

В. Є. СОКОЛ, доктор філософії (PhD), доцент, Рейнсько-Вестфальський Технічний Університет, науковий дослідник дослідницької групи з навчальних технологій; м. Ахен, Німеччина; e-mail: sokol@cs.rwth-aachen.de;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>

М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій; м. Харків, Україна; e-mail: Mykhailo.Hodlevskiy@kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

Д. К. МАЛЕЦЬ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; e-mail: dmytro.malets@cs.kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1980-1401>

К. О. АФАНАСЬЄВ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; e-mail: Kostiantyn.Afanasyev@cs.kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6665-7459>

СИНТЕЗ КІЛЬКІСНИХ ШКАЛ МОДЕЛЕЙ ЗРІЛОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У роботі поняття якості визначається як один з найбільш важливих показників оцінки продукції та послуг. Розглянуті основні етапи еволюції цього поняття. На четвертому етапі, який характеризується тотальним менеджментом якості (Total Quality Management – TQM) з'являється серія стандартів ISO-9000 на системи якості. Етап TQM та ці стандарти характеризуються початком використання для програмного забезпечення (ПЗ) та процесу розробки (ПР) ПЗ. У роботі розглядаються стандарти, які відносяться до наступних моделей зрілості оцінки ПР ПЗ: Capability Maturity Model Integration (CMMI) та Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE). Модель CMMI має два варіанти використання: безперервний та дискретний, а модель SPICE тільки безперервний. У безперервному варіанті моделі зрілості оцінюються на основі їхніх наступних складових: фокусні області для моделі CMMI; процеси для моделі SPICE. Дискретний варіант моделі CMMI оцінює якість всього ПР ПЗ. У всіх трьох випадках якість визначається на основі бальних якісних шкал. Подальші дослідження показали, що бальні шкали не в повній мірі можуть бути використані для планування підвищення якості ПР ПЗ. Тому метою дослідження була розробка технології перетворення бальних якісних шкал у кількісні за допомогою функції корисності, що дозволило підвищити адекватність розроблених моделей до реального ПР ПЗ. Виходячи з цього запропонована технологія перетворення бальної якісної шкали у кількісну на основі функції корисності. Суть технології полягає в тому, що кожен рівень можливості розглядається як альтернативний варіант рівня корисності фокусної області або процесу. Далі використовується методологія колективного експертного оцінювання та в її межах метод парних порівнянь Сааті, де команда експертів оцінює корисність рівнів можливості по відношенню одного до іншого. В результаті на шкалі від нуля до одиниці отримуємо конкретні значення корисності кожного рівня можливості. Для планування підвищення якості окремих фокусних областей та процесів необхідні відповідні ресурси. Тому у подальшому стоїть задача оптимізації витрат з метою максимізації функції корисності. Наведена технологія формування збалансованих кількісних шкал, яка базується на отриманих кількісних шкалах моделей зрілості. Суть збалансованої шкали полягає в тому, що проміжки між окремими оцінками корисності фокусної області або процесу залежно від наданих ресурсів не повинні сильно відрізнятися. Одним з вагомих напрямків подальших досліджень є розробка алгоритму оптимізації моделі планування підвищення рівня зрілості ПР ПЗ на основі методу послідовного аналізу варіантів.

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення, якість, шкали моделей зрілості, оптимізація витрат, модель оптимізації планування, експертні методи, метод послідовного аналізу варіантів.

Вступ. Поняття якості є одним з найбільш важливих показників оцінки продукції та послуг. Якість це комплексне інтегральне поняття, яке всебічно характеризує діяльність складної системи. Технології оцінки якості продукції та послуг з часом притерпіли еволюції і на теперішній час можна виділити ряд етапів розвитку як самого поняття якості, так і підходів до її оцінки. Стисло розглянемо окремі етапи еволюції цього поняття.

До першого етапу відноситься система Тейлора, яка установлювала вимоги до якості окремих виробів у вигляді допусків різного типу. Цим питанням почали займатися інспектори – професіонали в області оцінки якості. Вимоги до якості встановлювались у технічних умовах до виготовлення продукції. Таким чином здійснювалось керування якістю окремих виробів. Другий етап характеризується процесним підходом до керування якістю. На цьому етапі група Р. Л. Джонса заклала основи керування якістю на основі статистики. Подальший розвиток такого підходу реалізовано В. Шухартом, Х. Доджем та Х. Ромінгом. З'явилася спеціальність – інженер з якості. Основний акцент

