

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 004.415.5

Харченко О.Г.<sup>1</sup>, Боднарчук І.О.<sup>2</sup>, Галай І.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет,

<sup>2</sup> Тернопільський національний технічний університет

# МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОЇ АРХІТЕКТУРИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОМПРОМІСІВ

*В статті розглядається метод оптимізації архітектури з одночасним аналізом конфліктів та досягнення компромісів між критеріями якості архітектури програмної системи (ПС). Це дає змогу приймати рішення, стійкі до змін пріоритетів критеріїв якості чи вимог до ПС.*

*Оцінювання архітектури програмних систем проводиться по множині критеріїв якості, шляхом порівняння декількох альтернатив. Оскільки вони, як правило, є конфліктними, то приймати рішення для вибору архітектури потрібно по всій множині критеріїв. Найбільше для цієї ситуації підходить метод аналізу ієрархій (МАІ). Однак при цьому втрачається інформація про компроміси, які були зроблені при отриманні розв'язку, оскільки МАІ є за своєю суттю експертною технологією.*

*В статье рассматривается метод оптимизации архитектуры с одновременным анализом конфликтов и достижения компромиссов между критериями качества архитектуры программной системы (ПС). Это позволяет принимать решения, устойчивы к изменениям приоритетов критериев качества или требований к ПС.*

*Оценка архитектуры программных систем производится по множеству критериев качества, путем сравнения нескольких альтернатив. Поскольку они, как правило, являются конфликтными, то принимать решение для выбора архитектуры нужно по всему множеству критериев. Всего для этой ситуации подходит метод анализа иерархий (МАИ). Однако при этом теряется информация о компромиссах, которые были сделаны при получении решения, поскольку МАИ является по своей сути экспертной технологией.*

*The paper considers an optimization method of architecture with simultaneous analysis of conflict and compromise between the quality criteria of the architecture of a software system (PS). This allows you to make decisions that are resistant to changes in the priorities of quality criteria or requirements for the aircraft.*

*Evaluation of architecture of software systems is carried out by a set of quality criteria by comparing several alternatives. Since they tend to have conflicts, the decision to select the architecture to the entire set of criteria. Most suitable for this situation the analytic hierarchy process (AHP). However, the loss of information about the compromises that have been made in obtaining solution because MAI is inherently technical expertise.*

### Вступ

Зростаюча складність сучасних програмних систем (ПС) та високі вимоги до їх якості змушують розробників ширше використовувати формальні методи та системні підходи при їх проектуванні. Проектування архітектури є важливим етапом розробки ПС, оскільки вибране рішення визначає окрім характеристик функціональності такі важливі характеристики ПС, як зручність у використанні, надійність, безпечність та інші. В літературі використовується багато означень архітектури ПС, що пояснюється різними підходами та використовуваними технологіями проектування.

Якість архітектурного рішення оцінюється за сукупністю критеріїв, і його вибір завжди є компромісом, оскільки для заданого набору функціональних вимог та вимог якості не існує очевидного єдиного найкращого рішення і покращення одних показників веде до погіршення інших та навпаки. А оскільки тут потрібно враховувати зв'язки між критеріями якості архітектури і ПС, то вихідна задача повинна формулюватись як задача багатокритерійної ієрархічної оптимізації.

Найбільш широко використовуються два стандартних підходи до оцінки якості архітектури [1]. Перший підхід полягає в оцінювання її характеристик методом

імітаційного моделювання. Наприклад, за результати моделювання продуктивності оцінюється пропускна здатність і масштабованість системи. В інших випадках характеристики зв'язності та зчеплення використовуються для оцінювання здатності до змін і зручності супроводження системи.

В методах другого підходу характеристики архітектури оцінюються за результатами опитування експертів. Наприклад, в методі АТАМ (Architecture Trade-off Analysis Method) оцінюються ризики того, що архітектура не задовольняє концептуальним вимогам [2]. Концептуальна вимога однієї із зацікавлених сторін експерименту в методиці АТАМ описується з допомогою сценаріїв. Потім альтернативні варіанти архітектури аналізують на предмет підтримки кожного із сценаріїв.

