УДК 004.412:519.237.5

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СУПРОВОДЖУВАНОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, РЕАЛІЗОВАНОГО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ JAVAFX

Приходько С.Б., д.т.н., проф.[1]; Піщиць Б.О.[2].
[1,2] Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
[1,2] Україна, Миколаїв
[1]sergiy.prykhodko@nuos.edu.ua; [2]251191@nuos.edu.ua

Анотація. *У роботі вдосконалено математичну модель для оцінювання супроводжуваності програмного забезпечення, реалізованого за допомогою JavaFX. Модель включає рівняння еліпсоїда прогнозування для нормалізованих метрик CBO, WMC та RFC на основі тривимірного перетворення Бокса-Кокса, а також три рівняння для визначення довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій зазначених метрик.*
Ключові слова: *оцінювання; супроводжуваність; метрики програмного забезпечення; CBO; WMC; RFC; JavaFX; математична модель.*

Вступна частина. Для оцінювання супроводжуваності програмного забезпечення (ПЗ) як однієї з складових якості ПЗ використовують різні метрики, зокрема RFC (Response for a Class), CBO (Coupling Between Object Classes) та WMC (Weighted Methods per Class) [1-3].

В [4] для визначення якості ПЗ було запропоновано метод, заснований на довірчих інтервалах та інтервалах прогнозування нелінійної регресії для RFC, факторами якої є метрики CBO та WMC. Однак метрики CBO і WMC, як і RFC, також слід розглядати як залежні змінні. Крім того, застосування довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійної регресії лише для RFC в певних випадках призводить до недостовірного визначення якості ПЗ. З огляду на це, в [5] була запропонована модифікація зазначеного методу, що базується на довірчих інтервалах та інтервалах прогнозування вже трьох нелінійних регресій метрик RFC, CBO і WMC відповідно. В [5] також було продемонстровано застосування цього методу для ПЗ на Java, при розробці якого не використовувалася такий сучасний засіб як JavaFX – це клієнтська платформа наступного покоління з відкритим вихідним кодом для настільних, мобільних та вбудованих систем, побудована на Java (https://openjfx.io/). Зазначене, на нашу думку, вимагає удосконалення запропонованої в [5] математичної моделі саме для оцінювання супроводжуваності ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX.

Тому **метою дослідження** є удосконалення математичної моделі для оцінювання супроводжуваності ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX, на основі метрик CBO, WMC та RFC.

Основна частина. Побудову математичної моделі для оцінювання супроводжуваності ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX, на основі метрик CBO, WMC та RFC ми здійснювали за [5]. Для цього було сформовано вибірку зі 122 застосунків з відкритим кодом, реалізованих із використанням JavaFX та розміщених на платформі GitHub (https://github.com). Значення зазначених метрик отримано за допомогою інструменту CK (https://github.com/mauricioaniche/ck). Сформовану вибірку було поділено на навчальну (90) та тестову (32). На наступному етапі навчальну вибірку перевірено на багатовимірну нормальність за допомогою тесту Мардіа. Оскільки початкові дані не відповідали вимогам багатовимірної нормальності, для нормалізації тривимірних даних застосовано перетворення

Бокса – Кокса, оцінку параметрів якого визначено за методом максимальної правдоподібності. Для перевірки нормалізованих даних на викиди використано критерій на основі квадрата відстані Махаланобіса, за результатами застосування якого викидів не виявлено. Для цього було побудовано рівнянням тривимірного еліпсоїда прогнозування для нормалізованих метрик CBO, WMC та RFC.

Для обґрунтування необхідності удосконалення математичної моделі для оцінювання супроводжуваності ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX, було також досліджено застосовність регресійних моделей [5, 6] шляхом порівняння статистичних характеристик базових та досліджуваної вибірок. У роботі [5] регресійні моделі побудовано на основі 56 точок даних. Порівняння показало, що максимальні значення метрик CBO та WMC у базовій вибірці перевищують відповідно 14 та 71, а максимальне значення RFC становить 256, тоді як у вибірці JavaFX відповідні максимальні значення дорівнюють 9,57, 22,00 та 40,35. Крім того, середні значення та медіани досліджуваних метрик у вибірці JavaFX свідчать про відмінності в характері розподілу даних порівняно з базовою вибіркою. Отримані результати свідчать про відмінності статистичних характеристик метрик ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX, від характеристик базових вибірок, на яких побудовано розглянуті моделі. Це обмежує можливість безпосереднього застосування зазначених моделей та обґрунтовує необхідність удосконалення математичної моделі для оцінювання супроводжуваності ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX.