спрямовано на виявлення причин дефектів і їхнього усунення на основі вивчення процесів розробки продукції. На третьому етапі була висунута концепція тотального керування якістю (Total Quality Control – TQC). Її автором та розробником є видатний американський вчений А. Фейгенбаум. Цей етап характеризується документами по системі якості, які визначають відповідальність за якість не тільки фахівців з якості, а і всіх керівників окремих підрозділів підприємства. Велика увага приділяється підвищенню їхньої кваліфікації в області забезпечення якості. Однією з особливостей цього етапу є реєстрація та сертифікація систем якості незалежною стороною. Підвищилась відповідальність і гарантії до якості продукції та послуг. Четвертий етап характеризується тотальним менеджментом якості (Total Quality Management – TQM). Різниця між TQM та TQC у тому, що TQC забезпечує керування якістю з метою виконання вимог, які заздалегідь встановлені, а TQM керує цілями, на основі яких сформовані вимоги. На основі TQM з'являється нова серія стандартів на системи якості типу ISO-9000. Недоліком перших стандартів цієї серії була слабка

© Сокол В. Є., Годлевський М. Д., Малець Д. К., Афанасьєв К. О., 2025



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



спрямованість на економічну ефективність і відсутність спрямованості на своєчасне постачання.

Цей етап характеризується початком використання стандартів якості для програмного забезпечення (ПЗ) та процесу розробки (ПР) ПЗ. Одним з перших був ISO/IEC 9126, який містить модель якості ПЗ [1]. Стандарт ISO/IEC 25010 є розвитком ISO/IEC 9126 і містить модернізований набір атрибутів якості [2]. Модель Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE), яка описується стандартом ISO/IEC 15504, відноситься до моделей зрілості, які оцінюють якість ПР ПЗ [3]. Моделлю зрілості ПР ПЗ є Capability Maturity Model Integration (CMMI) [4].

Постановка та мета задачі дослідження. Для оцінки показників якості ПР ПЗ використовуються різні шкали, які поділяються на два типи: якісні та кількісні. На відміну від кількісних оцінок, які відповідають об'єктивним вимірам показників якості, експертні оцінки характеризуються суб'єктивними думками фахівців і доволі часто визначаються у бальних шкалах. Бальні шкали бувають двох типів і відносяться до якісних шкал. Перший характеризується об'єктивним критерієм. Кожній градації такої шкали відповідає вербальний опис еталонів і індивідуальні оцінки є флуктуаціями реальних значень.

З наведених вище моделей оцінки якості ПР ПЗ найбільшу популярність набули моделі CMMI та SPICE. Перша має два виміри оцінки якості ПР ПЗ: безперервний та дискретний. На рівні безперервного варіанта проводиться оцінка якості окремих складових ПР ПЗ, які називаються фокусними областями з використанням бальних шкал першого типу. Кожен бал в межах від 0 до 3 відповідає рівню можливості фокусної області. Дискретний варіант моделі CMMI також завдяки бальній шкалі першого типу оцінює весь ПР ПЗ і має п'ять рівнів зрілості від 1 до 5. Модель SPICE має тільки безперервний варіант оцінки якості її процесів – складових оцінки якості всього ПР ПЗ. Кожний процес має п'ять рівнів можливості (оцінка якості) від 1 до 5.

Вербальний опис наведених вище моделей було формалізовано і використано у роботах [5–7] для синтезу моделей оптимізації планування підвищення якості як окремих множин фокусних областей і процесів, відповідно моделей CMMI та SPICE, так і всього ПР ПЗ на основі моделі CMMI.

Подальші дослідження показали, що бальні шкали не в повній мірі можуть бути використані для розробки моделей оптимізації планування підвищення якості ПР ПЗ. Це пов'язано з тим, що запропоновані бальні якісні шкали не дозволяють оцінити на скільки підвищується якість ПР ПЗ з кожним балом з погляду корисності ПР ПЗ. Крім цього, кожен бал відповідає різному розміру підвищення корисності всього ПР ПЗ та його окремих складових і не можна сформулювати залежності підвищення якості ПР ПЗ завдяки використаних ресурсів.

Метою дослідження є розробка технології перетворення бальних якісних шкал у збалансовані кількісні, що дозволить підвищити адекватність розроблених моделей до реального ПР ПЗ.

Технологія перетворення бальних якісних шкал у кількісні на основі функції корисності.

Формування бальних шкал фокусних областей та процесів, відповідно моделей CMMI та SPICE, наведено у роботі [8].

На цій основі введемо наступні позначення для змінних, які визначають їхній рівень можливості (рівень якості): C^{ik} – рівень можливості i -ї фокусної області k -ї категорії, $C^{ik} \in \{0,1,2,3\}$, де $i \in \bar{I}^k$, $k \in \bar{K}$; \bar{K} – множина категорій фокусних областей моделі CMMI, а \bar{I}^k – множина фокусних областей k -ї категорії; S^{pk} – рівень можливості p -го процесу k -ї категорії, $S^{pk} \in \{1,2,3,4,5\}$, де $p \in I^k$, $k \in K$; K – множина категорій процесів моделі SPICE, а I^k – множина процесів k -ї категорії.