Метод аналізу ієрархій Сааті дозволяє отримати відносні оцінки архітектур як по кожному критерію, так і по їх сукупності. Однак, оскільки МАІ є експертною технологією за своєю суттю, то отримані рішення можуть виявитись нестійкими до неузгодженостей матриць парних порівнянь, а також до зміни пріоритетів критеріїв якості. Зміна вимог до ПС приводить до зміни пріоритетів критеріїв якості як системи в цілому, так і її архітектури. Для виявлення

критичних рішень та проведення аналізу чутливості рішень до змін вимог необхідно виконувати аналіз конфліктів та можливих компромісів між критеріями. Це дасть можливість виявити потенційні проблеми та забезпечити адаптацію архітектури до майбутніх змін вимог.

Питання чутливості у методах оцінювання архітектури було вперше поставлено в роботі [3]. Але вони не надали ніяких рішень цієї проблеми. Це частково пояснюється тим, що вони використовували кількісні методи оцінювання, такі як АТАМ, СВАМ.

Пропонований в статті підхід представляє собою додатковий аналіз результатів методу аналізу ієрархій. В якості прикладу дослідження чутливості рішень до змін вимог та аналізу компромісів між критеріями якості були проведені для архітектур, взятих з проекту GlasBox [4].

### Оцінювання альтернативних архітектур методом аналізу ієрархій.

Приведемо отримання оптимального рішення методом аналізу ієрархій Сааті (МАІ). Структурна схема процесу вибору архітектурного рішення з врахуванням показників якості зображена на рис. 1.

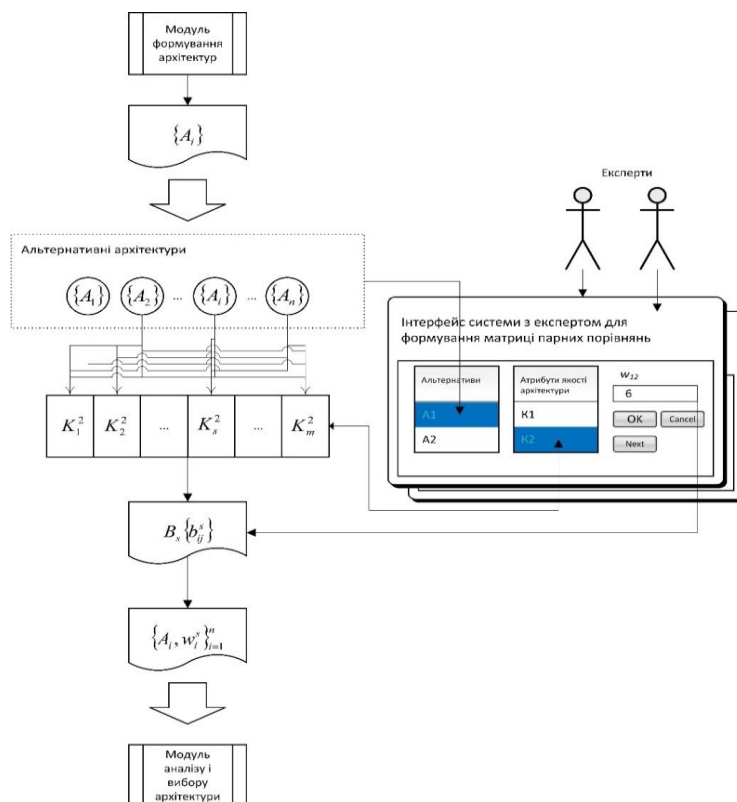


Рис. 1. Ієрархічне представлення задачі вибору архітектури

Тут представлено такі рівні критеріїв якості:

- $K_i^1, i = \overline{1, m1}$  – критерії якості ПС у відповідності зі стандартом ISO/IEC 25010;
- $K_i^2, i = \overline{1, m2}$  – критерії якості архітектури;
- $A_i, i = \overline{1, n}$  – альтернативні архітектурні рішення.

Необхідно вибрати таке архітектурне рішення, яке б оптимізувало сукупність критеріїв  $\{K_i^1\}, \{K_i^2\}$ . Це задача багатокритеріальної ієрархічної оптимізації і для розв'язання таких задач найчастіше використовується метод аналізу ієрархій Сааті [5].

При використанні МАІ для рішення таких задач вагові множники альтернатив (критеріїв)  $\{w_i\}$  на кожному рівні знаходяться з використанням матриць парних порівнянь  $B\{b_{ij}\}$ , які заповнюють експерти (тут  $b_{ij}$  визначає перевагу  $i$ -тої альтернативи над  $j$ -ю).

