



Ю. І. Грицюк

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розроблено систему комплексного оцінювання якості програмного забезпечення (ПЗ), яка дає змогу визначити стан його якості на кожному ієрархічному рівні системи управління з урахуванням вартості розроблення, а також надає можливість встановити потенційні витрати для переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший. З'ясовано, що якість ПЗ – багатопланове поняття, яке можна виразити адекватно тільки деякою структурованою системою характеристик та атрибутів, яку прийнято називати моделлю якості програмного продукту. Для оцінювання якості ПЗ було використано комплекс критеріїв, які максимально його характеризують насамперед стосовно функціональних можливостей і варіантів використання. Встановлено, що модель якості – головний атрибут комплексної системи оцінювання ПЗ, позаяк визначає, які характеристики якості продукту потрібно враховувати при оцінюванні його властивостей. Рівень, за якого ПЗ задовольняє заявлені та опосередковані потреби різних зацікавлених сторін і, в такий спосіб, забезпечує його значущість для них є саме тими властивостями, що відображено в моделі якості, яка класифікує їх на характеристики та підхарактеристики. Розроблено метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за вхідними критеріями чи агрегованими показниками, що дає змогу визначити поточний стан якості ПЗ за відповідним агрегованим показником з урахуванням вартості його розроблення. Розроблено метод вибору оптимального варіанту системи комплексного оцінювання якості ПЗ з множини допустимих альтернатив, яка враховує ієрархічну структуру критеріїв і агрегованих показників його якості на кожному ієрархічному рівні. Встановлено, що задача вибору оптимального варіанту системи оцінювання якості ПЗ з урахуванням таких критеріїв, як зручність супроводу продукту та його портативності, безпеки продукту та його сумісності, а також надійності роботи продукту, зручності використання та функціональної придатності належить до задач багатокритеріальної оптимізації. Наведено приклад реалізації системи комплексного оцінювання якості ПЗ, що дає змогу зрозуміти сутність зазначеного методу вибору оптимального її варіанту, а також методу відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за двома критеріями чи агрегованими показниками.

Ключові слова: модель якості програмного продукту; критерії та показники якості; система управління; оптимізація системи; прийняття управлінських рішень.

Вступ / Introduction

Зазвичай, під якістю програмного забезпечення (ПЗ) розуміють набір властивостей продукту (сервісу або програми), що сукупно характеризують його здатність задовольнити встановлені або передбачувані потреби замовника, які він висловив у вигляді його майбутніх можливостей [23]. В різних літературних джерелах [37, 38] поняття якості програмного продукту має різні інтерпретації залежно від конкретних його можливостей. Тому якість ПЗ – це відносне поняття, що має сенс тільки при врахуванні реальних умов його функціонування. Водночас, користувацькі вимоги, пред'явлені до якості ПЗ, формують залежно від галузі застосування й конкретного його призначення [24, 25].

Поняття якості ПЗ – багатопланове, тобто його можна виразити адекватно тільки деякою структурованою системою характеристик та атрибутів, яку прийнято називати моделлю якості програмного продукту [26, 27]. Для оцінювання якості ПЗ використовують комплекс критеріїв, які максимально його характеризують, насамперед щодо функціональних можливостей і варіан-

тів використання [25, 30]. Під критеріями якості ПЗ розуміють деякі ознаки, які можна застосовувати як для його оцінювання й визначення, так і для класифікації певних характеристик чи атрибутів [9].

Процес розроблення ПЗ (англ. *Software Development Process*), що містить складні технологічні операції та процедури, потребує постійного контролю за належним виконанням користувацьких вимог до нього на кожному етапі реалізації програмного проекту [27]. Моніторинг за показниками якості ПЗ протягом всього періоду його розроблення та під час подальшого супроводу надає керівнику проекту можливість контролювати цей процес і, тим самим, покращувати готовність поточних продуктів проекту до їх експлуатації [11]. Методи забезпечення контролю якості ПЗ на всіх етапах реалізації програмного проекту [14] спрямовані на підвищення ступеня задоволення як замовників ПЗ, так і безпосередніх його користувачів від отриманих його можливостей та зручності використання у виробничих умовах [35].

Управління якістю ПЗ (англ. *Software Quality Management*) – це процес, спрямований на розроблення про-

Інформація про автора:

Грицюк Юрій Іванович, д-р техн. наук, професор, кафедра програмного забезпечення.

Email: yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8183-3466>

Цитування за ДСТУ: Грицюк Ю. І. Система комплексного оцінювання якості програмного забезпечення. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 2. С. 81–95.

Citation APA: Hrytsiuk, Yu. I. (2022). Comprehensive software quality assessment system. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(2), 81–95. <https://doi.org/10.36930/40320213>

дукту проекту з дотриманням специфікації вимог до нього, щоб найкраще забезпечити відповідність продукту стандартам якості, очікуваним замовником, а також він має відповідати будь-яким необхідним нормативним вимогам і вимогам розробника, якщо вони як такі є [23]. Професійний підхід до управління якістю ПЗ базується на тому, що його якість – це чітко визначена величина, яку можна виміряти й проконтролювати, поза-як вона піддається як регулюванню, так і удосконаленню з набуттям досвіду керівника проекту [36]. Знання поточних значень показників якості ПЗ дає змогу керівнику проекту простежити, наскільки далеко вони знаходяться від критичних значень чи їх близькості до запланованих. Якщо ж ці значення є вищими (що трапляється вкрай рідко), то потрібно проаналізувати перевитрати наявних ресурсів – як людських і матеріальних, так і фінансових [13, 45]. Також такі знання дають можливість керівнику проекту стежити за динамікою поточних значень показників якості ПЗ, завдяки чому можна прогнозувати й планувати термін завершення програмного проекту або момент переходу до наступного етапу його реалізації [38].

Система якості ПЗ (англ. *Software Quality System*) – набір складових організаційної структури, відповідальності, процедур, процесів і ресурсів, що сукупно забезпечують загальне управління якістю програмної продукції [23, 41]. Під час розроблення організаційної структури системи управління якістю ПЗ за основу приймають набір моделей для отримання агрегованих показників якості ПЗ, кожен з яких формується за відповідним правилом, що відображає певні особливості надання переваг відповідним критеріям [9]. Також такі моделі мають достатньо повно відображати основні особливості функціонування системи управління якістю ПЗ та забезпечувати гнучкість прийняття управлінських рішень [33]. Сукупність таких моделей утворює ієрархічну структуру системи управління якістю ПЗ, у вершині якої знаходиться метамодель системи з найбільш загальним уявленням про неї. Водночас, на наступних рівнях ієрархії розміщують функціональні моделі конкретних локальних завдань, які потрібно вирішити для досягнення загальної мети управління якістю ПЗ, використавши при цьому в достатньому обсязі як всі функціональні можливості системи управління, так і допустимі варіанти її використання [6].

Для розроблення ієрархічної структури системи управління якістю ПЗ здійснюють декомпозицію метамоделі на складові частини з доведенням їх до функціональних моделей певного ієрархічного рівня зі своїми формальними постановками відповідних завдань управління [7]. Також тут розробляють їх математичне формулювання, алгоритми розв'язання й програмну реалізацію, а, на завершення, формують відповідні процедури прийняття управлінських рішень для кожного завдання з узгодженням отриманих рішень на загальносистемному рівні та моніторингом їх виконання [41].

Внаслідок декомпозиції кожного завдання комплексний показник ефективності функціонування системи управління якістю ПЗ апроксимують певним набором часткових агрегованих показників, які сукупно відображають набір бажаних техніко-економічних показників діяльності ІТ-компанії, для отримання очікуваних значень яких складають і вирішують відповідні локальні завдання [32]. Бажання врахувати основні особливості

функціонування системи управління якістю ПЗ і негативні прояви на неї як внутрішніх чинників, так і зовнішнього часто агресивного середовища призводить до значної розмірності математичних моделей і складності інтерпретації отриманих розв'язків задач [2]. Для вирішення цієї проблеми застосовують концепцію багато-модельності [3, 46], зорієнтовану на створення конструктивного математичного опису локальним підсистем управління якістю ПЗ у вигляді набору компактних і працездатних моделей незначної складності [1], об'єднаних між собою загальною метою управління.

Не претендуючи на кардинальні зрушення в наявній системі управління якістю програмних продуктів, спробуємо внести і свою лепту в розроблення тільки системи оцінювання якості ПЗ з використанням стандартної моделі його якості. Тому, як на сьогодні, видається нам актуальним дослідження, яке стосується розроблення адекватної системи комплексного оцінювання якості ПЗ методом ієрархічної структури критеріїв, обґрунтування критеріїв і агрегованих показників його якості та їхньої важливості для кожного з ієрархічних рівнів, що дасть змогу визначити як часткові стани якості продуктів проекту з урахуванням вартості їх розроблення, так і загальний стан якості програмного продукту.

Об'єкт дослідження – система комплексного оцінювання якості ПЗ.

Предмет дослідження – методи і засоби розроблення системи комплексного оцінювання якості ПЗ на підставі моделі його якості, затвердженої стандартом ISO/IEC, що дасть змогу визначити стан його якості та потенційні витрати для переходу з одного стану в інший.

Мета роботи – розробити систему комплексного оцінювання якості ПЗ, яка б дала змогу визначити стан його якості на кожному ієрархічному рівні системи управління з урахуванням вартості розроблення, а також встановити потенційні витрати для переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати останні дослідження та публікації, вибрати серед них такі, які дають можливість в повному обсязі зрозуміти сутність об'єкта і предмета дослідження;
- проаналізувати наявну модель якості програмного продукту, затверджену стандартом ISO/IEC, що дасть змогу встановити характеристики та підхарактеристики системи якості, а також визначити комплекс критеріїв, які максимально будуть її характеризувати насамперед щодо функціональних можливостей і варіантів використання;
- розробити метод вибору оптимального варіанту системи комплексного оцінювання якості ПЗ з множини допустимих альтернатив, який має враховувати ієрархічну структуру критеріїв і агрегованих показників його якості на кожному ієрархічному рівні;
- розробити метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ з врахуванням ієрархічної структури критеріїв і агрегованих показників, що дасть змогу визначити поточний стан якості ПЗ з урахуванням вартості його розроблення;
- з'ясувати особливості переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший, а також визначити потенційні витрати для здійснення такого переходу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Якість ПЗ є основною характеристикою продукту (сервісу або програми) в різних сферах використання інформаційних технологій [36], яка вказує на ступінь його/її відповідності встановленим вимогам [37]. Зазвичай, такі вимоги різні науковці трактують по-різному [11], що породжує декілька незалежних визначень цього терміна

[4, 38]. Водночас, стандарт ISO/IEC 9126 [25] регламентує зовнішні й внутрішні характеристики якості ПЗ. Якщо зовнішні характеристики відображають вимоги до функціонування ПЗ [28], то внутрішні характеристики використовують для складання плану досягнення необхідних зовнішніх характеристик його якості [29, 30].

Зазвичай, під оцінюванням якості ПЗ розуміють дії, що визначають, як саме ПЗ відповідає своєму призначенню [3, 4, 14]. Якість ПЗ оцінюють з використанням моделі якості [26, 27]. Таке оцінювання набуває особливого значення із розвитком і вдосконаленням технологій оброблення експертних даних [16]. Усе це призвело до потреби розроблення нових методів і засобів комплексного оцінювання різноманітних характеристик якості ПЗ, які б враховують як невизначеності вхідної інформації, так і суб'єктивність оцінок експертів [12, 16, 46]. Особливості застосування моделей оцінювання якості ПЗ за визначеними методиками розглянуто в роботах [6, 9, 35].

Експертні методи оцінювання якості продукції добре себе показали в різних виробничих сферах [12, 36], а тому багато теоретиків і практиків у галузі інформаційних технологій спробували перенести цей досвід на процес розроблення ПЗ та управління його якістю [6, 37]. Загалом, застосування експертних технологій дає змогу бізнес-аналітикам визначити як якість майбутнього та вже розробленого ПЗ, так і складність реалізації програмного проекту [7, 11, 16]. Щодо застосування методів і засобів експертного оцінювання якості ПЗ, то ця проблема широко висвітлена в дослідженні [36]. У різних наукових працях процес експертного оцінювання якості ПЗ описано з урахуванням сфери компетентності експертів і за умови фіксації важливості кожного з них за встановленими критеріями [32]. Водночас, у дослідженні [5, 16] запропоновано метод оцінювання якості веб-матеріалів на базі оцінок двох груп респондентів – "користувачів" та "експертів".