Для забезпечення якості окремих фокусних областей та процесів на відповідних рівнях можливості необхідно витратити певні фінансові ресурси. Будемо вважати, що при підвищенні рівня можливості для кожної фокусної області і процесу визначені фінансові ресурси, які представлені у вигляді трикутних матриць (табл. 1, 2). \bar{R}_{ij}^{ik} , R_{lj}^{pk} – фінансові ресурси, необхідні для підвищення l -го рівня можливості до j -го i -ї фокусної області моделі CMMI та p -го процесу моделі SPICE для k -ї категорії. Вважається, що для кожної фокусної області початковий стан рівня можливості як мінімум дорівнює нулю, а початковий стан рівня можливості процесів як мінімум дорівнює одиниці. \bar{R}_c^{ik} , R_s^{pk} – фінансові ресурси, необхідні для досягнення початкового нульового рівня фокусної області моделі CMMI і, відповідно, одиниці для процесу моделі SPICE.

Таблиця 1 – Фінансові ресурси, необхідні для підвищення рівня можливості фокусної області моделі CMMI

C^{ik}	0	1	2	3
0	0	\bar{R}_{01}^{ik}	\bar{R}_{02}^{ik}	\bar{R}_{03}^{ik}
1	0	0	\bar{R}_{12}^{ik}	\bar{R}_{13}^{ik}
2	0	0	0	\bar{R}_{23}^{ik}
3	0	0	0	0

Таблиця 2 – Фінансові ресурси, необхідні для підвищення рівня можливості процесу моделі SPICE

S^{pk}	1	2	3	4	5
1	0	R_{12}^{pk}	R_{13}^{pk}	R_{14}^{pk}	R_{15}^{pk}
2	0	0	R_{23}^{pk}	R_{24}^{pk}	R_{25}^{pk}
3	0	0	0	R_{34}^{pk}	R_{35}^{pk}
4	0	0	0	0	R_{45}^{pk}
5	0	0	0	0	0

Як для кожної фокусної області так і для процесу можуть бути різні варіанти послідовності підвищення рівня можливості. Наприклад, на рис. 1 наведено чотири таких варіанти для фокусної області. Будемо вважати, що необхідні фінансові ресурси для підвищення

рівня можливості за один крок від 0 до 3 (вар. 4) менші ніж ті, що необхідні при покращенні якості фокусної області покровковим шляхом. Це відноситься і до варіантів 2, 3.

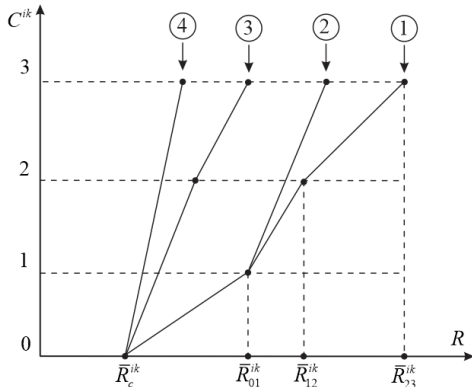


Рис. 1. Варіанти підвищення рівня можливості фокусної області моделі СММІ

Варіант 1: $\bar{R}_{01}^{ik}, \bar{R}_{12}^{ik}, \bar{R}_{23}^{ik}$.

Варіант 2: $\bar{R}_{01}^{ik}, \bar{R}_{13}^{ik}$.

Варіант 3: $\bar{R}_{02}^{ik}, \bar{R}_{23}^{ik}$.

Варіант 4: \bar{R}_{03}^{ik} .

На рис. 2 наведено графік варіантів зміни рівнів можливості окремих процесів моделі SPICE

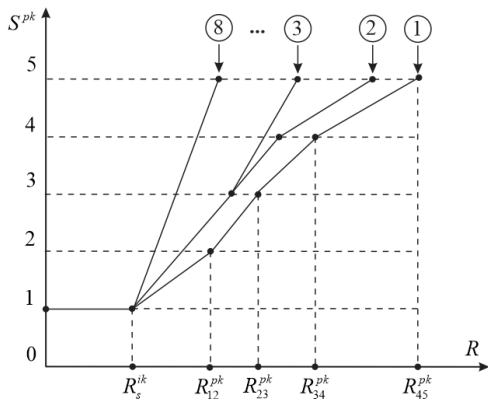


Рис. 2. Варіанти підвищення рівня можливості процесу моделі SPICE

Варіант 1: $R_{12}^{pk}, R_{23}^{pk}, R_{34}^{pk}, R_{45}^{pk}$.