Коефіцієнти матриць повинні бути узгодженими, тобто  $b_{ij} = w_i / w_j \quad \forall b_{ij} \in B$ . Вагові множники в цьому випадку знаходяться як компоненти власного вектору матриці парних порівнянь, які відповідають максимальному характеристичному числу матриці. Але при значній кількості альтернатив в силу дії на експертів різних факторів матриця  $B\{b_{ij}\}$  є неузгодженою і її ранг буде відмінним від одиниці, тобто матриця буде мати декілька власних значень. В роботах [6, 7] для розв'язку даної задачі запропоновано алгоритм обчислення ваг альтернатив з умов мінімізації неузгодженості матриці  $B\{b_{ij}\}$ , заданої виразом:

$$\left| \frac{w_i}{w_j} - b_{ij} \right| \leq \delta_{\text{don}} \cdot b_{ij}, \quad \delta_{\text{don}} \geq 0, \quad (1)$$

де  $\delta_{\text{don}}$  – задане порогове значення.

Тоді вагові множники  $w_i$ , які мінімізують (1), знаходяться з рішення задачі

$$\min_{\{w_i\}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_i - b_{ij} w_j)^2$$

$$a_i \leq w_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

$$-\delta_{\text{don}} \cdot b_{ij} \cdot w_j \leq w_i - b_{ij} \cdot w_j \leq \delta_{\text{don}} \cdot b_{ij} \cdot w_j; \quad i, j = \overline{1, n} \quad (3)$$

яка заміною змінних зводиться до задачі лінійного програмування:

$$\min_{\{w_i\}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_{ij}^+ - y_{ij}^-)^2$$

$$w_i \geq a, \quad i = \overline{1, n},$$

$$w_i - b_{ij} w_j = y_{ij}^+ - y_{ij}^-. \quad (4)$$

$$-\delta_{\text{don}} \cdot b_{ij} \cdot w_j \leq w_i - b_{ij} \cdot w_j \leq \delta_{\text{don}} \cdot b_{ij} \cdot w_j,$$

$$y_{ij}^+, y_{ij}^- \geq 0; \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Таким чином, знаходження ваг альтернативних архітектур  $w_i$  зводиться до рішення задачі (4), (5), яка розв'язується стандартним симплекс-методом [8]. Використання запропонованого алгоритму обчислення ваг дало змогу розширити межі коректного застосування МАІ для випадку великої кількості альтернатив ( $n > 9$ ) [6].

#### Дослідження чутливості ранжування альтернатив та аналіз компромісів.

Були проведені обчислення вагових множників стосовно альтернативних архітектур проекту GlasBox [4]. Було розглянуто 19 різних архітектурних альтернатив, для яких були виконані обчислення ваг по кожному з наступних критеріїв:

1. Здатність до модифікації.
2. Масштабованість.
3. Продуктивність.
4. Вартість.
5. Затрати на розробку.
6. Портативність.
7. Легкість встановлення.

Також було виконано такі обчислення по сукупності критеріїв.

Далі приведені найбільш характерні результати розрахунків для таких чотирьох альтернатив:

1. Трирівнева на базі J2EE (THEJ).
2. Трирівнева з використанням платформи .NET (THTD).
3. Дворівнева (TWOT).

4. Платформа з підтримкою розподіленого агента (COAB).
- В таблиці 1 приведено ваги архітектурних альтернатив відносно критеріїв якості.

Таблиця 1  
Ранжування альтернатив

Атрибути якості	Альтернативи			
	THTJ	THTD	TWOT	COAB
Модифікованість	0,521	0,172	0,106	0,210
Масштабованість	0,404	0,402	0,074	0,143
Продуктивність	0,201	0,204	0,347	0,246
Вартість	0,166	0,120	0,487	0,227
Затрати на розробку	0,152	0,110	0,515	0,223
Портативність	0,450	0,050	0,050	0,450
Легкість встановлення	0,168	0,368	0,256	0,208

Далі визначаємо пріоритети критеріїв якості. Оскільки в розробці ПС зацікавлені декілька груп фахівців, які мають різні пріоритети для кожного з атрибутів якості, спочатку необхідно визначити пріоритети кожної з груп шляхом формування ними матриць парних порівнянь, до яких застосовується модифікований МАІ і знаходяться пріоритети критеріїв  $\{P_i^s\}$ ,  $i = 1, k, 2$ ,  $s$  – номер групи експертів. Компромісне рішення можна знаходити як

середнє геометричне  $P_{ij}^* = \sqrt[n]{P_{ij}^1 \cdot P_{ij}^2 \cdot \dots \cdot P_{ij}^n}$ , або як усереднене, з врахуванням показника компетентності груп експертів  $P_{ij}^* = P_{ij}^{\alpha_1} \cdot P_{ij}^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot P_{ij}^{\alpha_n}$ . ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  – показники компетентності).

