УДК 004.412:519.237.5

А.С. ПРИХОДЬКО
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДНОСТІ ОБ'ЄКТНО ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЧЕРЕЗ ЗВ'ЯЗКИ МІЖ КЛАСАМИ ВЕБЗАСТОСУНКІВ З ВІДКРИТИМ КОДОМ, СТВОРЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ PHP ФРЕЙМВОРКІВ

Проблема визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, зокрема й вебзастосунків, які створюються за допомогою PHP фреймворків, є важливою, оскільки нині програмне забезпечення з відкритим кодом стає все популярнішим, а використання PHP фреймворків робить розробку застосунків швидшою. Об'єктом дослідження є процес визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених за допомогою PHP фреймворків. Предметом дослідження є математичні моделі для визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених за допомогою PHP фреймворків.

Метою роботи є побудова двох математичних моделей для визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Бокса – Кокса для підвищення достовірності визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування цих застосунків.

Для оцінювання складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, що створюються за допомогою PHP фреймворків, на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса побудовано дві математичні моделі у формі еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC (the Response for Class) та CBO (Coupling Between Objects). Метод максимальної правдоподібності використовувався для обчислення оцінок параметрів двовимірного перетворення Бокса – Кокса. Зазначені моделі побудовані з використанням двох тестових статистик на основі квантилів розподілу Хі-квадрат та F-розподілу відповідно. Для побудови зазначених математичних моделей за допомогою інструменту PhpMetrics (https://phpmetrics.org/) ми отримали дані з метрик для 125 вебзастосунків з відкритим кодом, що створювалися за допомогою п'яти відомих PHP фреймворків: CakePHP, Laravel, Symfony, CodeIgniter та Yii. Ці застосунки розміщені на сайті GitHub. Виконано порівняння результатів визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, що створювалися за допомогою PHP фреймворків.

Ключові слова: *математична модель, еліпс прогнозування, складність, об'єктно орієнтоване проєктування, зв'язки між класами, вебзастосунок, нормалізуюче перетворення, перетворення Бокса – Кокса.*

A.S. PRYKHODKO
Odesa I.I. Mechnikov National University

MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING THE COMPLEXITY OF OBJECT-ORIENTED DESIGN DUE TO THE RELATIONSHIPS BETWEEN CLASSES OF OPEN-SOURCE WEB APPLICATIONS CREATED USING PHP FRAMEWORKS

The problem of determining the object-oriented design complexity of the open-source software, including Web applications created using the PHP frameworks, is important because nowadays open-source software is growing in popularity and using the PHP frameworks making application development faster. The object of the study is the process of determining the object-oriented design complexity due to the relationships between classes of the open-source web applications created using the PHP frameworks. The subject of the study is the mathematical models to determine the object-oriented design complexity due to the relationships between classes of the open-source web applications created using the PHP frameworks.

The goal of the work is the build two mathematical models for determining the object-oriented design complexity due to the relationships between classes of the open-source web applications created using the PHP frameworks based on the two-variate Box-Cox normalizing transformation to increase confidence in evaluating the object-oriented design complexity of these apps.

To determine the object-oriented design complexity due to the relationships between classes of open-source web applications created using PHP frameworks, two mathematical models in the form of a prediction ellipse were con-

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17

structed based on the two-variate Box-Cox transformation for the normalized metrics RFC (the Response for Class) and CBO (Coupling Between Objects). The maximum likelihood method is used to compute the parameter estimates of the two-variate Box-Cox transformation. The above models are built using two test statistics based on the quantiles of the Chi-square distribution and the F-distribution, respectively. To build these mathematical models using the PhpMetrics tool (https://phpmetrics.org/), we obtained data from metrics for 125 open-source web applications created using five well-known PHP frameworks: CakePHP, Laravel, Symfony, CodeIgniter, and Yii. These applications are hosted on GitHub. The results of determining the complexity of object-oriented design due to the relationships between classes of open-source web applications created using PHP frameworks were compared.

Key words: *mathematical model, prediction ellipse, complexity, object-oriented design, relationships between classes, web application, normalizing transformation, Box-Cox transformation.*

Постановка проблеми

Проблема визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування (далі – ООП) програмного забезпечення (далі – ПЗ) з відкритим вихідним кодом, зокрема й вебзастосунків, які створюються за допомогою PHP фреймворків, є важливою для IT-компаній, оскільки тісно пов'язана з подальшими витратами, які виникають у процесі життєвого циклу розроблення ПЗ. Окрім того, нині ПЗ з відкритим кодом стає все популярнішим [1], а використання PHP фреймворків робить розробку вебзастосунків швидшою.