Варіант 2: $R_{13}^{pk}, R_{34}^{pk}, R_{45}^{pk}$.

Варіант 3: R_{13}^{pk}, R_{35}^{pk} .

...

Варіант 8: R_{15}^{pk} .

На основі вище наведеної інформації пропонується використання функції корисності для оцінок якості фокусних областей та процесів моделей зрілості на інтервалі $[0,1]$, де одиниці відповідає максимальна корисність. Природно вважати, що рівню можливості, який дорівнює трьом для фокусних областей відповідає максимальна корисність, яка дорівнює одиниці. Щодо процесів моделі SPICE, п'ятому рівню можливості від-

повідає значення функції корисності, яка дорівнює одиниці. У подальшому стоїть задача оптимізації фінансових витрат з метою максимізації функції корисності.

Розглянемо кожен рівень можливості фокусних областей та процесів як деякий варіант (альтернативу) оцінки їхньої корисності з погляду всього ПР ПЗ. Тоді можна використати методологію колективного експертного оцінювання (МКЕО) [9] та в її межах метод парних порівнянь Сааті [10] для визначення вагових коефіцієнтів кожного рівня можливості з погляду функції корисності.

Більш детально як приклад розглянемо перетворення бальної якісної шкали в кількісну для фокусних областей моделі СММІ. На основі змінної C^{ik} визначимо чотири альтернативи $C_j^{ik}(l)$, $l = \overline{0,3}$ для кожної i -ї фокусної області k -ї категорії, які оцінюються n експертами, $j = \overline{1,n}$. Кожна з чотирьох альтернатив визначає відповідний рівень можливості від 0 до 3. Далі на основі методу парних порівнянь Сааті формується матриця парних порівнянь $A^{ik}(j) = \{\alpha_{ls}^{ik}(j)\}$, де $\alpha_{ls}^{ik}(j)$ – її елементи для i -ї фокусної області k -ї категорії, які визначаються j -м експертом на основі збалансованої шкали похідної від дев'ятибальної шкали Сааті [11, 12].

Вектор вагових коефіцієнтів $\rho^{ik}(j) = \{\rho_l^{ik}(j), l = \overline{0,3}\}$ знаходиться на основі розв'язання наступного рівняння

$$A^{ik}(j) \cdot \rho^{ik}(j) = \lambda_{\max}^{ik}(j) \cdot \rho^{ik}(j), j = \overline{1,n}, (1)$$

де $\lambda_{\max}^{ik}(j)$ – максимальне власне значення матриці $A^{ik}(j)$ за умови

$$\sum_{s=1}^4 \lambda_s^{ik}(j) = 4, j = \overline{1,n},$$

де $\lambda_s^{ik}(j)$, $s = \overline{1,4}$ – окремі власні значення матриці $A^{ik}(j)$. Для знаходження $\lambda_{\max}^{ik}(j)$ необхідно розглянути рівняння

$$A^{ik}(j) \cdot \rho^{ik}(j) = \lambda^{ik}(j) \cdot \rho^{ik}(j),$$

яке може бути представлене у вигляді

$$(A^{ik}(j) - \lambda^{ik}(j) \cdot I) \rho^{ik}(j) = 0,$$

де I – одинична матриця.

Необхідною і достатньою умовою існування нетривіального рішення цієї системи рівнянь є те, що її детермінант дорівнює нулю. Тому запишемо вираз детермінанта, прирівняємо його до нуля і отримуємо рішення $\lambda_s^{ik}(j)$, $s = \overline{1,4}$, з яких знаходимо максимальне значення $\lambda_{\max}^{ik}(j)$, яке використовується у (1). З урахуванням нормування

$$\sum_{l=0}^3 \rho_l^{ik}(j) = 1, j = \overline{1, n}.$$

отримуємо конкретні значення вагових коефіцієнтів рівнів можливості

$$\rho_l^{ik}(j) = \tilde{\rho}_l^{ik}(j), l = \overline{0, 3}, j = \overline{1, n}.$$

Необхідно підкреслити, що знаходження власних векторів матриці $A^{ik}(j)$, особливо для великої розмірності, це дуже трудомістка процедура. Тому на практиці доволі часто використовуються наближені обчислення такі, як

$$\rho_l^{ik}(j) = \sqrt[4]{\prod_{s=0}^3 \alpha_{ls}^{ik}(j)} / \sum_{l=0}^3 \left(\sqrt[4]{\prod_{s=0}^3 \alpha_{ls}^{ik}(j)} \right), l = \overline{0, 3},$$

$$\rho_l^{ik}(j) = \frac{1}{4} \sum_{s=0}^3 \left(\alpha_{ls}^{ik}(j) / \sum_{l=0}^3 \alpha_{ls}^{ik}(j) \right), l = \overline{0, 3}.$$

Перед вирішенням задачі інтеграції оцінок n експертів проводиться перевірка ступеня узгодженості елементів кожної матриці $A^{ik}(j)$, $j = \overline{1, n}$ і далі визначається величина достатності ступеня узгодженості щодо рекомендацій Т. Сааті [10].