На основі нормалізованих значень метрик CBO, RFC та WMC було побудовано три лінійні регресії. У кожній регресії одна з метрик виступала залежною змінною, а дві інші – незалежними. Загальний вигляд рівняння лінійної регресії має такий вигляд [5]:

$$\hat{Z}_Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2, \quad (1)$$

де Z_Y, Z_1, та Z_2 – нормалізовані значення відповідно залежної та незалежних метрик; $\hat{Z}_Y$ – прогнозоване значення залежної метрики (оцінка умовного сподівання Z_Y); $\hat{b}_0$, $\hat{b}_1$ та $\hat{b}_2$ – оцінки параметрів лінійного регресійного рівняння.

Для побудови рівняння лінійної регресії нормалізованої метрики RFC необхідно в (1) замість $\hat{Z}_Y$, Z_1, Z_2, підставити відповідно $\hat{Z}_{RFC}$, Z_{CBO}, Z_{WMC}. Для побудови рівняння лінійної регресії нормалізованої метрики CBO необхідно в (1) замість $\hat{Z}_Y$, Z_1, Z_2 підставити відповідно $\hat{Z}_{CBO}$, Z_{RFC}, Z_{WMC}. Для побудови рівняння лінійної регресії нормалізованої метрики WMC необхідно в (1) замість $\hat{Z}_Y$, Z_1, Z_2 підставити відповідно $\hat{Z}_{WMC}$, Z_{CBO}, Z_{RFC}. Оцінки параметрів побудованих регресійних рівнянь для метрики CBO становлять відповідно 0,06797944, 0,12723027 та 0,40236760; для метрики RFC – 0,26365516, 0,07454235 та 1,08797885; для метрики WMC – 0,48403738, 0,11293348 та 0,52120372. Оцінки параметрів трьох побудованих лінійних регресій отримані за допомогою методу найменших квадратів.

Перехід до нелінійних регресійних моделей здійснено шляхом застосування оберненого тривимірного перетворення Бокса–Кокса до отриманих рівнянь виду (1) так само як це було зроблено в [5]. Ці моделі побудовано аналогічно [5] на основі навчальної вибірки з 90 застосунків. Перевірка нормалізованих даних за квадратом відстані Махаланобіса не виявила багатовимірних викидів, тому для побудови моделей було використано всі 90 спостережень. Значення R^2, MMRE та PRED(0,25) для моделі оцінювання метрики CBO на навчальній вибірці становлять відповідно 0,1409, 0,3939 та 0,4000. Для моделі оцінювання RFC відповідні значення становлять 0,3143, 0,3317 та 0,3889. Для моделі оцінювання WMC ці показники дорівнюють 0,4841, 0,2186 та 0,6889. Отримані результати свідчать про різну точність моделей

залежно від оцінюваної метрики. Найкращі значення R^2, MMRE та PRED(0,25) отримано для моделі WMC.

Далі були визначено довірчі інтервали та інтервали прогнозування нелінійних регресій CBO, RFC та WMC. Загальний вигляд рівняння для розрахунку довірчого інтервалу (CI) базується на відповідній формулі з [5] та має наступний вигляд:

$$\mathrm{CI} = \psi_Y^{-1}\left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2,0,05} S_{Z_Y}\sqrt{\frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \mathbf{S}_Z^{-1}\mathbf{z}_X^+}\right), \quad (2)$$

де ψ_Y^{-1} – зворотне перетворення до нормалізуючого перетворення для залежної змінної Y; $\hat{Z}_Y$ – прогнозоване значення залежної метрики за (1); $t_{\alpha/2,0,05}$ – квантиль розподілу Стьюдента з $N-3$ ступенями свободи та рівнем значущості 0,05; S_{Z_Y} – оцінка стандартного квадратичного відхилення залишків лінійної регресії (1) із врахуванням ступенів свободи $N-3$; N – обсяг вибірки; $(\mathbf{z}_X^+)$ – вектор з компонентами $Z_{1_i} - \overline{Z}_1$, і $Z_{2_i} - \overline{Z}_2$; $\boldsymbol{S}_Z$ – 2×2 матриця, елементи якої визначаються як $S_{Z_qZ_r} = \sum_{i=1}^{N}\left[Z_{q_i} - \overline{Z}_q\right]\left[Z_{r_i} - \overline{Z}_r\right]$, $q,r = 1,2$; $\mathbf{S}_Z^{-1}$ – обернена до неї матриця.

Для визначення інтервалу прогнозування нелінійної регресії до виразу під знаком квадратного кореня у (2) треба додати одиницю [5].

Рівень супроводжуваності ПЗ визначається на основі взаємного розташування тривимірної точки даних відносно довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій для метрик RFC, CBO та WMC відповідно до [5]. Спочатку за рівнянням тривимірного еліпсоїда прогнозування для нормалізованих метрик CBO, WMC та RFC перевіряють, чи точка даних ПЗ не є викидом. Далі, якщо значення всіх трьох метрик ПЗ перебувають у межах відповідних довірчих інтервалів, це ПЗ має середній рівень супроводжуваності як складової якості. Якщо ця умова не виконується, перевіряється розташування точки даних відносно верхніх меж довірчих інтервалів та нижніх меж інтервалів прогнозування для всіх трьох метрик. Якщо точка даних перебуває між зазначеними межами за кожною з метрик, ПЗ має високий рівень супроводжуваності. В усіх інших випадках ПЗ має низький рівень супроводжуваності.