Згідно із [2], для визначення складності ООП через зв'язки між класами можуть бути використані дві програмні метрики: зв'язаність між об'єктами CBO (Coupling Between Objects) та відгук класу RFC (the Response for Class). Але на практиці зазвичай ці метрики аналізуються окремо без урахування кореляції між ними, а прийнятні їх значення рекомендуються лише на рівні класу. Тому у [3] було запропоновано методику визначення складності ООП через зв'язки між класами на основі еліпса прогнозування для нормалізованих метрик CBO та RFC на рівні застосунку, а також побудовано відповідну математичну модель для застосунків з відкритим кодом на Java. Але зазначена модель не розрахована для вебзастосунків з відкритим кодом, які створюються за допомогою PHP фреймворків. А зараз багато вебзастосунків створюються з використанням саме PHP фреймворків. Тому постає потреба в математичних моделях, які би дозволяли здійснювати визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, які створюються за допомогою PHP фреймворків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Хоча С.Р. Чідамбер і К.Ф. Кемерер (S.R. Chidamber, C.F. Kemerer) запропонували набір програмних показників (далі – СК) із шести метрик (WMC, DIT, NOC, RFC, CBO, LCOM) для вимірювання трьох кроків ООП у визначенні Буча (Booch) ще в 1991 р. [4], їхній набір метрик СК досі служить узагальненим рішенням для інших дослідників, на яке можна покладатися для конкретних цілей [5–8], зокрема і складність ООП [3; 9–12].

У [9] автори побудували рівняння множинної лінійної регресії для визначення складності ООП на основі мінімального набору показників складності, які визначаються за допомогою метрик СК. Хоча запропоноване рівняння є плідним для кількісного оцінювання складності ієрархії ООП, воно не дозволяє безпосередньо врахувати кореляцію між чинниками – програмними метриками. Це може впливати на результат оцінювання складності.

Дослідження в [10] зосереджується на двох основних темах: першій, як вимірювання непрямого зв'язку може допомогти розробникам із завданнями обслуговування, другій, як показники непрямого зв'язку можуть кількісно визначити складність і розмір ПЗ. Але дослідження в [10] безпосередньо не враховує кореляцію між програмними метриками. Хоча інші дослідники вказують на суттєвий кореляційний зв'язок між окремими метриками СК [3; 5; 7; 12].

У [3] автори побудували рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса (далі – ПБК) та квантиля F-розподілу. Вони застосували це рівняння для оцінювання складності на третьому етапі ООП програм з відкритим кодом на Java. Автори запропонували використовувати квадрат відстані

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17

Махаланобіса (далі – КВМ) з рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO як індикатор складності ООП застосунків з відкритим кодом на Java з погляду зв'язків між класами. Але зазначена модель не завжди дає достовірні результати для вебзастосунків з відкритим кодом, які створюються за допомогою PHP фреймворків. Тому постає потреба в математичних моделях, які би дозволяли здійснювати оцінювання складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, які створюються за допомогою PHP фреймворків.

Мета дослідження

Метою дослідження є побудова двох математичних моделей для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, на основі двовимірного нормалізуючого перетворення Бокса – Кокса для підвищення достовірності визначення складність ООП цих застосунків.

Об'єктом дослідження є процес визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених за допомогою PHP фреймворків. Предметом дослідження є математичні моделі для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених за допомогою PHP фреймворків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Побудувати математичну модель для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса та квантиля розподілу Хі-квадрат.

2. Удосконалити математичну модель для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса та квантиля F-розподілу.

3. Виконати порівняння результатів визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, що створювалися за допомогою PHP фреймворків, за двома побудованими моделями.

Виклад основного матеріалу дослідження

Перш ніж будувати зазначені математичні моделі за допомогою інструменту PhpMetrics (https://phpmetrics.org/), були отримані дані з метрик RFC та CBO для 125 вебзастосунків, що створені за допомогою таких популярних PHP фреймворків: CakePHP, Laravel, Symfony, CodeIgniter та Yii. Ці застосунки розміщені на сайті GitHub (https://github.com).

Далі ми перевірили двовимірний розподіл отриманих даних з метрик RFC та CBO на нормальність за допомогою тесту Мардіа (Mardia's test), який базується на багатовимірних асиметрії та ексцесі. Тест показав, що двовимірний розподіл даних відхиляється від гаусівського. Зокрема, на це вказує те, що оцінка двовимірного ексцесу, яка дорівнює 27,35, більша за 9,84 – значення відповідного квантиля нормального розподілу з математичним сподіванням 8 і дисперсією 0,512. Рівень значимості брався 0,005.