Наступним етапом визначення вагових коефіцієнтів рівнів можливості фокусної області є інтеграція думок n експертів. Пропонується розв'язання цієї проблеми за допомогою вектора $\{\gamma_j, j = \overline{1, n}\}$ вагових коефіцієнтів компетентності окремих експертів, які входять у визначену команду.

Будемо вважати, що

$$\gamma_j > 0, j = \overline{1, n}, \sum_{j=1}^n \gamma_j = 1.$$

Тоді вектор вагових коефіцієнтів інтегрованої оцінки рівнів можливості фокусної області визначається наступним чином

$$\bar{\rho}^{ik} = \left\{ \bar{\rho}_l^{ik} = \sum_{j=1}^n \gamma_j \tilde{\rho}_l^{ik}(j), l = \overline{0, 3} \right\}.$$

При необхідності перевіряється узгодженість думок експертів, а також визначається величина достатності ступеня узгодженості.

Перейдемо безпосередньо до перетворення бальної шкали фокусної області у кількісну на основі визначених вагових коефіцієнтів рівнів можливості фокусної області, а також поняття функції корисності та необхідних фінансових ресурсів при підвищенні рівнів можливості фокусної області (табл. 1, рис. 1). Будемо вважати, що кожному рівню можливості фокусної області відповідає деяка корисність і максимальному рівню можливості відповідає максимальне значення функції корисності, яке дорівнює одиниці.

Введемо наступне позначення $P_l^{ik}, l = \overline{0, 3}$, яке відповідає корисності i -ї фокусної області k -ї катего-

рії на l -му рівні можливості. Отже, кожному рівню можливості відповідає значення функції корисності, яке може бути знайдено при використанні наступного підходу.

Як було підкреслено вище, P_3^{ik} відповідає третьому рівню можливості з ваговим коефіцієнтом $\bar{\rho}_3^{ik}$. В якості ремарки будемо вважати, що вагові коефіцієнти кожного рівня можливості i -ї фокусної області не залежать від підперіоду планування. Тоді враховуючи те, що $P_3^{ik} = 1$, значення функції корисності, які відповідають іншим рівням можливості фокусної області, можуть визначатись наступним чином

$$P_l^{ik} = \frac{\bar{\rho}_l^{ik} \cdot P_3^{ik}}{\bar{\rho}_3^{ik}} = \bar{\rho}_l^{ik} / \bar{\rho}_3^{ik}, l = \overline{0, 2}.$$

В результаті, якщо доповнити рис. 1 за умови розгляду першого варіанта фінансування, то отримуємо наступний графік (рис. 3)

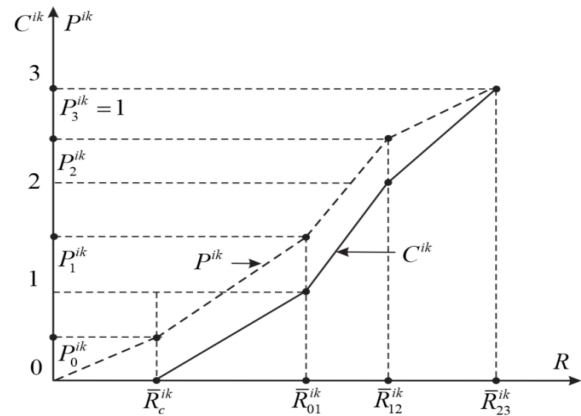


Рис 2. Наочна інтерпретація перетворення бальної якісної шкали у кількісну

Отже, на осі P^{ik} ми отримали конкретні чисельні значення $P_l^{ik}, l = \overline{0, 3}$ функції корисності фокусної області. Наступний етап пов'язаний з аналізом величин: $\Delta P_0^{ik} = P_0^{ik}, \Delta P_l^{ik} = (P_l^{ik} - P_{l-1}^{ik}), l = \overline{1, 3}$ з метою формування збалансованої шкали.

Технологія формування збалансованих кількісних шкал моделей зрілості. У роботах [11, 12] наведено поняття збалансованих шкал двох типів: для парних порівнянь та безпосередньої оцінки об'єкта дослідження. Останні характеризуються поділками, які знаходяться приблизно на одній відстані одна від наступної. Відповідно до цих визначень пропонується наступна технологія формування збалансованої шкали другого типу за умови, що функція $P^{ik}(R)$ (рис. 3) є кусково лінійною з вузловими точками $0, P_l^{ik}, l = \overline{0, 3}$. В якості обмеження припустимо, що кількість градацій на інтервалі $[0, 1]$ функції корисності не повинна перевищувати дванадцять. Це в межах досліджень вчених, які використовують дев'ятибальну шкалу Сааті, а та-

кож різні похідні від неї, у тому числі і збалансовані шкали.