Проте, процедура оцінювання якості ПЗ та наявні методи і засоби забезпечення цієї якості, як власне і процес розроблення самого ПЗ хоча і забезпечені фундаментальною теорією та ефективною методологією [4], проте багато досліджень, які стосуються пізніх етапів життєвого циклу ПЗ, мають хаотичний, несистематизований характер [11]. Водночас, як доведено у роботах [37, 38], саме в кінці етапу проектування архітектури ПЗ можна й варто виявляти та усувати до 55 % всіх недоліків майбутнього програмного продукту.

Організаційна структура управління (англ. *Organizational Structure of Management*) – це впорядкована сукупність взаємопов'язаних елементів, що знаходяться між собою у стійких взаємостосунках, які забезпечують їх функціонування та розвиток як єдиного цілого [13, 31, 40]. Ретельно розроблена організаційна структура компанії є логічною передумовою успіху в діловому кліматі 21-го століття [7, 41, 43]. Однак хороша структура є недостатньою без добре розробленої системи управління [1, 2], яка може слугувати міцною основою для управління компанією та підтримки прийнятих рішень. Щоб бути ефективно розробленою, система управління повинна враховувати всі контекстуальні та культурні чинники, які можуть вплинути на роботу ІТ-компанії [7, 9, 14].

Ефективність використання в українських ІТ-компаніях наявних і впровадження нових систем управління

якістю ПЗ залежить від багатьох постійних і випадкових чинників, у т.ч. і від процедури прийнятих рішень і їхнього практичного втілення у виробничий процес [8, 32, 39, 44]. Для того, щоб управлінське рішення було дієвим і ефективним, потрібно дотримуватися відповідних методів, апробованих методик і визначених методологічних основ до їх прийняття [10, 33, 40, 42].

Прийняття рішення, як правило, взаємопов'язане з вибором наряду дії [8, 32]. Важко прийняти ефективне рішення без спеціального аналізу різноманітних альтернатив [11, 14, 43]. Як показує практика діяльності ІТ-компаній, більшість рішень, прийнятих керівниками проектів чи їх менеджерами [3, 9, 37], базуються на їхній інтуїції, власному досвіді роботи, або на горезвісному "може вдасться". Такий підхід нерідко призводить до помилок, розчарувань, непередбачених витрат і неминучих втрат [11, 31].

Отже, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій дав змогу вибрати серед них такі, які уможливають в повному обсязі зрозуміти сутність об'єкта і предмета дослідження. Також стало зрозуміло, що якість ПЗ – багатопланове поняття, яке можна виразити адекватно тільки деякою структурованою системою характеристик та атрибутів, яку прийнято називати моделлю якості програмного продукту.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

1. Модель якості програмного продукту. Якість програмного продукту (англ. *Software Product Quality*) – набір властивостей, що характеризує його здатність задовольнити встановлені або передбачувані потреби замовника. Поняття якості має різні інтерпретації залежно від конкретного програмного продукту і вимог до нього [26, 27].

Якість програмної системи (англ. *Software System Quality*) – рівень, за якого ця система задовольняє заявлені та опосередковані потреби різних зацікавлених сторін і, в такий спосіб, забезпечує її значущість для них. Їхні потреби, наприклад функціональність, продуктивність, безпека, зручність супроводу тощо, є саме тими властивостями, що відображено в моделі якості, яка класифікує їх на характеристики та підхарактеристики.

Модель якості програмного продукту (англ. *Software Product Quality Model*) – головний атрибут комплексної системи його оцінювання. Вона визначає, які характеристики якості програмного продукту потрібно враховувати при оцінюванні його властивостей. Моделі мають різну кількість рівнів і повністю або частково збігаються щодо набору характеристик якості. Наприклад, модель якості Мак Колла на найвищому рівні має три характеристики: функціональність, модифікованість і переносність, а на нижчих рівнях моделі – 11 підхарактеристик якості і 18 критеріїв (атрибутів) якості. Окрім цього, у різних джерелах таксономія (класифікація) характеристик у моделі якості різняться собою.

Сучасна модель якості програмного продукту, визначена в стандарті ISO/IEC 25010 [27] (затверджений у грудні 2019 року), містить вісім характеристик і 31 підхарактеристики якості (рис. 1). Цей стандарт є серйозним доопрацюванням стандарту ISO/IEC 9126 [26]. У новий стандарт внесено дві додаткові характеристики та 7 підхарактеристик – сумісність та безпеку, які значно детальніше описують процес забезпечення якості

програмного продукту, а також введені уточнення та перегрупування характеристик для більш ясного їхнього розуміння. Розглянемо їх дещо детальніше.

Функціональна придатність (англ. *Functional Suitability*) – рівень, за якого продукт або система забезпечує функції, які відповідають заявленим і передбачуваним потребам зацікавлених сторін під час його/її використання за певних умов роботи. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **функціональна повнота** (англ. *Functional Completeness*) – рівень, за якого набір функцій охоплює всі задані завдання та цілі користувача;
- **функціональна коректність** (англ. *Functional Correctness*) – рівень, за якого продукт або система забезпечує правильні результати з необхідним ступенем точності;
- **функціональна відповідність** (англ. *Functional Appropriateness*) – рівень, за якого наявні функції продукту або програмної системи сприяють виконанню визначених завдань і цілей користувача.



Рис. 1. Модель якості програмного продукту / Software Product Quality Model [24]

Ефективність виконання (англ. *Performance Efficiency*) – продуктивність продукту або системи відносно кількості ресурсів, які він/вона можуть використовувати за вказаних умов роботи. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **поведінка в часі** (англ. *Time Behaviour*) – рівень, за якого час реагування продукту або системи, тривалість оброблення даних, а також його/її пропускна здатність при виконанні своїх функцій відповідають вимогам користувача;
- **використання ресурсів** (англ. *Resource Utilization*) – рівень, за якого обсяги та види ресурсів, які використовує продукт або система при виконанні своїх функцій, відповідають вимогам користувача;
- **можливість** (англ. *Capacity*) – рівень, за якого максимальні межі продукту або параметри системи відповідають вимогам користувача.

Сумісність (англ. *Compatibility*) – рівень, за якого продукт, система чи їхні компоненти можуть здійснювати обмін даними з іншими продуктами, системами чи компонентами та/або виконувати свої функції під час спільного використання одного апаратного чи програмного середовища. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **спільне існування** (англ. *Co-existence*) – рівень, за якого продукт або система може ефективно виконувати свої функції, використовуючи спільне середовище та ресурси з іншими продуктами/системами, без шкідливого впливу на будь-який інший продукт/систему;
- **інтероперабельність** (англ. *Interoperability*) – рівень, за якого два або більше продуктів, систем чи їхніх компонентів можуть здійснювати обмін даними та використовувати інформацію, якою обмінялися.

Зручність використання (англ. *Usability*) – рівень, за якого продукт або систему можуть використовувати певні користувачі для досягнення визначених цілей з ефективністю, результативністю та задоволенням у визначеному контексті використання. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **розпізнаваність відповідності** (англ. *Appropriateness Recognisability*) – рівень, за якого користувачі можуть розпізнати, чи відповідає наявний продукт або система їхнім потребам;
- **придатність до навчання** (англ. *Learnability*) – рівень, за якого продукт або систему можуть використовувати певні користувачі для досягнення визначених цілей навчання з ефективністю, результативністю, позбавленням ризику та задоволенням у визначеному контексті використання;

- **практичність** (англ. *Operability*) – рівень, за якого продукт або система мають атрибути, які полегшують його управління та контроль за ним;
- **захист від помилок користувача** (англ. *User Error Protection*) – рівень, за якого продукт або система захищає користувачів від помилок роботи з ним/нею;
- **естетика користувацького інтерфейсу** (англ. *User Interface Aesthetics*) – рівень, за якого інтерфейс користувача забезпечує приємну та зручну взаємодію користувача з ним;
- **доступність** (англ. *Accessibility*) – рівень, за якого продукт або систему можуть використовувати користувачі з найширшим набором потреб і можливостей для досягнення визначеної мети в певному контексті використання.

Надійність (англ. *Reliability*) – рівень, за якого продукт, система або їхні компоненти виконують свої функції за певних умов роботи протягом певного періоду часу. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **зрілість** (англ. *Maturity*) – рівень, за якого продукт, система або їхні компоненти відповідають потребам користувача щодо зручності використання за нормальної експлуатації;
- **доступність** (англ. *Availability*) – рівень, за якого продукт, система або їхні компоненти функціонують і доступні користувачу, коли це необхідно йому для використання;
- **відмовостійкість** (англ. *Fault Tolerance*) – рівень, за якого продукт, система або їхні компоненти належно функціонують, незважаючи на наявність апаратних чи програмних збоїв;
- **відновлюваність** (англ. *Recoverability*) – рівень, за якого, у разі переривання роботи або збою мережі, продукт або система можуть відновити дані, на які він/вона безпосередньо впливає, і можуть відновити потрібний стан своїх функцій.

Безпека (англ. *Security*) – рівень, за якого продукт або система захищає дані та інформацію, щоб користувачі та інші продукти чи системи мали можливість доступу до них, відповідних їм дозволів і рівням авторизації. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- **конфіденційність** (англ. *Confidentiality*) – рівень, за якого продукт або система гарантує, що дані доступні тільки тим користувачам, хто має право доступу до них;
- **цілісність** (англ. *Integrity*) – рівень, за якого продукт, система або їхні компоненти запобігає несанкціонованому доступу до комп'ютерних програм або бази даних щодо їх модифікації;
- **невідмовність** (англ. *Non-repudiation*) – рівень, за якого можна довести, що певні дії чи події відбулися раніше, аналогічно як не можуть бути спростовані пізніше;

- *підзвітність* (англ. *Authenticity*) – рівень, за якого будь-які дії суб'єкта взаємодії можуть бути однозначно відстежені для нього;
- *автентичність* (англ. *Accountability*) – рівень, за якого можна довести, що ідентичність предмета чи ресурсу є тим, що заявлено в продукті або системі чи базі даних.

Зручність супроводу (англ. *Maintainability*) – рівень ефективності та результативності, за якого продукт або систему можна встановити для того, щоб його/її вдосконалити, виправити або адаптувати до зміни користувацького середовища та вимог до їх функцій. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- *модульність* (англ. *Modularity*) – рівень, за якого продукт або система містить такі дискретні компоненти, що зміна одного з них має мінімальний вплив на інші;
- *можливість повторного використання* (англ. *Reusability*) – рівень, за якого актив компонент можна використовувати в кількох продуктах або системах чи при створенні інших активів компонент;
- *аналізованість* (англ. *Analysability*) – рівень ефективності та результативності, за якого можна оцінити вплив на продукт або систему передбачуваної зміни однієї або кількох його/її частин, або діагностувати продукт/систему на наявність недоліків чи причин несправностей, або ідентифікувати частини, які підлягають модифікації;
- *можливість модифікації* (англ. *Modifiability*) – рівень, за якого продукт або систему можна ефективно та дієво модифікувати без внесення дефектів або погіршення якості наявного продукту;
- *тестованість* (англ. *Testability*) – рівень ефективності та результативності, за якого можна встановити критерії тестування для продукту, системи або їхніх компонент, а також виконати тестування, щоб визначити, чи відповідають вони цим критеріям.

Портативність (англ. *Portability*) – рівень ефективності та результативності, за якого система, продукт або їхні компоненти можуть бути перенесені з одного апаратного, програмного або іншого операційного чи користувацького середовища в інше. Ця характеристика містить такі підхарактеристики:

- *адаптивність* (англ. *Adaptability*) – рівень, за якого наявний продукт або систему можна ефективно та дієво адаптувати до різних наявних апаратних засобів або таких, що розвиваються, до програмного забезпечення чи інших операційних і користувацьких середовищ;
- *можливість встановлення* (англ. *Installability*) – рівень ефективності та результативності, за якого продукт або систему можна успішно встановити та/або видалити у визначеному середовищі;
- *замінність* (англ. *Replaceability*) – рівень, за якого продукт або систему може замінити інший аналогічний продукт чи система для розроблення мети його/її використання в тому ж самому операційному чи користувацькому середовищі.