Тому надалі для визначення наявності двовимірних викидів у даних з метрик CBO та RFC вебзастосунків, що створені за допомогою PHP фреймворків, як і у [3], ми використовували метод на основі КВМ для нормалізованих даних. Також, як і у [3], нормалізацію даних ми здійснювали за допомогою двовимірного ПБК, компоненти якого визначаються як

$$Z_j = \begin{cases} \left(X_j^{\lambda_j} - 1\right)/\lambda_j, & \text{if} \quad \lambda_j \neq 0; \\ \ln\left(X_j\right), & \text{if} \quad \lambda_j = 0. \end{cases} \tag{1}$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17

Тут Z_j – гаусівська випадкова величина, λ_j – параметр ПБК, $j = 1,2$. Ми позначили метрики CBO та RFC як X_1 та X_2 відповідно. Нормалізовані метрики CBO та RFC позначені як Z_1 та Z_2 відповідно. Оцінювання параметрів двовимірного ПБК з компонентами (1) виконувалося за методом максимальної правдоподібності. Їх оцінки для 125 двовимірних точок даних є такими: $\hat{\lambda}_1 = 0{,}431235$ та $\hat{\lambda}_2 = -0{,}166319$.

Значення КВМ для нормалізованої точки даних *i* ми визначали за формулою:

$$d_i^2 = \left(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}\right)^T \mathbf{S}_Z^{-1} \left(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}\right), \tag{2}$$

де $\mathbf{Z}$ – вектор гаусівських випадкових величин, $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2\}^T$; $\bar{\mathbf{Z}}$ – вектор вибіркових середніх, $\bar{\mathbf{Z}} = \left\{\bar{Z}_1, \bar{Z}_2\right\}^T$; $\mathbf{S}_Z$ – вибіркова коваріаційна матриця для компонентів вектора $\mathbf{Z}$.

$$\mathbf{S}_Z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}\right)\left(\mathbf{Z}_i - \bar{\mathbf{Z}}\right)^T, \tag{3}$$

де N – кількість точок даних.

У результаті одна точка даних виявилася двовимірним викидом – це застосунок Grocery CRUD (https://github.com/scoumbourdis/grocery-crud), який є бібліотекою PHP і фреймворку Codeigniter, який створює повнофункціональну систему CRUD без необхідності налаштування JavaScript або CSS. Порівняно з іншими застосунками цей мав найменшу кількість класів (усього 11) та найбільше значення RFC на рівні застосунку (47,09). Зазначена точка даних була відкинута тому, що для неї КВМ для нормалізованих значень метрик CBO та RFC більше за квантиль розподілу Хі-квадрат (15,08 > 10,60). Надалі ми залишили дані з метрик CBO та RFC для 124 вебзастосунків, які знову були нормалізовані за допомогою двовимірного ПБК з такими оцінками параметрів: $\hat{\lambda}_1 = 0{,}463193$ та $\hat{\lambda}_2 = 0{,}162485$. Описові статистики для даних зі 125 та 124 вебзастосунків наведені в табл. 1, де Min, Max, Mean та RMSD позначають відповідно мінімальне, максимальне, середнє та вибіркове середнє квадратичне відхилення окремої метрики.

За даними зі 124 вебзастосунків ми здійснили побудову двох математичних моделей для визначення складності їх ООП через зв'язки між класами на основі двовимірного ПБК для нормалізованих метрик CBO та RFC.

Таблиця 1

Описові статистики для даних зі 125 та 124 вебзастосунків

№	Метрика	*N* = 125				*N* = 124			
		Min	**Max**	**Mean**	**RMSD**	**Min**	**Max**	**Mean**	**RMSD**
1	NC	11	7743	465,648	899,328	25	7 743	469,315	902,038
2	CBO	1,66	8,72	4,323	1,601	1,66	8,72	4,341	1,594
3	RFC	3,00	47,09	10,818	5,057	3,00	20,98	10,525	3,873

Перша модель у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик CBO та RFC із квантилем розподілу Хі-квадрат має вигляд:

$$\left(\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}}\right)^T \mathbf{S}_Z^{-1} \left(\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}}\right) = \chi_{2,\alpha}^2, \tag{4}$$

де $\chi_{2,\alpha}^2$ – квантиль розподілу Хі-квадрат із двома ступенями свободи.

Друга модель у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик CBO та RFC із квантилем F-розподілу має вигляд:

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17

$$\left(\mathbf{Z}-\bar{\mathbf{Z}}\right)^T \mathbf{S}_Z^{-1}\left(\mathbf{Z}-\bar{\mathbf{Z}}\right)=\frac{2\left(N^2-1\right)}{N\left(N-2\right)}F_{2,N-2,\alpha}, \tag{5}$$

де $F_{2,N-2,\alpha}$ – це квантиль F-розподілу із двома та $N-2$ ступенями свободи.