На першому етапі ми маємо чотири градації, які відповідають значенням P_l^{ik} , $l = \overline{0,3}$ функції корисності. Інтервали між цими значеннями відповідають умові

$$\sum_{l=0}^3 \Delta P_l^{ik} = 1, \quad \forall i, k. \quad (2)$$

Тоді можна стверджувати, що величина

$$\Delta P_j^{ik} = \min_{l=1,3} \{ \Delta P_l^{ik} \}, \quad \forall i, k$$

не перевищує 0,25. Далі розглянемо спочатку ΔP_j^{ik} на інтервалі $[0,1;0,25]$, де будемо використовувати наступний підхід. Якщо для деякого n виконується умова

$$n + 0,5 \leq \Delta P_l^{ik} / \Delta P_j^{ik} < n + 1,5, \quad l \in \{0,3\}, \quad l \neq j, \quad (3)$$

де $n \in \{1,2,3,\dots\}$ – ціле число, то відповідний l -й інтервал поділяється на $n+1$ частини. Наприклад, $\Delta P_j^{ik} = 0,25$. Тоді, враховуючи умову (2), всі інші ΔP_l^{ik} , $l \in \{0,3\}$, $l \neq j$ дорівнюють 0,25 і шкала є збалансованою з чотирма градаціями. Кожен з інтервалів такої шкали може бути поділений на два і ми при необхідності отримаємо збалансовану шкалу з вісьмома градаціями. З іншої сторони, якщо $\Delta P_j^{ik} = 0,1$, то максимальна кількість градацій буде в тому випадку, коли два інші інтервали дорівнюють 0,1, а останній – 0,7. Тоді умова (3) виконується при $n = 6$ і отримаємо збалансовану шкалу з десятьма градаціями і інтервалами між градаціями 0,1. Отже, якщо $\Delta P_j^{ik} \in [0,1;0,25]$, будемо отримувати шкалу з градаціями від чотирьох до десяти з приблизно однаковими інтервалами між градаціями. Такі шкали наближаються до визначення «збалансована шкала».

Перейдемо до ситуації, коли $\Delta P_j^{ik} \in (0;0,1)$. Такий інтервал фіксується і розглядаються три інші інтервали, з яких знаходиться найменший

$$\Delta P_\alpha^{ik} = \min_{l=0,3;l \neq j} \{ \Delta P_l^{ik} \}, \quad \forall i, k.$$

За аналогією з (3) будемо використовувати наступну умову

$$n + 0,5 \leq \Delta P_l^{ik} / \Delta P_\alpha^{ik} < n + 1,5, \quad l \in \{0,3;l \neq j,\alpha\}. \quad (4)$$

Якщо (4) виконується для деякого n , то відповідний l -й інтервал ($l \neq j,\alpha$) поділяється на $n+1$ частину. Розглянемо ситуацію, коли $\Delta P_\alpha^{ik} \in [0,1;0,3]$. Як варіант припустимо $\Delta P_\alpha^{ik} = 0,1$. Тоді, якщо один з двох інтервалів дорівнює 0,1, за умови (4) кількість інтервалів буде 9 або 10 залежно від значення ΔP_j^{ik} в межах інтервалу $(0;0,1)$.

Розглянемо варіант, коли $\Delta P_j^{ik} = 0,3$, а $P_j^{ik} \rightarrow 0,1$.

У результаті отримаємо чотири градації, три з яких можна поділити на три. В результаті синтезовано збалансовану шкалу з десятьма градаціями та інтервалами, які наближаються до 0,1.

У тому випадку, коли $\Delta P_\alpha^{ik} \in (0;0,1)$, інтервали ΔP_j^{ik} та ΔP_α^{ik} виключаються з розгляду і до решти інтервалів використовується процедура аналогічна вище наведеній. Отже, на кожній ітерації, якщо мінімальний інтервал у межах $(0;0,1)$, він фіксується і виключається з подальшого розгляду, а до всіх інших, які більші або дорівнюють 0,1, використовується процедура, яка, за необхідністю, поділяє їх на декілька наближених до 0,1. У результаті ми отримуємо збалансовану шкалу в межах дванадцяти градацій, не порушуючи градації, отримані в результаті перетворення якісної бальної шкали у кількісну за допомогою функції корисності.

За аналогією з бальною якісною шкалою фокусних областей моделі СММІ може бути використана технологія перетворення бальної якісної шкали процесів моделі SPICE в кількісні шкали на основі МКЕО та теорії корисності.