Отже, розглянуті вище під/характеристики моделі ЯПП можна успішно використовувати для оцінювання чи встановлення якості як нового, так і модифікованого програмного забезпечення (ПЗ) чи будь-якої програмної системи. Водночас, наведені під/характеристики є не що інше, як основа для запровадження системи оцінювання якості ПЗ, яка для кожної ІТ-компанії на загал мала б бути однаковою. Однак, залежно від спеціалізації компаній щодо виготовлення того чи іншого ПЗ, а також надання пріоритету тим чи іншим під/характеристикам моделі ЯПП, запроваджені системи оцінювання їх якості можуть дещо відрізнятися між собою. Нагадаємо, що спеціалізація ІТ-компаній дає їм конкурентну перевагу на ринку ПЗ і свободу ставити на свої послуги вищу вартість, позаяк зацікавлені сторони готові платити за надану кваліфікацію. Тому, як на думку багатьох

фахівців [6, 11, 35, 44], майбутнє за вузькою спеціалізацією ІТ-компаній, за тим, щоб надавати такі послуги, які не можуть надавати інші.

Складність запровадження однакової системи оцінювання якості ПЗ полягає ще й в тому, що для багатьох ІТ-компаній часто важко одночасно враховувати в одному ПЗ всі під/характеристики моделі ЯПП, адже більшість з них є якісними. Водночас, кількісні під/характеристики хоча і можна визначити за допомогою відповідних метрик, однак вхідні параметри для багатьох з них є складними не тільки для обліку, а й для об'єктивного встановлення.

Як на нашу думку, то якість ПЗ може мати три стани: незадовільний, задовільний і добрий, що відповідає трибальній шкалі його оцінювання, а саме 2, 3 і 4 бали. За більш прискіпливого оцінювання стану якості ПЗ можна використати п'ятибальну шкалу: погано, незадовільно, задовільно, добре і відмінно. Також для оцінювання якості ПЗ можна використовувати й інші шкали, наприклад, 10-ти чи 100-бальну, однак вони мають як свої переваги, так і значні недоліки.

Отже, проведений аналіз наявної моделі якості програмного продукту, затвердженої стандартом ISO/IEC, дає змогу встановити характеристики та підхарактеристики системи якості ПЗ, а також визначити комплекс критеріїв для побудови ієрархічної їх структури.

2. Система комплексного оцінювання якості програмного забезпечення методом ієрархічної структури критеріїв. Щоб врахувати декілька критеріїв у системі оцінювання якості ПЗ [9], доводиться розв'язувати багатокритеріальну задачу пошуку оптимального варіанту з множини допустимих [2, 37]. Як правило, різні цілі запровадження таких систем у кожній ІТ-компанії здебільшого суперечливі між собою [33]. Наприклад, збільшення показника портативності ПЗ часто призводить до зменшення зручності його супроводу. Великі витрати на підвищення безпеки ПЗ значно ускладнюють програмно-апаратні засоби досягнення його портативності. Надмірна сумісність ПЗ викликає значні нарікання працівників щодо його обслуговування. Забезпечення високої надійності роботи ПЗ часто призводить до погіршення зручності його використання, а ефективність виконання – до функціональної придатності. Тому задача вибору оптимального варіанту системи оцінювання якості ПЗ з урахуванням таких критеріїв, як зручність супроводу продукту та його портативності, безпеки продукту та його сумісності, а також надійності роботи продукту, зручності використання та функціональної придатності належить до задач багатокритеріальної оптимізації [32, 46].

Існує декілька підходів до розв'язання такого класу задач, більшість з яких так чи інакше пов'язані з формуванням комплексного показника ефективності допустимого варіанту [2, 18, 39], значення якого в агрегованому чи комплексному вигляді за певних умов поєднання наявних критеріїв може адекватно відображати задану керівником ІТ-компанії стратегію запровадження своєї системи оцінювання якості ПЗ. Тому, свого часу, для прийняття обґрунтованих управлінських рішень велику популярність отримав метод формування комплексного показника ефективності проектного об'єкта на підставі побудови ієрархічної структури (дерева) критеріїв його відбору. Ідея методу полягає в тому, що всі початкові критерії організовують в певну ієрархічну структу-

ру, на кожному рівні якої будують агрегований показник поточної ефективності об'єкта тільки за двома критеріями, агрегованими показниками чи їхнім поєднанням з попереднього ієрархічного рівня.

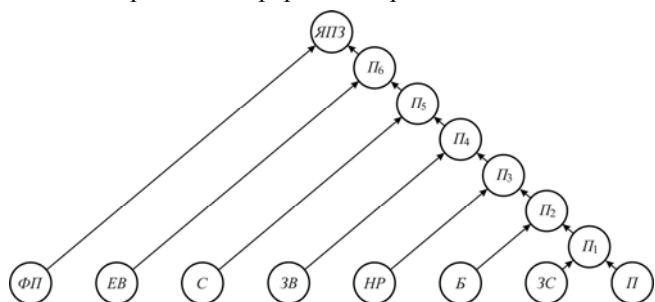


Рис. 2. Ієрархічна структура критеріїв і агрегованих показників якості ПЗ / Hierarchical structure of criteria and aggregate software quality indicators

В моделі якості ПЗ введемо такі позначення для її характеристик: функціональна придатність (ФП); ефективність виконання (ЕВ); сумісність (С); зручність використання (ЗВ); надійність (НР) роботи; безпека (Б); зручність супроводу (ЗС); портативність (П).

На рис. 2 наведено ієрархічну структуру для восьми критеріїв комплексного оцінювання якості ПЗ, які забезпечують його сумісність і безпеку, гарантують зручність супроводу та відповідний рівень портативності, забезпечують надійність роботи та зручність використання, гарантують функціональну придатність і ефективність виконання. Загалом ці критерії, які достеменно відображають модель ЯПП (див. рис. 1), дають можливість отримати належну оцінку якості як нового, так і модифікованого ПЗ. З рис. 2 також видно, що спочатку потрібно об'єднати критерій оцінювання зручності супроводу (ЗС) продукту з критерієм його портативності (П) в один агрегований показник, що відображає певну оцінку поточної якості (П₁) продукту. Далі, об'єднуючи критерій оцінювання безпеки (Б) продукту з агрегованим показником (П₁), отримуємо наступний агрегований показник оцінювання поточної якості (П₂) продукту. Потім, об'єднуючи критерій оцінювання надійності роботи (НР) продукту з агрегованим показником (П₂), отримуємо наступний агрегований показник оцінювання поточної якості (П₃) продукту і т.д. Виконуючи аналогічні дії зі всіма наступними критеріями попарно з попередніми агрегованими показниками поточної якості ПЗ, отримуємо один агрегований і водночас комплексний показник остаточної якості ПЗ, екстремальне значення якого дає можливість його відібрати як оптимального варіанту з множини допустимих.

Однак, наведена на рис. 2 ієрархічна структура наявних критеріїв і отриманих агрегованих показників поточної якості ПЗ є не зовсім придатною для практичного її використання. Насамперед така структура містить ще шість додаткових показників оцінювання поточної якості ПЗ, агреговані назви яких не наведено через відсутність логічних міркувань щодо них як таких. Окрім цього, також не зрозуміло, чому потрібно об'єднувати критерії оцінювання якості ПЗ саме в такому порядку, як це показано на рисунку, а не в будь-якому іншому, тобто, варто би аргументувати порядок їх агрегування. Бо, як виявиться згодом, це має значення не тільки для виробничо-господарської діяльності будь-якої ІТ-компанії, але й для її бухгалтерського обліку та фінансової звітності [13, 45].

Для виходу з цієї ситуації проаналізуємо дещо детальніше характеристики програмного продукту з їхньої моделі якості (див. рис. 1) і спробуємо зробити деякі логічні висновки щодо порядку їх агрегування, що дасть нам змогу значно спростити ієрархічну структуру критеріїв, у т.ч. й агрегованих показників, для комплексного оцінювання якості ПЗ (див. рис. 2). Насамперед, як на думку багатьох виробників [12, 13, 40, 42], потреба зацікавлених сторін щодо сумісності програмного продукту повністю співпадає з вимогою безпосередніх користувачів щодо його безпеки, що, як наслідок, сукупно значно покращують надійність роботи продукту. Водночас, вимога щодо зручності супроводу продукту значною мірою залежить від його портативності, що, як наслідок, разом неабияк сприяють зручності його використання. Окрім цього, велике бажання користувачів мати надійне для роботи ПЗ в поєднанні зі зручністю його використання утворюють беззаперечну його функціональну придатність, яка разом з ефективністю виконання забезпечують його належну якість, що, водночас, задовольняє вимоги найвибагливіших зацікавлених сторін. Наведені міркування, як на наш погляд, не є аксіомою, тобто вимагають додаткового дослідження й належного обґрунтування. Однак, такий логічний ланцюжок наших далеко не приватних висновків сприяє вирішенню поставленого завдання дослідження насамперед стосовно розроблення придатної ієрархічної структури критеріїв для комплексного оцінювання якості ПЗ.

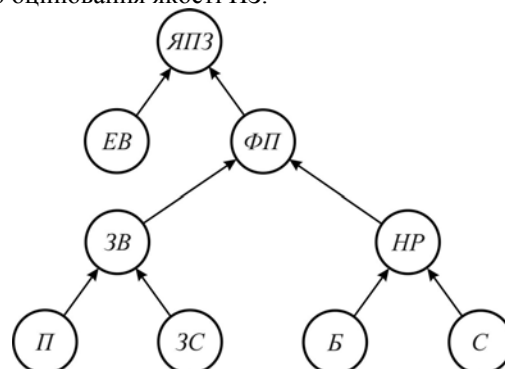


Рис. 3. Ієрархічна структура системи комплексного оцінювання якості ПЗ / Hierarchical structure of the complex software quality assessment system

На рис. 3 наведено ієрархічну структуру з восьми критеріїв для комплексного оцінювання якості ПЗ, належне врахування яких має забезпечити сумісність і безпеку продукту, гарантуватиме йому зручність супроводу та відповідний рівень портативності, забезпечить надійність роботи та зручність використання, а також надасть функціональну придатність і забезпечить ефективність виконання, тобто загалом така структура критеріїв дасть можливість отримати належну якість ПЗ. З рисунку також видно, що спочатку потрібно об'єднати критерій оцінювання портативності (П) продукту з критерієм його зручності супроводу (ЗС) в один агрегований показник зручності його використання (ЗВ). Далі потрібно об'єднати критерії оцінювання безпеки (Б) та сумісності (С) продукту в один агрегований показник надійності його роботи (НР). Потім, об'єднуючи два агреговані показники зручності використання (ЗВ) продукту з надійністю його роботи (НР), отримуємо один агрегований показник функціональної придатності (ФП) продукту. І, на завершення, об'єднуючи один критерій

оцінювання ефективності виконання (ЕВ) продукту з агрегованим показником функціональної його придатності (ФП), отримуємо агрегований і водночас комплексний показник якості ПЗ, екстремальне значення якого вказує на таку систему його оцінювання, яку можна прийняти за оптимальну з множини допустимих. Перевагою запропонованої ієрархічної структури критеріїв оцінювання якості ПЗ, наведеної на рис. 3, є те, що до неї не внесено жодного додаткового показника оцінювання поточної якості продукту з відповідними їм назвами. Для цього використано наявні критерії оцінювання поточної якості ПЗ, що дає можливість присвоювати їхні назви агрегованим показникам, аналогічні з назвами характеристик, встановлені в моделі ЯПП (див. рис. 1).