В таблиці 2 представлені оцінки пріоритетів критеріїв якості різних груп експертів, отриманих модифікованим МАІ.

Таблиця 2  
Пріоритети критеріїв якості

Атрибути якості	Експерти			Агреговане значення
	розробники	користувачі	замовники	
Модифікованість	0,216	0,294	0,184	0,280
Масштабованість	0,087	0,092	0,038	0,082
Продуктивність	0,052	0,117	0,087	0,097
Вартість	0,245	0,019	0,272	0,135
Затрати на розробку	0,245	0,019	0,272	0,135
Переносимість	0,050	0,155	0,053	0,094
Легкість встановлення	0,106	0,304	0,093	0,177

Як видно з таблиці 2, модифікованість – найважливіший атрибут якості з ваговим пріоритетом 0,28, після нього слідує легкість встановлення. У остаточному ранжуванні альтернатив розробки THTJ значно переважає всі інші кандидати. COAB та TWOT знаходяться дуже близько з ваговими пріоритетами 0,237 та 0,248 відповідно. THTD – це найгірший варіант.

Але ці результати містять дуже мало інформації про взаємозалежності між критеріями та альтернативами.

#### Аналіз компромісів без врахування ваг атрибутів якості.

Аналіз компромісів між критеріями можна проводити, побудувавши діаграми компромісів. Наприклад, на рисунку 2 зображена діаграма компромісів між портативністю та масштабованістю. По осі  $x$  показано відносне значення критерію "Переносимість", по осі  $y$  – "Масштабованість".

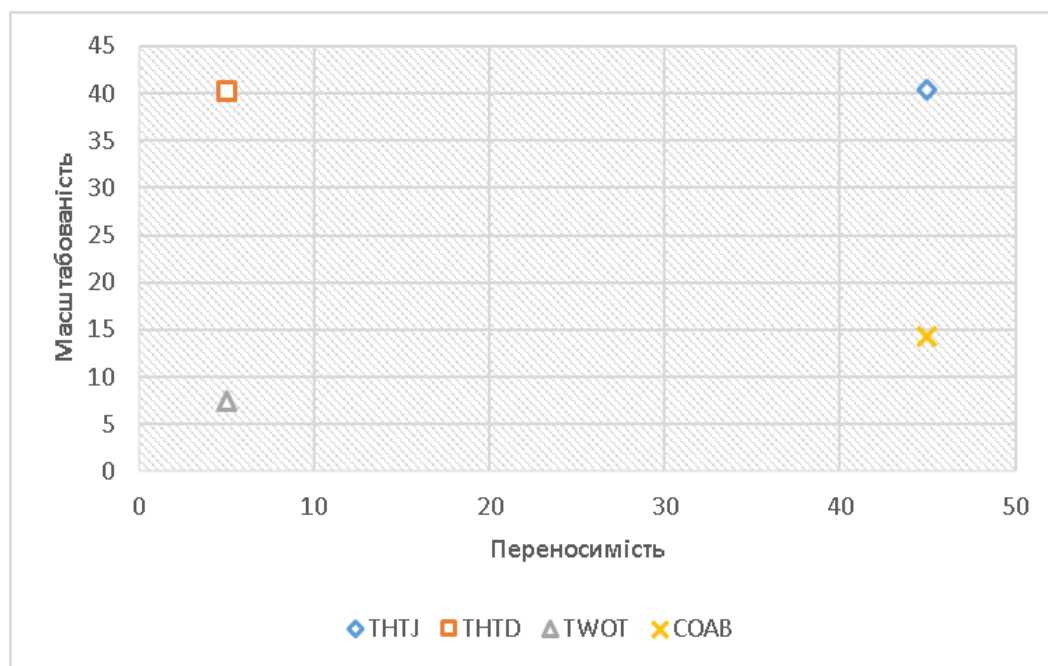


Рис. 2. Компроміси між критеріями якості

Рисунок 2 корисний з огляду на можливість візуалізації компромісів, їхніх відносних розмірів та відношень між альтернативами розробки з точки зору компромісів.

Для кожної альтернативної архітектури точка на діаграмі є можливим компромісом, якщо вона знаходиться зліва від діагоналі координатної площини.