Висновки, шляхи подальших досліджень. У роботі поняття якості ПР ПЗ розглядається з погляду його розвитку в часі. Визначено, що це комплексне поняття, яке складається з багатьох складових. Основну увагу приділено оцінці якості ПР ПЗ на основі моделей зрілості. Визначено, що відповідно до цих моделей оцінка якості окремих фокусних областей та процесів розглядається на основі якісних бальних шкал. Тому виникає ряд труднощів при синтезі та використанні моделей планування підвищення рівня зрілості (якості) ПР ПЗ. Тому у роботі запропоновано метод перетворення бальних якісних шкал у кількісні з подальшою їх трансформацією у збалансовані кількісні шкали.

Подальші дослідження будуть присвячені вирішенню наступних проблем:

- розробка методу трансформації якісної бальної шкали оцінки зрілості всього ПР ПЗ на основі дискретної моделі СММІ;
- розробка моделей оптимізації планування підвищення рівня можливості множин фокусних областей та процесів, відповідно моделей СММІ та SPICE;
- розробка моделі оптимізації планування підвищення рівня зрілості всього ПР ПЗ на основі збалансованої кількісної шкали дискретної моделі СММІ;
- розробка алгоритму оптимізації моделі планування підвищення рівня зрілості ПР ПЗ на основі методу послідовного аналізу варіантів.

Список використаної літератури

1. Rafa Al-Qutaish. Quality Models in Software Engineering Literature: An Analytical and Comparative Study. *Journal of American Science*. 2010. Vol. 6. P. 166–175.
2. Estdale J., Georgiadou E., Applying the ISO/IEC 25010 Quality Models to Software Product. Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2018. *Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 896. P. 492–503.
3. Mesquida Antoni, Ma Antònia, Alcover Amengual, Calvo-Manzano Jose. IT Service Management Process Improvement based on

- ISO/IEC 15504: A systematic review. *Information & Software Technology*. 2012. Vol. 5. P. 239–247.
- Mutafelija B., Stromberg *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Boca Raton: Auerbach Pubs, 2009. 406 p.
 - Годлевский М. Д., Брагинский И. Л. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости. *Проблемы информационных технологий*. Херсон: ОЛДИ-Плюс, 2012. С. 6–13.
 - Годлевский М. Д., Голоскокова А. А. Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. № 3/2 (75). С. 23–29.
 - Годлевский М. Д., Голоскокова А. О., Бурлаков Г. О. Динамична модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 10–16.
 - Сокол В. С., Годлевский М. Д., Малець Д. К. Оцінка якості процесу розробки програмного забезпечення ІТ-компанії на основі використання функції корисності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 1 (11). С. 9–17.
 - Крючковский В. В., Петров Э. Г., Соколова Н. А., Ходаков В. Е. *Интроспективный анализ. Методы и средства экспертного оценивания*. Херсон: Гринь Д. С., 2011. 168 с.
 - Saaty T. L. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh: RWS Publ., 1996. 370 p.
 - Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997. Vol. 6. P. 309–319.
 - Lootsdoma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989. Vol. 40. P. 109–116.
 - ISO/IEC 15504: A systematic review. *Information & Software Technology*. 2012, vol. 5, pp. 239–247.
 - Mutafelija B., Stromberg *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Boca Raton, Auerbach Pubs, 2009, 406 p.
 - Hodlevs'kyi M. D., Brahyns'kyi Y. L. Dynamichna model' i alhorytm upravlinnya yakisty protsesu rozrobky prohramnykh system na osnovi modeli zrelosti [A dynamic model and algorithm for quality control of the development process of software systems based on the maturity model]. *Problemy ynformatsyonnykh tekhnolohyy* [Information Technology Issues]. Kherson, OLDY-Plyus Publ., 2012, pp. 6–13.
 - Hodlevs'kyi M. D., Holoskokova A. A. Syntez statychnykh modeley planuvannya polipshennya yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya [Synthesis of static planning models for improving the quality of the software development process]. *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Kharkiv, 2015, no. 3/2 (75), pp. 23–29.
 - Hodlevs'kyi M. D., Holoskokova A. O., Burlakov H. O. Dynamichna model' planuvannya rozvytku pidmnozhyzny protsesiv etalonnoyi modeli zrelosti SPICE [A dynamic development planning model for a subset of processes of the SPICE Maturity Reference Model]. *Visnyk NTU "KhPI": zb. nauk. pr. Seriya: Sy'stemny'j analiz, upravlinnya ta informacijni tekhnolohiyi*. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 10–16.
 - Sokol V. Ye., Hodlevs'kyi M. D., Malets D. K. Otsinka yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya IT-kompanii na osnovi vykorystannia funktsii korysnosti. [Quality assessment of the software development process of an IT company based on the use of the utility function]. *Visnyk NTU "KhPI": zb. nauk. pr. Seriya: Sy'stemny'j analiz, upravlinnya ta informacijni tekhnolohiyi*. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1 (11), pp. 9–17.
 - Kryuchkovskiy V. V., Petrov E. G., Sokolova N. A., Khodakov V. Ye. *Introspektivnyy analiz. Metody i sredstva ekspertnogo otsenivaniya*. [Introspective analysis. Methods and means of expert assessment]. Kherson, Grin D. S. Publ., 2011, 168 p. (In Russ.).
 - Saaty T. L. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, RWS Publ., 1996, 370 p.
 - Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997, vol. 6, pp. 309–319.
 - Lootsdoma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989, vol. 40, pp. 109–116.