Отже, особливістю запропонованої ієрархічної структури критеріїв оцінювання якості ПЗ (рис. 3) є агрегування в кожному вузлі дерева рішень тільки двох критеріїв чи агрегованих показників поточної його якості, що є основною перевагою такого підходу до прийняття обґрунтованих рішень порівняно з іншими. Справа у тому, що показник комплексного стану якості ПЗ має відображати важливі пріоритети стратегії запровадження системи його оцінювання. Встановлення кожного з цих пріоритетів, а значить і утворення такого показника, який фігуруватиме у звітній документації установи, мають проводити відповідальні особи (керівник ІТ-компанії, його заступники з маркетингу чи менеджменту тощо), тобто особи, які приймають остаточні рішення. Не секрет, що вище керівництво будь-якої установи в таких ситуаціях часто стикається з чисто психологічною проблемою. Йдеться про те, що відповідальна особа, зазвичай, здатна ефективно оцінювати (порівнювати) тільки обмежену кількість варіантів можливих рішень і краще за все, якщо на кожному кроці доводиться їй порівнювати відібрані варіанти не більше, ніж за двома критеріями чи агрегованими показниками. Запропонована ієрархічна структура критеріїв повністю забезпечує уникнення як цієї психологічної проблеми, так і запобігає виникненню багатьох інших проблем, про які йтиметься нижче.

Порівняння варіантів стану якості ПЗ, а значить і системи його оцінювання за двома критеріями зручно виконувати, подаючи їх значення (експертні оцінки) у вигляді відповідної таблиці (матриці). Для цього заздалегідь перейдемо до застосування дискретних оцінок якості ПЗ за кожним критерієм, використовуючи для цього п'ятибальну шкалу: критично, погано, задовільно, добре, відмінно, або в числових значеннях – один, два, три, чотири, п'ять. За аналогічними назвами/балами відображатимемо комплексний остаточний та агреговані поточні показники оцінювання відповідних станів якості ПЗ. Тут йдеться про те, що такі назви оцінок будемо використовувати і для критеріїв, що характеризують рівень якості ПЗ зокрема, і для агрегованих показників, що оцінюють стан якості ПЗ на кожному ієрархічному рівні його оцінювання загалом.

В табл. 1 наведено приклад згортання критерію оцінювання зручності супроводу (ЗС) продукту з критерієм його портативності (П) за п'ятибальною шкалою, внаслідок чого отримуємо агрегований показник оцінювання зручності використання (ЗВ) продукту, яким можуть відповідати аналізовані стани якості ПЗ. Як у цій, так і в наступних матрицях запроваджена така стратегія експертного оцінювання поточного стану якості ПЗ, яку

буде відображено у їхніх агрегованих показниках. За мінімального значення рівня якості ПЗ за одним критерієм і найвищому рівні його якості за іншим критерієм максимальні оцінки поточних станів за агрегованим показником мають не перевищувати їхнього середнього значення. Водночас, середнім рівням якості ПЗ за кожним критерієм мають відповідати приблизно й середні оцінки поточних його станів за агрегованим показником. Зрозуміло, максимальним рівням якості ПЗ за кожним критерієм відповідають й максимальні оцінки їхніх поточних станів за агрегованим показником.

Табл. 1. Матриця згортання критерію оцінювання зручності супроводу (ЗС) продукту з критерієм його портативності (П) / Matrix of convolution the criterion for assessing for the convenience of the Maintainability (M) of the product with the criterion of its Portability (P)

Рівень П	Стан зручності використання (ЗВ) продукту				
5	2	3	4	5	5
4	2	3	4	5	5
3	2	2	3	4	5
2	1	2	3	3	4
1	1	2	2	3	3
Рівень ЗС	1	2	3	4	5

Наведена матриця згортання критеріїв (табл. 1) відображає так звані користувацькі (споживчі) пріоритети зацікавлених сторін щодо відбору можливого варіанту якості ПЗ стосовно зручності його використання (ЗВ). Так, при критичному рівні портативності продукту та при поганому рівні зручності його супроводу незначний пріоритет має критеріїв, що відповідає за зручність супроводу продукту. При задовільних рівнях портативності продукту та зручності його супроводу пріоритет віддають критерію, що відповідає за рівень зручності супроводу продукту. Наприклад, якщо рівень портативності ПЗ має оцінку "добре" чи "відмінно", а рівень зручності його супроводу – "задовільно", то агрегований показник оцінювання зручності використання (ЗВ) продукту набуває значення "добре". Якщо ж навпаки (оцінка "добре" чи "відмінно" за рівнем зручності супроводу продукту та "задовільно" – щодо його портативності), то стан зручності використання продукту оцінюють відповідно на "добре" і "відмінно". Отже, із зростанням рівня портативності продукту пріоритет зміщується у бік критерію, що відповідає за рівень зручності його супроводу. Зокрема, агрегованому показнику зручності використання продукту притаманна оцінка "відмінно" тільки при оцінці "відмінно" за критерієм зручності супроводу продукту, водночас як рівень його портативності може оцінюватися навіть на "задовільно".

В табл. 2 наведено приклад згортання критерію оцінювання сумісності (С) продукту з критерієм його безпеки (Б), внаслідок чого отримуємо значення агрегованого показника оцінювання надійності роботи (НР) продукту, яким можуть відповідати аналізовані стани якості ПЗ. Ця матриця відображає операційно-безпекові пріоритети зацікавлених сторін щодо відбору варіантів якості ПЗ. Так, при поганому рівні безпеки продукту та при критичному рівні його сумісності незначний пріоритет має критерій, що відповідає за рівень безпеки продукту. При задовільних рівнях як безпеки продукту, так і його сумісності пріоритет віддають критерію оцінювання рівня безпеки продукту. Наприклад, якщо рівень безпеки ПЗ має оцінку "добре", а рівень його сумісності – "задовільно", то агрегований показник оці-

нювання надійності роботи (HP) продукту набуває значення "добре". Якщо ж навпаки (оцінка "добре" чи навіть "відмінно" за рівнем сумісності продукту та "задовільно" – щодо рівня його безпеки), то надійність роботи продукту оцінюють також на "добре". Отже, із зростанням рівня сумісності продукту пріоритет зміщують у бік критерію рівня його безпеки. Зокрема, надійність роботи продукту з оцінкою "відмінно" можлива тільки при оцінці "відмінно" за критерієм рівня його безпеки, водночас як рівень його сумісності може оцінюватися навіть на "задовільно".

Табл. 2. Матриця згортання критерію оцінювання сумісності (C) продукту з критерієм його безпеки (Б) / Matrix of convolution of the criterion for assessing the convenience of the Compatibility (C) of the product with the criterion of its Security (S)

Рівень Б	Стан надійності роботи (HP) продукту				
5	3	4	5	5	5
4	3	3	4	5	5
3	2	3	3	4	4
2	2	2	2	3	3
1	1	1	2	2	2
Рівень С	1	2	3	4	5

Маючи значення поточних станів якості ПЗ, можемо побудувати матрицю згортання двох агрегованих показників, що відповідають за оцінювання надійності роботи (HP) продукту та зручності його використання (ЗВ), внаслідок чого отримаємо значення агрегованого показника оцінювання функціональної придатності (ФП) продукту, яким можуть відповідати аналізовані стани якості ПЗ (табл. 3). Ця матриця відображає експлуатаційні пріоритети зацікавлених сторін щодо відбору варіантів якості ПЗ.

Табл. 3. Матриця згортання агрегованих показників оцінювання надійності роботи (HP) продукту зі зручністю його використання (ЗВ) / Matrix of convolution of the aggregate evaluation indicators of the Reliability of Work (RW) of the product with of its Usability (U)

Стан ЗВ	Стан функціональної придатності (ФП) продукту				
5	3	3	4	5	5
4	2	3	4	4	5
3	2	2	3	4	5
2	1	2	3	3	4
1	1	2	2	3	4
Стан HP	1	2	3	4	5

Тут також можна відзначити таку систему надання пріоритетів зацікавленими сторонами. При критичному рівні забезпечення надійності роботи (HP) продукту та навіть поганому значенні показника зручності його використання (ЗВ) пріоритет має агрегований показник забезпечення надійності його роботи. При задовільних рівнях показника оцінювання надійності роботи ПЗ та зручності його використання пріоритет зміщується у бік показника забезпечення рівня надійності його роботи. Наприклад, якщо надійність роботи (HP) продукту має оцінку "добре", а за зручністю його використання "задовільно" чи "добре", то агрегований показник оцінювання його функціональної придатності (ФП) має оцінку "добре". Відповідно спостерігається зворотна картина (оцінка "добре" і "відмінно" за зручністю використання ПЗ і "задовільно" щодо забезпечення надійності його роботи) – агрегований показник функціональної придатності (ФП) оцінюють також на "добре". Якщо ж показник оцінювання зручності використання

ПЗ набуває значення "задовільно", а показник оцінювання надійності його роботи набуває значення "відмінно", то агрегований показник оцінювання його функціональної придатності (ФП) набуває значення "відмінно". Коли ж показник зручності його використання (ЗВ) має оцінку "відмінно", то показник функціональної придатності (ФП) сягає максимального значення при показнику надійності його роботи з оцінками "добре" і "відмінно". Нарешті, при оцінці "відмінно" щодо забезпечення надійності роботи ПЗ агрегований показник стану його функціональної придатності (ФП) сягає значення "відмінно" тоді, коли значення показника зручності його використання становить навіть "задовільно".

Граничні межі, що відокремлюють погані поточні стани якості ПЗ від задовільних, задовільні від добрих і добрі від відмінних, можна також визначати по-різному в різних ІТ-компаніях. Понад це, ці межі можуть і мають мінятися з плином часу, позаяк ніщо не вічне. Наприклад, стан якості ПЗ з оцінкою "погано" відповідає сьогоденню у територіальних ІТ-компаніях (знаходиться в районних центрах деяких областей України) і за забезпеченням надійності його роботи, і за ступенем зручності супроводу, і за рівнем його портативності. Стан системи "задовільно" відповідає середнім значенням відповідних показників у наявних системах оцінювання якості ПЗ, що належать переважно регіональним ІТ-компаніям (знаходяться в обласних центрах України) та в деяких інших відомчих організаціях, що відповідають за соціально-економічний розвиток регіону. Стан системи "добре" відповідає кращим значенням показників у багатьох приватних організаціях країни з міжнародним установчим капіталом, а "відмінно" – середнім станам справ переважно у банківській системі як самої країни, так і її партнерів з інших країн світу. При зростанні рівня зручності використання продукту, покращення рівня зручності його супроводу та портативності для всіх потенційних його користувачів система пріоритетів може змінюватися як з плином часу, так і настанням різних соціально-економічних проблем. Наприклад, стан системи "відмінно" може відповідати кращим значенням відповідних показників функціональної придатності програмного продукту та ефективності його виконання для провідних країн світу, а відповідне значення надійності роботи ПЗ стосується переважно об'єктів критичної інфраструктури, а також цивільної чи військової авіаційної техніки або техніки для освоєння космічного простору.

І, на завершення, побудуємо матрицю згортання агрегованого показника оцінювання функціональної придатності (ФП) продукту з критерієм ефективності його виконання (ЕВ), внаслідок чого отримаємо значення комплексного показника оцінювання якості ПЗ (табл. 4). Ця матриця відображає виробничі пріоритети зацікавлених сторін щодо відбору варіантів якості ПЗ. У цій матриці спостерігаємо таку систему надання пріоритетів. При навіть задовільному рівні ефективності виконання продукту та при поганій функціональній його придатності (і навпаки) пріоритету немає жоден з критеріїв. При задовільній функціональній придатності ПЗ та при задовільній і добрій ефективності його виконання пріоритет віддають показнику оцінювання функціональної придатності ПЗ. Наприклад, якщо показник функціональної придатності продукту має оцінку "добре", а значення критерію ефективності його виконання

є задовільним і вище, то агрегований показник оцінювання якості ПЗ набуває значення "відмінно". Отже, із зростанням рівня ефективності виконання продукту пріоритет зміщується у бік функціональної його придатності. Зокрема, значення комплексного показника якості ПЗ з оцінкою "відмінно" можлива навіть при оцінці "погано" за критерієм ефективності виконання продукту, водночас як функціональна його придатності має оцінюватися на "відмінно".