На рисунку 2 для вибраного рішення THTD (лівий верхній кут) архітектура вибрана з огляду на надання переваги масштабованості перед портативністю, у той час коли для рішення COAB портативність переважає над масштабованістю. Розмір компромісу відображається розміщенням точки в напрямку

вверх вліво чи вниз вправо. Чим ближче точка розміщена до кута, тим більший розмір компромісу було виконано. Попадання альтернативи у нижній лівий квадрат відображає, що в рамках даного архітектурного рішення обидва атрибути не можуть бути реалізовані на прийнятному рівні.

#### Аналіз компромісів з врахуванням ваг атрибутів якості.

При врахуванні в аналізі компромісів ваг атрибутів якості отримані вище результати можуть відповідно змінитися. В таблиці 3 наведені архітектурні альтернативи, відсортовані відповідно до ваг атрибутів якості.

Таблиця 3  
Архітектурні альтернативи, відсортовані відповідно до ваг атрибутів якості

Атрибути якості	Альтернативи розробки			
	THTJ	THTD	TWOT	COAB
Модифікованість	0,1459	0,0510	0,0129	0,0700
Масштабованість	0,0330	0,0330	0,0044	0,0117
Експлуатаційні якості	0,0198	0,0198	0,0337	0,0239
Вартість	0,0224	0,0162	0,0657	0,0306
Затрати на розробку	0,0205	0,0149	0,0695	0,0301
Переносимість	0,0423	0,0047	0,0047	0,0423
Легкість встановлення	0,0297	0,0651	0,0453	0,0368

Тоді діаграма компромісів з рис. 2 набуде вигляду рис. 3.

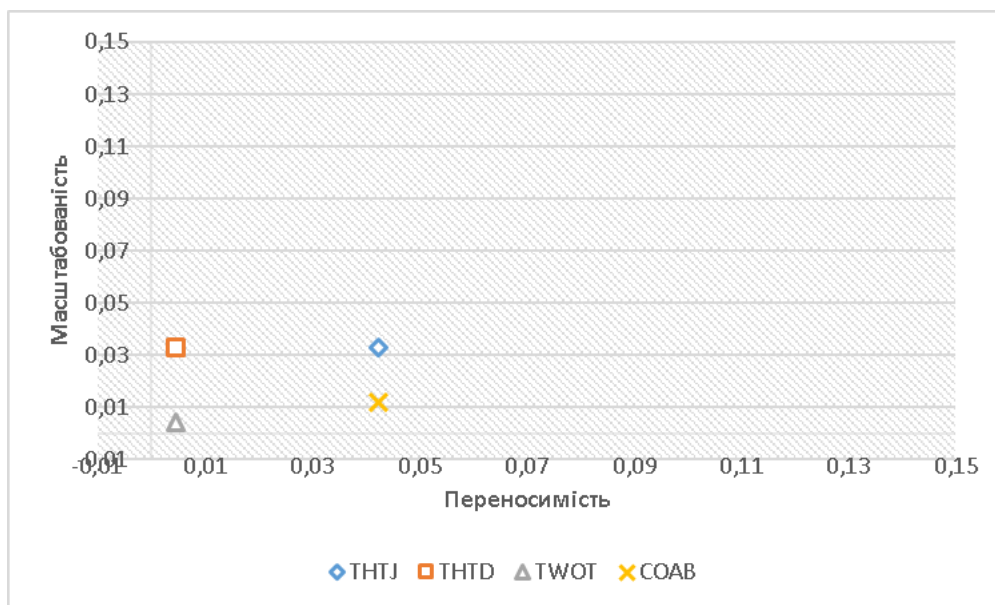


Рис. 3. Діаграма компромісів між переносимістю та масштабованістю (з врахуванням ваг пріоритетів атрибутів якості)

Альтернатива THTJ має значну перевагу у модифікованості порівняно з іншими альтернативами розробки. Отже, для THTJ компроміси між модифікованістю та будь-якими іншими атрибутами якості підсилюються у діаграмі компромісів. Таким чином, ці діаграми візуалізують компроміси та їх розміри, які не відображаються при використанні MAI.

#### Аналіз чутливості.

Розглянемо тепер чутливість рішень, отриманих з використанням MAI, до зміни пріоритетів критеріїв якості.