Для прикладу оцінювання супроводжуваності було розглянуто ПЗ з відкритим вихідним кодом MyDocument (версія v1.0.0) (https://github.com/nikadsoft/MyDocument). Вхідні значення метрик досліджуваного ПЗ становлять: CBO = 1,70, RFC = 11,00 та WMC = 8,90. За результатами застосування побудованих нелінійних регресійних моделей отримано прогнозовані значення метрик CBO = 3,21, RFC = 15,94 та WMC = 5,89. Для метрики CBO розрахований довірчий інтервал становить [2,75; 3,73], а інтервал прогнозування – [1,24; 7,79]. Для метрики RFC відповідні інтервали становлять [13,45; 18,92] та [6,85; 38,20]. Для метрики WMC довірчий інтервал дорівнює [5,41; 6,41], а інтервал прогнозування – [3,41; 10,26]. Отже, відповідно до зазначених вище критеріїв, ПЗ MyDocument має низький рівень супроводжуваності саме через метрику WMC.

Таким чином, побудована математична модель об’єднує рівняння тривимірного еліпсоїда прогнозування для нормалізованих метрик CBO, WMC та RFC, а також рівняння для визначення довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування нелінійних регресій для зазначених метрик. За цією математичною моделлю можна оцінювати супроводжуваність ПЗ, реалізованого із використанням JavaFX.

Висновки. У роботі удосконалено математичну модель для оцінювання супроводжуваності програмного забезпечення, яка складається з рівняння тривимірного еліпсоїду прогнозування для нормалізованих за допомогою тривимірного перетворення Бокса – Кокса метрик CBO, WMC та RFC, а також рівнянь для довірчих інтервалів та інтервалів прогнозування регресій для зазначених вище метрик. Удосконалення здійснено за рахунок уточнення оцінок параметрів відповідних рівнянь. Це дозволило підвищити достовірність оцінювання супроводжуваності програмного забезпечення, реалізованого із використанням JavaFX у порівняння з існуючими подібними моделями.

Використання інструментів ШІ. Під час підготовки статті було використано ChatGPT (OpenAI, модель GPT-6) виключно з метою мовного редагування та вдосконалення формулювань наукового тексту, а також перекладу анотації англійською мовою. Наукові положення, висновки та результати є власним інтелектуальним внеском авторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Li, W., & Henry, S. (1993). Object-oriented metrics that predict maintainability. *Journal of Systems and Software, 23* (2), 111–122. https://doi.org/10.1016/0164-1212(93)90077-B

[2] Kaur, A., Kaur, K., & Pathak, K. (2014). A proposed new model for maintainability index of open source software. *Reliability, Infocom Technologies and Optimization: Trends and Future Directions : the 3rd International Conference (ICRITO 2014)*, (pp. 1–6). Noida, India. https://doi.org/10.1109/ICRITO.2014.7014758

[3] Şengül, F., & Yürüm, O. R. (2026). Software maintainability prediction using static code metrics and machine learning. *Software Quality Journal, 34*(4), 54. https://doi.org/10.1007/s11219-026-09789-w

[4] Prykhodko, S., & Prykhodko, N. (2022). A Technique for detecting software quality based on the confidence and prediction intervals of nonlinear regression for RFC metric. *Computer Sciences and Information Technologies : 2022 IEEE 17th International Conference (CSIT-2022)*, (pp. 499-502). Lviv, Ukraine. https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000532

[5] Prykhodko, S. (2024). Evaluating quality of software systems by the confidence and prediction intervals of regressions for RFC, CBO, and WMC metrics. *WSEAS Transactions on Systems, 23*, 322–330. https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.36

[6] Prykhodko, S., Makarova, L., & Pukhalevych, A. (2025). Statistical analysis of the three-dimensional data of software metrics RFC, CBO, and WMC that are not normally distributed. *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT (ICAIIT), 13*(1), 127–132. https://doi.org/10.25673/119224

Prykhodko S.B, Pishchyts B.O.

Mathematical model for assessing the maintainability of software implemented using JavaFX

Abstract. *In this paper, a mathematical model for assessing the maintainability of software implemented using JavaFX is improved. The model includes the equations of the three-dimensional prediction ellipsoid for the normalized metrics CBO, WMC, and RFC based on the three-variate Box – Cox transformation, as well as three equations for determining the confidence and prediction intervals of nonlinear regressions of the indicated metrics.*

Keywords: *assessment; maintainability; software metrics; CBO; WMC; RFC; JavaFX; mathematical model.*