Табл. 4. Матриця згортання агрегованого показника оцінювання функціональної придатності (ФП) продукту з критерієм ефективності його виконання (ЕВ) / Matrix of convolution of the aggregate evaluation indicators of the Functional Suitability (FS) of the product with the criterion of its Performance Efficiency (PE)

Рівень ЕВ	Стан якості програмного забезпечення (ЯПЗ)				
5	3	4	5	5	5
4	3	3	4	5	5
3	2	3	4	5	5
2	2	2	3	4	5
1	1	2	3	3	4
Стан ФП	1	2	3	4	5

Розглянуті вище чотири матриці, об'єднані в одну графічну схему визначення комплексного показника якості ПЗ, наведено на рис. 4. Маючи таке дерево згортання критеріїв, можна оцінювати стан якості ПЗ за

будь-яким критерієм, після чого можна вибирати оптимальний варіант системи оцінювання його якості з множини допустимих.

3. Перехід системи оцінювання якості ПЗ з одного стану в інший. Спробуємо вибрати таку множину варіантів системи оцінювання якості ПЗ, яка б забезпечувала перехід його якості від стану, наприклад, з оцінкою "задовільно" до стану з оцінкою "добре".

Для розв'язання цієї задачі насамперед дамо визначення поняттю *напружених варіантів* стану якості ПЗ. Остаточний варіант якості ПЗ опишемо множиною двох критеріїв $\tilde{X}^z = \{X^{EB}, X^{ФП}\}$, значення яких встановлюють рівень його значущості (див. табл. 4). Вважати мемо, що варіант x_1 називають напруженим, якщо не існує іншого варіанта x_2 , який має аналогічне значення агрегованого показника його оцінювання, у якого значення кожного з критеріїв не вищі, ніж у варіанта x_1 . Наприклад, варіант $\tilde{X}_1^z = \{4, 2\} : (3)$, який має комплексну оцінку "задовільно", не є напруженим, оскільки є варіант $\tilde{X}_2^z = \{3, 2\} : (3)$, який має аналогічне значення показника оцінювання, водночас значення критерію (ЕВ) менше від значення для аналогічного критерію за варіантом $\tilde{X}_1^z$. Оскільки для варіанта $\tilde{X}_2^z$ інших варіантів немає, тому він і є напруженим.

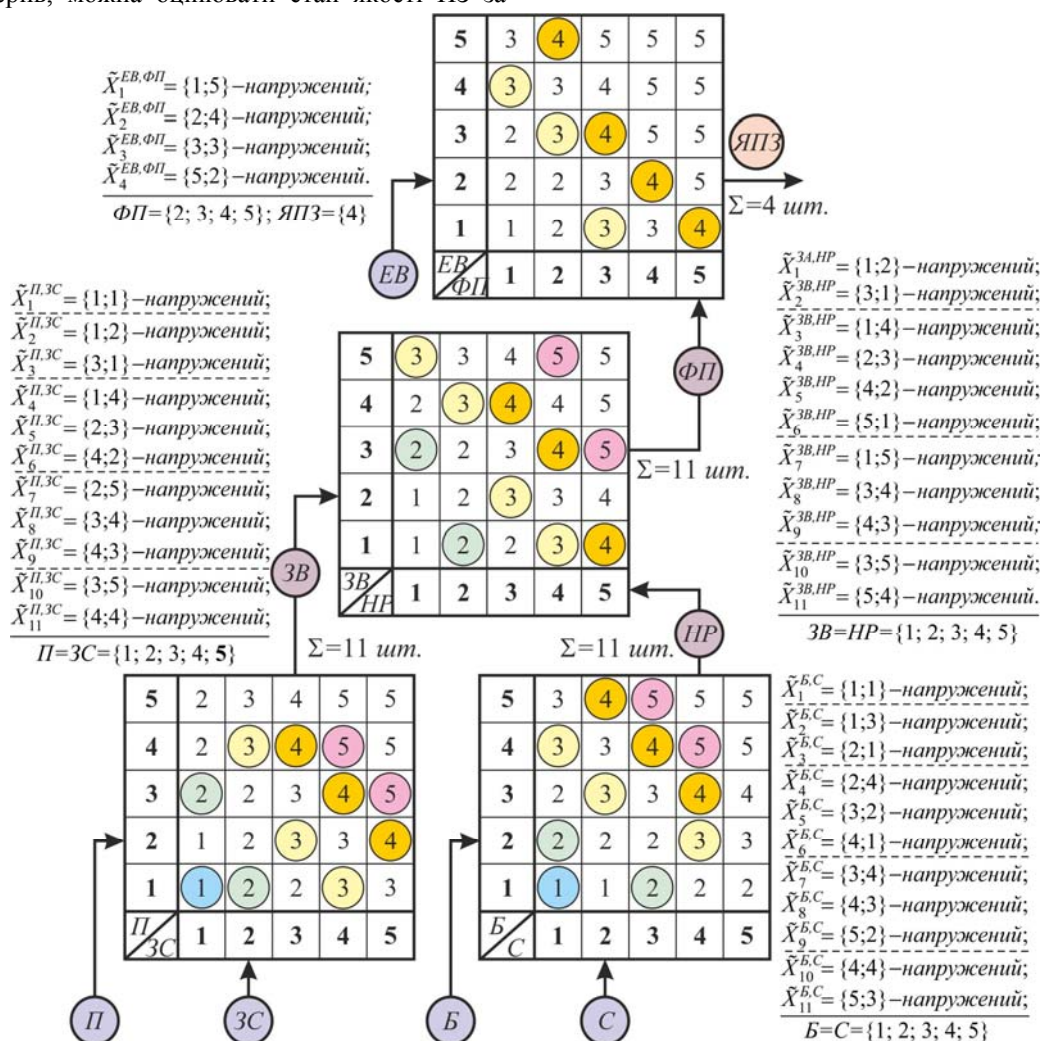


Рис. 4. Схема формування комплексного показника якості ПЗ / Scheme of formation of a complex indicator of software quality

Призначення поняття напружених варіантів зроблено для того, щоб серед усіх можливих варіантів стану якості ПЗ, які забезпечують набуття потрібного значен-

ня показника його оцінювання, вибрати ті з них, які будуть придатними для подальшого аналізу. Фактично, напружені варіанти – це Парето-оптимальні альтерна-

тиви в просторі розглядуваних критеріїв. Отож, при розв'язанні задачі вибору множини варіантів системи оцінювання якості ПЗ, яка забезпечуватиме перехід якості ПЗ від стану "задовільно" до стану "добре", обмежимося аналізом тільки напружених її варіантів. Тому нижче опишемо алгоритм пошуку всіх напружених варіантів стану якості ПЗ з множини допустимих, який складається з декількох кроків.

Крок 1. Оскільки поставлено завдання переходу системи оцінювання якості ПЗ із стану $\tilde{X}_0^z = \{3, 3\}$ зі значенням комплексного показника оцінювання "задовільно" в стан $\tilde{X}_1^z = \{4, 4\}$ з його значенням "добре", то спочатку проаналізуємо матрицю згортання (див. табл. 4) агрегованого показника функціональної придатності (ФП) продукту з критерієм ефективності його виконання (ЕВ). Для цього на рис. 4 відзначаємо всі елементи матриці ЕВ/ФП, які мають значення показника "добре" і, водночас, є напруженими, тобто тільки ті з них, які знаходяться зліва і знизу від них. Для отримання кожного з вказаних станів якості ПЗ потрібно досягти відповідних значень за агрегованим показником (ФП) і за критерієм (ЕВ). Так, стан системи оцінювання якості ПЗ із значенням комплексного показника оцінювання "добре" можна досягнути, набувши значення "погано" за показником функціональної придатності (ФП) і значення "відмінно" – за критерієм ефективності його виконання (ЕВ). Аналогічний стан системи можна досягнути, набувши значення "добре" за агрегованим показником (ФП) і значення "задовільно" – за критерієм (ЕВ) і т.д. Всього отримаємо п'ять таких варіантів, серед яких маємо чотири напружених варіанти, а саме: $\tilde{X}_1^{ЕВ, ФП} = \{1; 5\} : (4)$, $\tilde{X}_2^{ЕВ, ФП} = \{2; 4\} : (4)$, $\tilde{X}_3^{ЕВ, ФП} = \{3; 3\} : (4)$ і $\tilde{X}_4^{ЕВ, ФП} = \{5; 2\} : (4)$.

На рис. 4 у матриці ЕВ/ФП відзначено кружечком значення комплексного показника оцінювання якості ПЗ (ЯПЗ), які потрібно досягнути для отримання бажаного його стану. Однак, комплексний показник якості ПЗ (ЯПЗ) формують чотири рівні критерію ефективності виконання (ЕВ) продукту – 1, 2, 3 і 5, а також чотири стани агрегованого показника функціональної його придатності (ФП), а саме – 2, 3, 4 і 5. Тому далі встановимо, які саме стани показника (ФП) забезпечують перехід якості ПЗ від одного стану в інший.

Крок 2. Як було зазначено вище, функціональна придатність (ФП) продукту – агрегований показник оцінювання поточної якості ПЗ. Тому тепер проаналізуємо матрицю згортання двох агрегованих показників, різні стани яких відповідають за зручність використання (ЗВ) продукту та надійність його роботи (НР), які сукупно описують стан функціональної придатності (ФП) продукту (див. табл. 3, рис. 4). На підставі значень цієї матриці потрібно вказати всі напружені варіанти стану якості ПЗ, які за показником функціональної його придатності (ФП) дають такі оцінки: 2, 3, 4 і 5. Наприклад, за агрегованим показником (ЗВ) оцінку "погано" можна отримати тільки за двома напруженими варіантами: $\tilde{X}_1^{ЗВ, НР} = \{1; 2\} : (2)$ і $\tilde{X}_2^{ЗВ, НР} = \{3; 1\} : (2)$; оцінку "задовільно" – за чотирма напруженими варіантами: $\tilde{X}_3^{ЗВ, НР} = \{1; 4\} : (3)$, $\tilde{X}_4^{ЗВ, НР} = \{2; 3\} : (3)$, $\tilde{X}_5^{ЗВ, НР} = \{4; 2\} : (3)$ і $\tilde{X}_6^{ЗВ, НР} = \{5; 1\} : (3)$; оцінку "добре" – за трьома напруженими варіантами: $\tilde{X}_7^{ЗВ, НР} = \{1; 5\} : (4)$, $\tilde{X}_8^{ЗВ, НР} = \{3; 4\} : (4)$ і $\tilde{X}_9^{ЗВ, НР} = \{4; 3\} : (4)$, а оцінку "відмінно" мають всього два напружені варіанти:

ти: $\tilde{X}_{10}^{ЗВ, НР} = \{3; 5\} : (5)$ і $\tilde{X}_{11}^{ЗВ, НР} = \{5; 4\} : (5)$. Отже, серед усіх 23 можливих варіантів стану функціональної придатності (ФП) продукту тільки 11 з них виявилися напруженими.

Однак, агрегований показник функціональної придатності (ФП) продукту формують п'ять станів двох агрегованих показників, що відповідають за зручність використання (ЗВ) продукту і надійність його роботи (НР), а саме – 1, 2, 3, 4 і 5. Тому далі проаналізуємо кожен з цих показників окремо, наприклад, спочатку надійність роботи (НР) продукту, де встановимо, які саме рівні вхідних критеріїв забезпечують перехід якості ПЗ від одного стану в інший.

Крок 3. Оскільки забезпечення безпеки (Б) продукту та надання йому сумісності (С) є критеріями початкового оцінювання стану надійності роботи (НР) продукту, тому тепер проаналізуємо матрицю їхнього згортання (див. табл. 2, рис. 4). На підставі цієї матриці потрібно вказати всі напружені варіанти стану надійності роботи (НР) продукту, які за його агрегованим показником дають такі оцінки: 1, 2, 3, 4 і 5. Так, оцінку "критично" за показником надійності роботи (НР) продукту можна отримати за одним напруженим варіантом – $\tilde{X}_1^{Б, С} = \{1; 1\} : (1)$; оцінку "погано" – за двома напруженими варіантами: $\tilde{X}_2^{Б, С} = \{1; 3\} : (2)$ і $\tilde{X}_3^{Б, С} = \{2; 1\} : (2)$; оцінку "задовільно" – за трьома напруженими варіантами: $\tilde{X}_4^{Б, С} = \{2; 4\} : (3)$, $\tilde{X}_5^{Б, С} = \{3; 2\} : (3)$ і $\tilde{X}_6^{Б, С} = \{4; 1\} : (3)$; оцінку "добре" – за трьома напруженими варіантами: $\tilde{X}_7^{Б, С} = \{3; 4\} : (4)$, $\tilde{X}_8^{Б, С} = \{4; 3\} : (4)$ і $\tilde{X}_9^{Б, С} = \{5; 2\} : (4)$, а оцінку "відмінно" отримуємо всього за двома напруженими варіантами: $\tilde{X}_{10}^{Б, С} = \{4; 4\} : (5)$ і $\tilde{X}_{11}^{Б, С} = \{5; 3\} : (5)$. Отже, серед усіх 25 можливих варіантів стану надійності роботи (НР) продукту тільки 11 з них виявилися напруженими.