Нехай ми маємо проранжовані архітектурні альтернативи  $\{A_i\}$ , отримані методом аналізу ієрархій. Приведемо формулу для визначення мінімальної зміни абсолютної величини ваги атрибуту якості  $P_s$ , таку, що порядок слідування  $A_i$  та  $A_j$  поміняється на протилежний:

$$D'_{s,i,j} = \frac{|J_i - J_j|}{|w_i^s - w_j^s|} \cdot \frac{100}{P_s} \quad (6)$$

Тут  $D'_{s,i,j} (s = \overline{1, m2}; i, j = \overline{1, n}, i \neq j)$  – мінімальна зміна величини пріоритету  $P_s$  критерію якості  $K_s$ , яка змінює порядок слідування сусідніх альтернатив  $A_i$  та  $A_j$  на зворотній. Найменше значення  $D'_{s,i,j}$  показує, що пріоритет  $P_s$  атрибуту  $K_s$  є критичним до змін оцінок в парних порівняннях. Це рівняння можна також використати у випадку зміни

вимог до ПС у процесі проектування, яка може спричинити зміну пріоритетів відносно критеріїв якості.

Для кожного атрибуту якості можлива наявність декількох значень  $D'_{s,i,j}$ , які можуть відображати можливість зміни порядку слідування сусідніх альтернатив.

#### Висновки.

У цій статті представлена послідовність дій для ідентифікації усіх можливих компромісів та встановлення величини цих компромісів як у локальному контексті, так і у контексті всього проекту, базуючись на відносних вагах атрибутів якості. Результати дослідження добавили до вихідних даних оцінювання методом аналізу ієрархій дані, які дозволяють досягнути чітких результатів конструювання. Для завершення цієї роботи ми надіємось інтегрувати аналіз компромісів у АТАМ та аналіз компромісів у MAI та надати більш уніфікований метод для аналізу компромісів.

Найчутливіші критичні рішення отримані з огляду на найменші зміни, які перевпорядковують кінцеву послідовність ранжування альтернатив. Величина зміни може бути індикатором чутливості архітектури.

Крім того, аналіз чутливості дозволяє визначити межі змін пріоритетів ваг атрибутів якості при зміні вимог. Якщо зміни пріоритетів виконуються в рамках цих меж, поточний порядок ранжування альтернатив залишається без змін.

**Список використаних джерел**

1. Диомидис Спинеллис, Георгиос Гусиос. Идеальная архитектура. Ведущие специалисты о красоте программных архитектур. – Санкт-Петербург – Москва: Издательство "Символ+", 2010. – 528 с.: ил.

2. Bass, Len. Software architecture in practice / Len Bass, Paul Clements, Rick Kazman – 2nd ed.

3. Dobrica, L. and Niemela, E. 2002. A survey on software architecture analysis methods, IEEE Transactions on Software Engineering 28(7).

4. Gorton and J. Naack. Architecting in the Face of Uncertainty: An Experience Report. Proc. International Conference on Software Engineering. 2004. Edinburgh, Scotland

5. Saaty T. Decision Making with the Analytic Network Process./ Saaty T. Vargas L.// – N.Y.: Springer, 2006. 278 p.

6. Harchenko Alexandr, Bodnarchuk Ihor, Halay Iryna. Stability of the Solutions of the Optimization Problem of Software Systems Architecture // Proceeding of VIIth International Scientific and Technical Conference CSIT 2012. pp. 47–48, Lviv, 2012.

7. Alexandr Harchenko. The Tool for Design of Software Systems Architecture // Alexandr Harchenko, Ihor Bodnarchuk, Iryna Halay, Vasyl Yateyshyn // Proceeding of XII<sup>th</sup> International Conference CADSM' 2013. pp. 47–48, Lviv

8. Моисеев Н.Н. Методы оптимизации. / Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. М.: Наука, 1978, 352с.

**Відомості про авторів:**



**Харченко Олександр Григорович** – кандидат технічних наук, професор кафедри комп'ютерних інформаційних технологій факультету комп'ютерних наук Національного авіаційного університету. Наукові інтереси – технології розробки програмного забезпечення, технології проектування інформаційних систем.

**e-mail:** [kharchenko.nau@gmail.com](mailto:kharchenko.nau@gmail.com)



**Боднарчук Ігор Орестович** – асистент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя. Наукові інтереси – оцінка якості програмного забезпечення, якість архітектури програмних систем.

**e-mail:** [bodnarchuk.io@gmail.com](mailto:bodnarchuk.io@gmail.com)



**Галай Ірина Олександрівна** – аспірант кафедри комп'ютерних інформаційних технологій факультету комп'ютерних наук Національного авіаційного університету. Наукові інтереси: технології оцінювання якості програмних систем, проектування програмного забезпечення.

**e-mail:** [irinagalay@ukr.net](mailto:irinagalay@ukr.net)