References (transliterated)

- Rafa Al-Qutaiash. Quality Models in Software Engineering Literature: An Analytical and Comparative Study. *Journal of American Science*. 2010, vol. 6, pp. 166–175.
- Estdale J., Georgiadou E. Applying the ISO/IEC 25010 Quality Models to Software Product. Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2018. *Communications in Computer and Information Science*. 2018, vol 896, pp. 492–503
- Mesquida Antoni, Ma Antònia, Alcover Amengual, Calvo-Manzano Jose. IT Service Management Process Improvement based on
- Saaty T. L. *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, RWS Publ., 1996, 370 p.
- Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997, vol. 6, pp. 309–319.
- Lootsdoma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989, vol. 40, pp. 109–116.

Надійшло (received) 10.11.2025

UDC 004.4: 519.816

V. Ye. SOKOL, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor, Scientific Researcher - The Learning Technologies Research Group RWTH Aachen University; e mail: sokol@cs.rwth-aachen.de; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>

M. D. GODLEVSKIY, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Director of the Institute of Computer Science and Information Technology, Kharkiv, Ukraine; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

D. K. MALETS, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Graduate Student, e-mail: dmytro.malets@cs.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1980-1401>

K. O. AFANASIEV, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Graduate Student, e-mail: Kostiantyn.Afanasiev@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6665-7459>

SYNTHESIS OF QUANTITATIVE MATURITY MODEL SCALES FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS

In this work, the concept of quality is defined as one of the most important indicators for evaluating products and services. The main stages of the evolution of this concept are examined. At the fourth stage, characterized by Total Quality Management (TQM), the ISO 9000 series of quality system standards emerges. The TQM stage and these standards are marked by the beginning of their application to software (SW) and the software development (SD) process. The paper reviews standards related to the following maturity models for assessing the SD process: Capability Maturity Model Integration (CMMI) and Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE). The CMMI model has two usage options: continuous and staged, while the SPICE model is only continuous. In the continuous model, maturity is assessed based on the following components: focus areas for CMMI and processes for SPICE. The staged CMMI model evaluates the quality of the entire software development process. In all three cases, quality is determined using score-based qualitative scales. Further research showed that score-based scales are not fully suitable for planning quality improvement in the SD process. Therefore, the goal of the study was to develop a technology for converting score-based qualitative scales into quantitative ones using

a utility function, which made the developed models more adequate to real-world SD processes. Based on this, a technology for transforming a score-based qualitative scale into a quantitative scale using a utility function is proposed. The essence of the technology is that each capability level is treated as an alternative utility value for a focus area or process. Then the methodology of collective expert evaluation is applied, specifically the Analytic Hierarchy Process (AHP) pairwise comparison method by Saaty, in which a team of experts assesses the utility of capability levels relative to one another. As a result, specific utility values for each capability level are obtained on a scale from zero to one. Appropriate resources are required for planning the quality improvement of individual focus areas and processes. Therefore, the next task is cost optimization aimed at maximizing the utility function. A technology for constructing balanced quantitative scales based on the obtained quantitative maturity model scales is presented. The essence of a balanced scale is that the intervals between individual utility estimates for a focus area or process, depending on the resources provided, should not differ significantly. One of the most significant directions for further research is the development of an optimization algorithm for planning the improvement of SD process maturity levels based on the method of sequential option analysis.

Keywords: software development process, quality, maturity model scales, cost optimization, optimization planning model, expert methods, sequential option analysis method.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Сокол Володимир Євгенович / Sokol Volodymyr Yevgenovych

Автор 2 / Author 2: Годлевський Михайло Дмитрович / Godlevskiy Mykhaylo Dmytrovych

Автор 3 / Author 3: Малець Дмитро Костянтинович / Malets Dmytro Kostyantynovych

Автор 4 / Author 4: Афанасьєв Костянтин Олексійович / Afanasiev Kostiantyn Oleksiyovych