Далі проаналізуємо агрегований показник, що відповідає за зручність використання (ЗВ) продукту, де встановимо, які саме рівні вхідних критеріїв забезпечують перехід якості ПЗ від одного стану в інший.

Крок 4. Забезпечення зручності супроводу (ЗС) продукту і його портативності (П) є критеріями початкового оцінювання зручності використання (ЗВ) продукту. Тому тепер проаналізуємо матрицю згортання критерію оцінювання зручності супроводу (ЗС) продукту з критерієм його портативності (П), які якраз і описують стан зручності використання (ЗВ) продукту (див. табл. 1, рис. 4). На підставі цієї матриці потрібно вказати всі напружені варіанти стану системи, які за його агрегованим показником (ЗВ) дають такі оцінки: 1, 2, 3, 4 і 5. Так, оцінку "критично" можна отримати тільки за одним напруженим варіантом: $\tilde{X}_1^{П, ЗС} = \{1; 1\} : (1)$; оцінку "погано" – за двома напруженими варіантами: $\tilde{X}_2^{П, ЗС} = \{1; 2\} : (2)$ і $\tilde{X}_3^{П, ЗС} = \{3; 1\} : (2)$; оцінку "задовільно" – за трьома напруженими варіантами: $\tilde{X}_4^{П, ЗС} = \{1; 4\} : (3)$, $\tilde{X}_5^{П, ЗС} = \{2; 3\} : (3)$ і $\tilde{X}_6^{П, ЗС} = \{4; 2\} : (3)$; оцінку "добре" – за трьома напруженими варіантами: $\tilde{X}_7^{П, ЗС} = \{2; 5\} : (4)$, $\tilde{X}_8^{П, ЗС} = \{3; 4\} : (4)$ і $\tilde{X}_9^{П, ЗС} = \{4; 3\} : (4)$, а оцінку "відмінно" отримуємо всього за двома напруженими варіантами: $\tilde{X}_{10}^{П, ЗС} = \{3; 5\} : (5)$ і $\tilde{X}_{11}^{П, ЗС} = \{4; 4\} : (5)$.

Визначення множини напружених варіантів стану якості ПЗ на кожному рівні ієрархічної структури (дерева) критеріїв його відбору завершено.

Тепер, маючи на кожному ієрархічному рівні множини напружених варіантів стану якості ПЗ за відповідним агрегованим показником, неважко визначити ту їх кількість, які зможуть забезпечити отримання потрібного значення комплексного показника оцінювання його якості. Для цього застосовуємо такий метод індексації вершин графа (множини розв'язків задачі):

- 1-ий крок – позначаємо початкові вершини-квадрати множини розв'язків індексами зі значенням 1 (на рис. 5 індекси вказані у верхній половині квадратів і кружечків);
- 2-ий крок – рухаючись знизу до верху, послідовно позначаємо всі інші вершини відповідними індексами.

Тут використаємо таке маркування вершин відповідними індексами. Індекс вершини-кружка дорівнює добутку індексів суміжних з нею двох вершин нижнього рівня. Наприклад, як показано на рис. 5, для вершини $\tilde{X}_4^{3B,HP} = \{2;3\} : (3)$ отримаємо $2 \cdot 3 = 6$ шт., а для вершини $\tilde{X}_9^{3B,HP} = \{4;3\} : (4)$ матимемо $3 \cdot 3 = 9$ шт. Індекс вершини-квадрата на рис. 5 відповідає сумі індексів суміжних з нею вершин нижнього рівня. Наприклад, для агрегова-

ного показника функціональної придатності ($\Phi\P$) продукту з оцінкою "3" отримаємо $3 + 6 + 6 + 2 = 17$ шт, а з оцінкою "4" матимемо $2 + 9 + 9 = 20$ шт. Водночас, індекс початкової вершини-квадрата визначає початкову кількість напружених варіантів, зазвичай один.

Обґрунтування адекватності роботи цього алгоритму безпосередньо виходить з описаного методу визначення індексів вершин графа, внаслідок чого отримуємо відповідну множину розв'язків задачі.

Внаслідок виконання розглянутих вище дій отримаємо граф (рис. 5), який містить множини всіх напружених варіантів стану якості ПЗ (Парето-оптимальних альтернатив у просторі розглядуваних критеріїв), що мають значення комплексного показника їх оцінювання зі значенням "добре". З рисунку видно, що отриману кількість напружених варіантів стану якості ПЗ для кожного агрегованого показника їх оцінювання показано у верхніх частинах вершин графа, а саме: 11, 11, 11 і 4 шт. Тоді загальна кількість можливих варіантів стану якості ПЗ становитиме $11 \cdot 11 \cdot 11 \cdot 4 = 5324$ шт. Водночас, кількість напружених варіантів стану якості ПЗ, які забезпечують її перехід від стану з оцінкою "задовільно" до стану з оцінкою "добре", становить 54 шт.

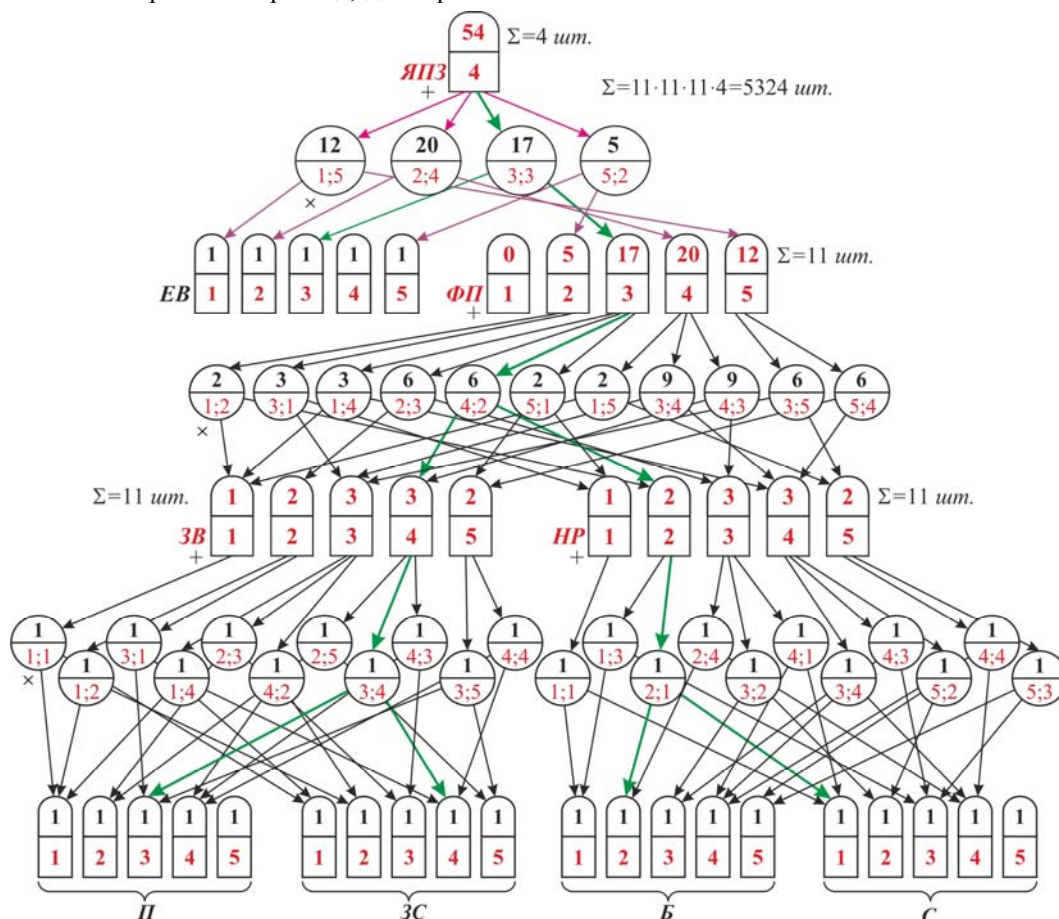


Рис. 5. Граф процедури формування множини напружених варіантів стану якості ПЗ / Graph of the procedure for forming a set of stressful options for the state of software quality

Для отримання якого-небудь напруженого варіанта стану якості ПЗ потрібно виконати такі дії. Розглядаємо остаточну вершину (вихід) множини розв'язків ($ЯПЗ$) зі значенням 54. З неї виходять чотири дуги. Беремо будь-яку з них, наприклад, дугу, яка веде у вершину $\tilde{X}_3^{EB,\Phi\P} = \{3;3\}$, з якої також виходять дві дуги. Відзначаємо обидві ці дуги. Дуга, яка веде у вершину 3 за критерієм (EB), вказує на те, що за ним потрібно досягти

рівня якості ПЗ з оцінкою "задовільно". Дуга, яка веде у вершину 3 за агрегованим показником ($\Phi\P$), вказує на те, що за ним потрібно досягти стану якості ПЗ з оцінкою "задовільно". З чотирьох перехідних варіантів досягнення значення "задовільно" за показником ($\Phi\P$) вибираємо будь-який варіант (наприклад, вершину $\tilde{X}_5^{3B,HP} = \{4;2\}$) стану якості ПЗ, яка відповідає оцінці "добре" за показником ($3B$), і оцінці "погано" – за по-

казником (HP). З наступних перехідних варіантів досягнення значення "добре" за показником (ЗВ) вибираємо будь-який з трьох можливих варіантів, наприклад, вершину $\tilde{X}_8^{П,ЗС} = \{3; 4\}$, яка вказує на те, що за нею потрібно досягти рівня якості ПЗ з оцінкою "задовільно" за критерієм (П) та оцінку "добре" – за критерієм "ЗС". Наступні перехідні варіанти досягнення значення "погано" за показником (HP) вибираємо будь-який з двох можливих варіантів, наприклад, вершину $\tilde{X}_3^{Б,С} = \{2; 1\}$, яка вказує на те, що за нею потрібно досягти рівня якості ПЗ з оцінкою "погано" за критерієм (Б) та з оцінкою "критично" – за критерієм "С". Отриманому напруженому варіанту відповідає підграф множини розв'язків, виділений на рис. 5 товстими дугами. Він визначає множину початкових напружених варіантів стану якості ПЗ $\tilde{X}_{П,ЗС,Б,С,ЗВ,HP,EB,ФП} = \{3; 4; 2; 1; 4; 2; 3; 3\}$.

Отже, розроблений метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за вхідними критеріями чи агрегованими показниками дає змогу визначити поточний стан якості ПЗ за відповідним агрегованим показником. З'ясовано, що основною особливістю ієрархічної структури є агрегування в кожному вузлі дерева рішень тільки двох критеріїв чи агрегованих показників якості ПЗ, що є основним достоїнством цього методу. Водночас, розроблений метод вибору оптимального варіанту системи комплексного оцінювання якості ПЗ з множини допустимих альтернатив враховує ієрархічну структуру критеріїв і агрегованих показників його якості на кожному ієрархічному рівні.

