу на практиці буде предметом подальшого дослідження.

Зазначимо, що визначена вище модель є універсальною і може використовуватись для аналізу різних систем. Запропонований інструмент може застосовуватись в майбутньому для розв'язання

задачі оптимального розподілу ресурсів між різними вузлами. Метою алгоритму надання ресурсів є виділення доцільної кількості ресурсів для кожного вузла (етапу) системи, так, що SLA (ймовірність відмови) задовольняється навіть за наявності пікового навантаження.

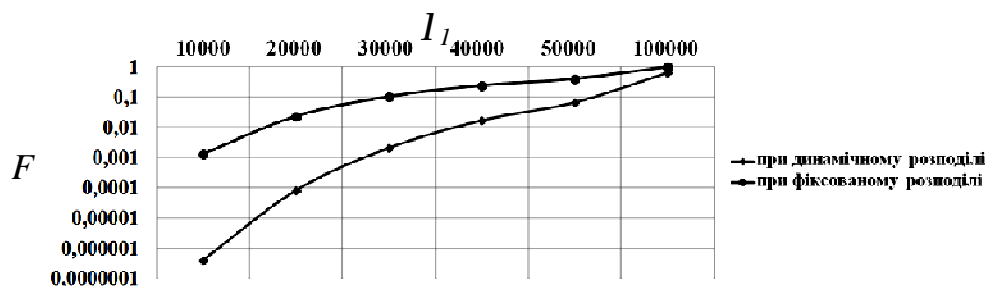


Рис. 3. Ймовірність відмови в обслуговуванні за зміни інтенсивності надходження запитів у логарифмічному масштабі

Крім того, використовуючи запропоновану модель, можливо аналітично сформулювати і розв’язувати багатокритеріальну задачу розподілу ресурсів з урахуванням, окрім ймовірності відмови, й інших критеріїв – таких як вартість залучення додаткового об’єму ресурсів (тобто вартість увімкнення додаткового сервера) або вигода від надання того чи іншого сервісу тощо. Загальну проблему розподілу ресурсів можна записати так:

$$\max_{b \in B(P)} u(b, P, \Lambda). \quad (10)$$

Тут цільова функція є функцією корисності  $u(b, P, L)$ , яка визначає корисність матриці  $b=(b^1, \dots, b^K)$  для вектора параметрів  $P$  з вагою  $L$ , що є вектором вагових коефіцієнтів для різних параметрів з  $P$ ; результатом процесу вибору є матриця розподілу ресурсів між різними вузлами, що найкраще задовольняє вимоги системи. Множина допустимих значень  $b \in B(P)$  є множиною доступних об’ємів ресурсів.

### Висновок

У роботі встановлено, що динамічне надання ресурсів у багатоетапних телекомунікаційних системах ставить нові задачі, не розв’язані у попередніх дослідженнях систем надання ресурсів. Запропоновано розширений динамічний метод управління ресурсами для багатоетапних систем, який застосовує гнучку аналітичну модель системи масового обслуговування для визначення кількості ресурсів, яку необхідно надати кожному етапу системи. В подальших дослідженнях запропонований метод можна розширити у межах багатокритеріальної задачі управління ресурсами та проблеми визначення моменту, коли слід запускати алгоритм перерозподілу ресурсів.

1. Gandhi A. Minimizing data center SLA violations and power consumption via hybrid resource provisioning / A. Gandhi, Yuan Chen, D. Gmach, M. Arlitt and M. Marwah // 2011 International Green Computing Conference and Workshops (IGCC). – Orlando, USA, 2011. – P. 1–8. 2. Beloglazov A. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in Cloud data centers / A. Beloglazov, R. Buyya // Concurrency and Computation: Practice & Experience. – 2012. – Vol. 24, No. 13. – P. 1397–1420. 3. Urgaonkar B. Agile dynamic provisioning of multi-tier Internet applications / B. Urgaonkar, P. Shenoy, A. Chandra, P. Goyal, T. Wood // ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS). – 2008. – Vol. 3, No. 1. – P.1–39. 4. Han R. Enabling cost-aware and adaptive elasticity of multi-tier cloud applications / R. Han, M. M. Ghanem, L. Guo, Y. Guo, M. Osmond // Future Generation Computer Systems. – 2014. – Vol. 32. – P.82–98. 5. Скулиш М. А. Метод складання розкладу залучення ресурсів для високонавантажених інформаційних систем / М. А. Скулиш // Наукові записки Українського науково-дослідного інститут зв’язку. – 2014. – № 6. – С. 65–70. 6. Jordan S. Control of Multiple Service, Multiple Resource Communication Networks / S. Jordan, P. Varaiya // IEEE INFOCOM’91 : proceedings. – 1991. – pp. 648–657. 7. Меликов А. З. Телетрафик: модели, методы, оптимизация / А. З. Меликов, Л. А. Пономаренко, В. В. Паладюк. – К.: ИПК “Политехника”, 2007. – 256 с.