4. Формування стану якості ПЗ з урахуванням вартості його розроблення. Побудувавши множину напружених варіантів стану якості ПЗ, можна розв'язувати різні задачі формування множини допустимих варіантів системи оцінювання якості ПЗ з урахуванням його вартості та/чи ризику розроблення. Розглянемо спочатку задачу вибору варіанта запровадження системи оцінювання якості ПЗ, який забезпечує досягнення поставленої мети з мінімальними витратами на його розроблення. Нехай для i -го критерію/показника та j -го рівня/стану його оцінювання визначено відповідні витрати $\tilde{S} = \{\tilde{S}_i = \{s_{ij}, j = \overline{1, n}\}, i = \overline{1, m}\}$, потрібні для забезпечення стану його переходу з одного на інший. Це означає, що розроблено множину допустимих варіантів системи оцінювання якості ПЗ, виконання яких може забезпечити відповідний перехідний процес. Вважатимемо, що варіанти за різними критеріями незалежні, тобто варіант системи оцінювання за i -им критерієм не впливає на інші варіанти впровадження системи оцінювання якості ПЗ. В цьому випадку існує ефективний алгоритм визначення оптимального варіанту впровадження системи оцінювання якості ПЗ з мінімальною вартістю його розроблення, основою якого є метод індексації вершин графа.

Позначаємо початкові вершини графу (множини розв'язків задачі) елементами s_{ij} . Вершини наступного (вищого) рівня множини напружених варіантів стану якості ПЗ позначатимемо тільки після того, як позначимо всі суміжні вершини рівня, що знаходяться нижче. При цьому елемент вершини-квадрата (у таких вершинах записуємо одне число – значення відповідного агрегованого показника оцінювання) відповідає мінімальному з елементів суміжних вершин-кружечків нижчого

рівня, а елемент вершини-кружечка (у кружечку записано два числа – це пара значень показників нижнього рівня, агрегування яких дає відповідне значення показника верхнього рівня) дорівнює сумі елементів суміжних вершин-квадратів нижчого рівня.

За умови дотримання такого алгоритму значення елемента початкової вершини-квадрата дорівнює мінімальним витратам на реалізацію відповідного варіанту системи оцінювання якості ПЗ. Оптимальний варіант знаходиться "зворотним ходом" – зверху вниз. Для розв'язання задачі вибору оптимального варіанта впровадження системи оцінювання якості ПЗ, який забезпечує досягнення переходу системи із стану "задовільно" в стан "добре" з мінімальними витратами на його реалізацію, задамось відповідною матрицею витрат S (ум. од.) (табл. 5).

Табл. 5. Матриця витрат на реалізацію системи оцінювання якості ПЗ / Cost matrix for the implementation of software quality assessment system

$i \setminus j$	1	2	3	4	5
П	28	32	40	75	80
ЗС	25	29	38	49	58
Б	32	43	61	78	99
С	26	30	43	50	62
EB	56	60	83	94	127

Значення елементів вершин графа (множини розв'язків задачі), отримані на підставі описаного вище алгоритму, вказано на рис. 6 у верхній половині відповідних вершин. Оптимальний варіант виділено товстими лініями. Це варіант системи $\tilde{X}_{П,ЗС,Б,С,ЗВ,HP,EB,ФП} = \{1; 2; 3; 2; 2; 3; 3; 3\}$ з сукупними витратами $s_0 = 231$ ум. од., який відповідає збалансованому варіанту системи оцінювання якості ПЗ за всіма вісьмома критеріями. Поставлена задача вибору множини варіантів системи оцінювання якості ПЗ розв'язана.

Отже, у наведеному прикладі реалізації системи комплексного оцінювання якості ПЗ показано сутність зазначеного методу вибору оптимального її варіанту, а також проілюстровано метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за двома критеріями чи агрегованими показниками. Також з'ясовано основні особливості переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший, а також визначено потенційні витрати для здійснення такого переходу..

Обговорення результатів дослідження. Для прийняття адекватних управлінських рішень свого часу велику популярність отримав метод формування показника комплексного оцінювання критеріїв на підставі побудови ієрархічної структури (дерева) відбору [18]. Ідея методу належить Thomas L. Saaty [43] і полягає в тому, що всі критерії організовують в певну ієрархічну структуру. На кожному рівні цієї ієрархії здійснюють побудову показника агрегованого оцінювання критеріїв попереднього рівня. Цей метод досліджували такі вчені, як А. Н. Воронін [46], М. Г. Грещак [13], М. В. Кармінська-Белоброва [31], В. Є. Снитюк [12], В. Ф. Ситник [42], Y. Budaretskiy [7], Challa, Jagat Sesh [9], Н. Ghanbari [11], Gül Çalıklı [14] та інші.

У процесі вироблення управлінських рішень особі, яка їх приймає (ОПР), доводиться враховувати велику кількість показників, критеріїв, чинників, що впливають на мету, поставлену в технічному завданні [2, 16, 44]. Прийняти "правильне" рішення означає вибрати таку альтернативу (такий варіант дії) з множини допусти-

мих, яка максимально сприятиме досягненню поставленої мети [1, 39]. Окрім цього, практично в будь-яких реальних завданнях існують різного роду невизначеності, пов'язані з суперечливістю критеріїв відбору, неповнотою знань про вирішувану проблему, неможливістю кількісного вимірювання тих або інших показників чи врахування випадкових чинників [10, 18, 32, 33]. Досяг-

нення сучасних інформаційних технологій дає змогу вести мову про розроблення сучасних методів і систем прийняття рішень [12, 40, 42], головним призначенням яких є допомога керівнику чи менеджеру проекту під час вибору оптимального його варіанту, в т.ч. й варіанту впровадження системи комплексного оцінювання якості ПЗ в ІТ-компанії з множини допустимих.

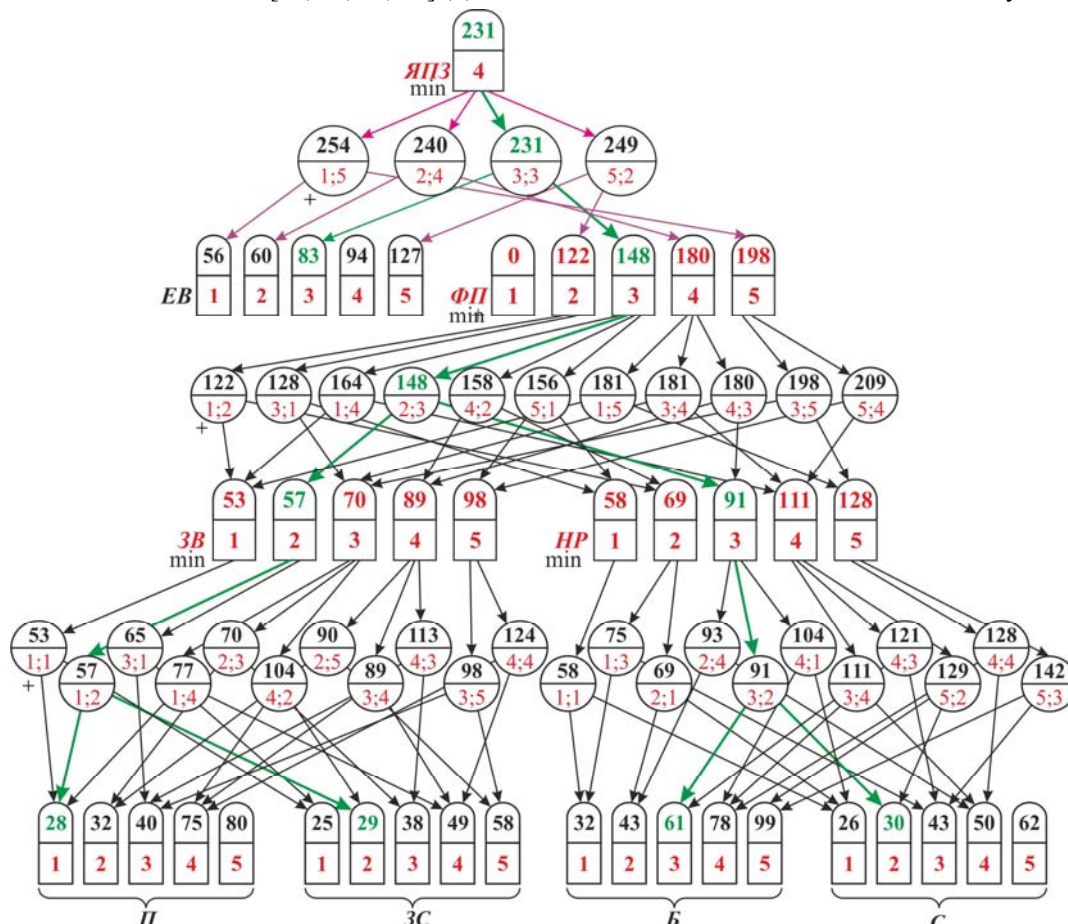


Рис. 6. Граф процедури формування множини напружених варіантів стану якості ПЗ з врахуванням вартості його розроблення / Graph of the procedure for forming a set of stressful options for the quality of software, taking into account the cost of its development

Отже, внаслідок проведеного дослідження отримано такі *основні результати*: розроблено систему комплексного оцінювання якості ПЗ, яка дає змогу визначити стан його якості на кожному ієрархічному рівні системи управління з урахуванням вартості реалізації проекту, а також дає можливість встановити потенційні витрати для переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше на підставі стандартної моделі якості програмного продукту розроблено ієрархічну структуру критеріїв і агрегованих показників якості ПЗ, що дало змогу встановити характеристики та підхарактеристики системи комплексного його оцінювання з врахуванням функціональних її можливостей і допустимих варіантів використання.

Практична значущість результатів дослідження – розроблена система комплексного оцінювання якості ПЗ на підставі стандартної моделі його якості може бути використана в інженерії ПЗ для встановлення характеристик якості та вироблення рекомендацій щодо їх використання, а також визначення поточного стану якості продуктів проекту та потенційних витрат для переведення їх з одного стану в інший.

Висновок / Conclusions

Розроблено систему комплексного оцінювання якості ПЗ, яка дає змогу визначити стан його якості на кожному ієрархічному рівні системи управління з урахуванням вартості розроблення, а також надає можливість встановити потенційні витрати для переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано останні дослідження та публікації, вибрано серед них такі, які дали можливість в повному обсязі зрозуміти сутність об'єкта і предмета дослідження. З'ясовано, що якість ПЗ – багатопланове поняття, яке можна виразити адекватно тільки деякою структурованою системою характеристик та атрибутів, яку прийнято називати моделлю якості програмного продукту. Для оцінювання якості ПЗ було використано комплекс критеріїв, які максимально його характеризують насамперед стосовно функціональних можливостей і варіантів використання.

2. Проаналізовано наявну модель якості програмного продукту, затверджену стандартом ISO/IEC, що дало змогу встановити характеристики та підхарактеристики

системи якості, а також визначити комплекс критеріїв для побудови ієрархічної їх структури. Встановлено, що модель якості – головний атрибут комплексної системи оцінювання ПЗ, позаяк визначає, які характеристики якості продукту потрібно враховувати при оцінюванні його властивостей. Рівень, за якого ПЗ задовольняє заявлені та опосередковані потреби різних зацікавлених сторін і, в такий спосіб, забезпечує його значущість для них є саме тими властивостями, що відображено в моделі якості, яка класифікує їх на характеристики та підхарактеристики.

3. Розроблено метод вибору оптимального варіанту системи комплексного оцінювання якості ПЗ з множини допустимих альтернатив, який враховує ієрархічну структуру критеріїв і агрегованих показників його якості на кожному ієрархічному рівні. Встановлено, що задача вибору оптимального варіанту системи оцінювання якості ПЗ з урахуванням таких критеріїв, як зручність супроводу продукту та його портативності, безпеки продукту та його сумісності, а також надійності роботи продукту, зручності використання та функціональної придатності належить до задач багатокритеріальної оптимізації.

4. Розроблено метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за вхідними критеріями чи агрегованими показниками, що дало змогу визначити поточний стан якості ПЗ за відповідним агрегованим показником з урахуванням вартості його розроблення. З'ясовано, що основною особливістю ієрархічної структури є агрегування в кожному вузлі дерева рішень тільки двох критеріїв чи агрегованих показників якості ПЗ, що є основним достоїнством цього методу.

5. Наведено приклад реалізації системи комплексного оцінювання якості ПЗ, що дає змогу зрозуміти сутність зазначеного методу вибору оптимального її варіанту, а також метод відбору напружених варіантів стану системи якості ПЗ за двома критеріями чи агрегованими показниками. З'ясовано основні особливості переходу показників якості ПЗ з одного стану в інший, а також визначено потенційні витрати для здійснення такого переходу.

References

1. Alyoshin, G. V., Panchenko, S. V., & Prikhodko, S. I. (2019). *Optimization of digital transmission systems: textbook*. Kharkiv: Publishing house UkrDUZT, 142 p. [In Ukrainian]
2. Alyoshin, G., Kolomyitsev, O., & Tretyak, V. (2020). Features of optimal synthesis of rich information systems. *Collection of scientific works LOGOS*, 81-84. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.23>
3. Azar D., Harmanani, H., & Korkmaz, R. (2009, September). A hybrid heuristic approach to optimize rule-based software quality estimation models. *Information and Software Technology*, 1365-1376. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.05.003>
4. Boegh, J. (2008, March-April). A new Standard for Quality Requirements. *IEEE Software*, 25(2), 57-63. <https://doi.org/10.1109/MS.2008.30>
5. Botsula, M. P., & Morhun, I. A. (2011). Metod otrymannia kompleksnoi otsinky yakosti veb-materialiv z vykorystanniam poliarnoi systemy koordynat. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 1, 84-88. Retrieved from: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1367/conferences.vntu.edu.ua>. [In Ukrainian]
6. Botsula, M. P., & Morhun, I. A. (2014). Novyi metod ta informatychna tekhnolohiia obroblynnia danykh dlia upravlinnia yakistiu elektronnykh navchalnykh kursiv. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia: mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, 3, 25-33. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/It-ki_2014_3_6. [In Ukrainian]
7. Budaretskiy, Y., Shchavinskiy, Y., Kuznetsov, V., & Nikolayev, S. (2021). Application of the method of analysis of hierarchies to assess the software of complexes of automation means. *Military Technical Collection*, (25), 3-12. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.3-12>
8. Butko, M. P. (Ed.), Butko, I. M., Mashchenko, V. P., et al. (2015). *Decision theory: textbook*. Kyiv: Publishing house "Center for Educational Literature", 360 p. [In Ukrainian]
9. Challa, Jagat Sesh, Paul, Arindam, Dada, Yogesh, Nerella, Venkatesh, Srivastava, Praveen Ranjan, & Singh, Ajit Pratap. (2011). Integrated Software Quality Evaluation: A Fuzzy Multi-Criteria Approach. *Journal of Information Processing Systems*, 7(3), 473-518. <https://doi.org/10.3745/JIPS.2011.7.3.473>
10. Gevko, I. B. (2009). *Methods of making managerial decisions: textbook*. Kyiv: Condor, 187 p.
11. Ghanbari, H., Vartiainen, T., & Siponen, M. (2019, March). Omission of Quality Software Development Practices: A Systematic Literature Review. *ACM Computing Surveys*, 51(2), 1-27. <https://doi.org/10.1145/3177746>
12. Gnatienco, G., & Snytyuk, V. Ye. (2008). *Expert decision-making technologies: monograph*. Kyiv: McLaugh Limited Liability Company, 444 p. [In Ukrainian]
13. Greshchak, M. G. (Ed.), Grebeshkova, O. M., & Kotsyuba, O. S. (2001). *Internal economic mechanism of the enterprise: Tutorial*. Kyiv: KNEU Publishing House, 228 p. [In Ukrainian]
14. Gül Çalıkılı & Ayşe Başar Bener. (2013). Influence of confirmation biases of developers on software quality: an empirical study. *Software Quality Journal*, 21(2), 377-416. <https://doi.org/10.1007/s11219-012-9180-0>
15. Hrytsiuk, Yu. I., & Andrushchakevych, O. T. (2018). Means for determining software quality by metric analysis methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 159-171. <https://doi.org/10.15421/40280631>. [In Ukrainian]
16. Hrytsiuk, Yu. I., & Buchkovska, A. Yu. (2018). Visualization of the results of expert evaluation of software quality using polar diagrams. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(10), 137-145. <https://doi.org/10.15421/40271025>
17. Hrytsiuk, Yu. I., & Dalyavskyy, V. S. (2018). Using Petal Diagram for Visualizing the Results of Expert Evaluation of Software Quality. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(9), 97-106. <https://doi.org/10.15421/411832>
18. Hrytsiuk, Yu. I., & Kuzmenko, I. S. (2013). Comprehensive evaluation of information security implementation projects. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Automation, measurement and control*, 743, 118-122. [In Ukrainian]
19. Hrytsiuk, Yu. I., & Nemova, E. A. (2018). Management Features Process of Developing Software Requirements. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(8), 161-169. <https://doi.org/10.15421/40280832>
20. Hrytsiuk, Yu. I., & Nemova, E. A. (2018). Peculiarities of Formulation of Requirements to the Software. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(7), 135-148. <https://doi.org/10.15421/40280727>
21. Hrytsiuk, Yu. I., & Zhabych, M. R. (2018). Risk Management of Implementation of Program Projects. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(1), 150-162. <https://doi.org/10.15421/40280130>
22. Hrytsiuk, Yu., Grytsyuk, P., Dyak, T., & Hrynyk, H. (2019). Software Development Risk Modeling. *IEEE 2019 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2019)*, (Vol. 2, pp. 134-137), 17-20 September, Lviv, Ukraine. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 206 p. <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929778>
23. ISO 9001:2015 Quality Management System – Requirements. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/62085.html>
24. ISO/IEC 25010. (2017). ISO/IEC 25000. Software and Data Quality. Retrieved from: <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010?limit=3>
25. ISO/IEC 9126. (1991). Information technology – Software product evaluation – Quality characteristics and guidelines for their

- use. Geneva: International Organization for Standardization, International Electrotechnical Commission, 136 p. (International Standard)
26. ISO/IEC 9126-1:2001. (2022). Software Engineering – Product Quality. Part 1: Quality model. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/22749.html>
 27. ISO/IEC CD 25010.2. (2022). Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product quality model. Retrieved from: <https://www.iso.org/ru/standard/78176.html>
 28. ISO/IEC TR 9126-2:2003 Software Engineering – Product Quality – Part 2: External metrics. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/22749.html>
 29. ISO/IEC TR 9126-3:2003 Software Engineering – Product Quality – Part 3: Internal metrics. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/22891.html>
 30. ISO/IEC TR 9126-4:2004 Software Engineering – Product Quality – Part 4: Quality in use metric. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/39752.html>
 31. Karminskaya-Belobrova, M. V. (2012). Organizational structures of enterprise management. *BusinessInform*, 12, 192–195. [In Ukrainian]
 32. Katrenko, A. V., & Beekeeper, V. V. (2009). *Decision theory: textbook* stamped by the Ministry of Education and Science. Kyiv: BHV Publishing Group, 448 p. Retrieved from: <http://vlp.com.ua/node/7110>. [In Ukrainian]
 33. Katrenko, A. V., & Beekeeper, V. V. (2020). *Decision making: theory and practice: textbook*. Lviv: Publishing house "New World – 2000", 447 p. Retrieved from: https://ns2000.com.ua/wp-content/uploads/2019/07/Pryniattia_rishen-.pdf. [In Ukrainian]
 34. Mazza, R. (2009). Introduction to Information Visualization, University of Lugano Switzerland. Springer-Verlag London Limited 2009. 139 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-219-7>
 35. Nazemi, K. (2014). Adaptive Semantics Visualization. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs. *Eurographics Association for Computer Graphics*. 360 p. Retrieved from: <http://diglib.eg.org/handle/10.2312/12076>
 36. Pleskach, V. L., Zatonatska, T. H. (2011). *Information systems and technologies in enterprises*. Kyiv: Znannia. 718 p. Retrieved from: http://pidruchniki.com/1194121347734/informatika/analiz_yakosti_programnogo_zabezpechennya#42. [In Ukrainian]
 37. Pomorova, O. V., & Hovorushchenko, T. O. (2013a). Modern problems of software quality assessment. *Radio electronic and computer systems*, 5, 319–327. Kharkiv: NAU "KhAI". Retrieved from: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/1497>. [In Ukrainian]
 38. Pomorova, O., & Hovorushchenko, T. (2013b). Intelligent Assessment and Prediction of Software Characteristics at the Design Stage. *American Journal of Software Engineering and Applications* (AJSEA), 2(2), 25–31. Retrieved from: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.jajsea.20130202.11.pdf>
 39. Ponomarenko, V. S., Pavlenko, L. A., Besedovsky, O. M., et al. (2012). *Methods and systems of decision support in the management of environmental and economic processes of enterprises*: Tutorial. Kharkiv: Publishing house KhNEU, 272 p. [In Ukrainian]
 40. Pryymak, V. M. (2008). *Management Decision Making*: Tutorial. Kyiv: Attica Publishing House, 240 p. [In Ukrainian]
 41. Stephen R. Tiller. (2012, January). Organizational Structure and Management Systems. *Leadership and Management in Engineering*, 12(1), 20–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000160)
 42. Sytnyk, W. F. (2004). *Decision Support Systems*: Tutorial. Kyiv: Publishing house KNEU, 614 p. [In Ukrainian]
 43. Thomas L. Saaty. (1990, September). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
 44. Voloshin, O. F., & Mashchenko, S. O. (2010). Models and methods of decision making: Tutorial for students. University. 2nd ed., Revised. and add. Kyiv: Kyiv University Publishing and Printing Center, 336 p. [In Ukrainian]
 45. Volskaya, K. O. (2019). The procedure of evaluating the quality of accounting software. Problems of Theory and Methodology of Accounting. Control and Analysis, 2(43), 22–28. [https://doi.org/10.26642/pbo-2019-2\(43\)-22-28](https://doi.org/10.26642/pbo-2019-2(43)-22-28)
 46. Voronin, A. N., Ziatdinov, Yu. K., & Kulinsky, M. V. (2011). Multicriteria tasks: models and methods: monograph. Kyiv: NAU Publishing House. 348 p. [In Russian]

Yu. I. Hrytsiuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

COMPREHENSIVE SOFTWARE QUALITY ASSESSMENT SYSTEM

A system of integrated software quality assessment (software) has been developed. The system allows you to determine the quality of software at each hierarchical level of the management system, taking into account its cost. It also provides an opportunity to identify the potential costs for the transition of software quality indicators from one state to another. It was found that software quality is a multifaceted concept. It can be adequately expressed by some hierarchical system of characteristics and attributes, which is called the model of software product quality. To assess the quality of the software, a set of criteria was used that best characterizes it in terms of functionality and usage options. It is established that the quality model is the main attribute of a comprehensive software evaluation system. The model determines which product quality characteristics need to be considered when evaluating its properties. The level of software at which it meets the stated and indirect needs of various stakeholders and ensures its relevance to them, these are the properties that are reflected in the software quality model. The model classifies software properties into characteristics and sub-characteristics. A method for selecting stressful options for the state of the software quality system according to input criteria or aggregate indicators has been developed. The method allows to determine the current state of software quality by the corresponding aggregate indicator, taking into account its cost. The method of choosing the optimal variant of the system of complex software quality assessment from the set of admissible ones is developed. The method takes into account the hierarchical structure of criteria and aggregate software quality indicators at each hierarchical level of the management system. Installed that the task of choosing the optimal version of the software quality assessment system belongs to the problems of multicriteria optimization. The task takes into account the following criteria: convenience of product support and its portability, product safety and compatibility, product reliability, ease of use and functionality. An example of the implementation of a comprehensive software quality assessment system is given. The example allows us to understand the essence of the method of choosing the best option for a software quality system, as well as the method of selecting stressful options for the state of the system by two criteria or aggregate indicators. An example of the implementation of a comprehensive software quality assessment system is given. The example allows us to understand the essence of the method of choosing the best option for a software quality system, as well as the method of selecting stressful options for the state of the system by two criteria or aggregate indicators. An example of the implementation of a comprehensive software quality assessment system is given. The example allows us to understand the essence of the method of choosing the best option for a software quality system, as well as the method of selecting stressful options for the state of the system by two criteria or aggregate indicators.

Keywords: software product quality model; quality criteria and indicators; management system; system optimization; making managerial decisions.