У рівняннях (4) та (5) рівень значимості α дорівнює 0,005, $\bar{\mathbf{Z}}=\{2,029, 2,785\}^T$, а зворотна матриця $\mathbf{S}_Z^{-1}$ є такою:

$$\mathbf{S}_Z^{-1}=\begin{pmatrix} 1,88082 & -0,17454 \\ -0,17454 & 3,46172 \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Зазначимо, що в областях, які описують рівняння (4) та (5), ми маємо змогу обробляти інформацію з нормалізованих програмних метрик CBO та RFC, а поза цими областями така можливість відсутня.

Для визначення складності ООП через зв'язки між класами за допомогою (4) та (5) ми також використовуємо такі рівняння:

$$\hat{Z}_2=2,68256+0,05042Z_1, \tag{7}$$

$$\hat{Z}_1=1,77086+0,09280Z_2. \tag{8}$$

Тоді складність ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, які створюються за допомогою PHP фреймворків, може бути визначена так.

Крок 1. За перетворенням (1) отримати нормалізовані значення метрик CBO та RFC для і-го вебзастосунку – це Z_{1_i} та Z_{2_i} відповідно.

Крок 2. За (2) обчислити значення КВМ для Z_{1_i} та Z_{2_i} з урахуванням (6).

Крок 3. Якщо значення КВМ для Z_{1_i} та Z_{2_i} буде більше за 10,60, то стоп (ми не можемо використати рівняння (4) для цих значень), інакше переходимо до кроку 4.

Крок 4. Обчислюємо значення $\hat{Z}_{2_i}$ та $\hat{Z}_{1_i}$ для Z_{1_i} і Z_{2_i} за (7) та (8) відповідно.

Крок 5. Якщо значення для Z_{1_i} менше $\hat{Z}_{1_i}$ та Z_{2_i} менше $\hat{Z}_{2_i}$, то складність ООП через зв'язки між класами і-го вебзастосунку невелика, інакше складність велика.

Зазначимо, наведений алгоритм заснований на рівнянні (4). Для рівняння (5) у цьому алгоритмі на кроці 3 треба замінити 10,60 на 11,25. За цими алгоритмами була визначена складність ООП через зв'язки між класами 124 вебзастосунків. Обидва алгоритми дали однакові результати: зі 124 вебзастосунків 34 мають невелику складність ООП через зв'язки між класами, а 90 – велику. Хоча для вказаних даних за рівняннями (4) та (5) було отримано однаковий результат, але рівняння (4) порівняно з (5) загалом буде давати можливість здійснювати визначення складності ООП через зв'язки між класами для меншої кількості комбінацій значень метрик CBO та RFC на рівні застосунку.

Висновки

Уперше побудовано математичну модель для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса та квантиля розподілу Хі-квадрат. Удосконалено математичну модель для визначення складності ООП через зв'язки між класами вебзастосунків

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17

з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, у формі рівняння еліпса прогнозування для нормалізованих метрик RFC та CBO на основі двовимірного перетворення Бокса – Кокса та квантиля F-розподілу. Зазначені моделі порівняно з існуючими дозволяють обробляти інформацію з нормалізованих програмних метрик CBO та RFC вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків, для визначення складності їх ООП через зв'язки між класами. Надалі планується здійснити побудову математичних моделей для визначення складності ООП через семантику класів вебзастосунків з відкритим кодом, створених з використанням PHP фреймворків.

Список використаної літератури

1. Madaehoh A., Senivongse T. OSS-AQM: An open-source software quality model for automated quality measurement. *Data and Software Engineering (ICoDSE) :* proceedings of the 2022 International Conference. Denpasar, Indonesia: IEEE, 2022. P. 126–131. https://doi.org/10.1109/ICoDSE56892.2022.9972135
2. Chidamber S.R., Kemerer C.F. A metrics suite for object-oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1994. Vol. 20, № 6. P. 476–493. https://doi.org/10.1109/32.295895
3. Prykhodko S., Prykhodko N., Smykodub T. A joint statistical estimation of the RFC and CBO metrics for open-source applications developed in Java. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) :* proceedings of the 2022 IEEE 17th International Conference. Lviv, Ukraine: IEEE, 2022. P. 442–445. https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000457
4. Chidamber S.R., Kemerer C.F. Towards a metrics suite for object oriented design. *ACM SIGPLAN Notices*. 1991. Vol. 26, Issue 11. P. 197–211. https://doi.org/10.1145/118014.117970
5. Molnar A.J., Neamţu A., Motogna S. Evaluation of software product quality metrics. in E. Damiani, G. Spanoudakis, L. Maciaszek. Eds. Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering. ENASE 2019. *Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol. 1172. P. 163–187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40223-5_8
6. Wikantyasa I.M.A., Kurniawan A.P., Rochimah S. CK metric and architecture smells relations: Towards software quality assurance. *Information & Communication Technology and System (ICTS) :* proceedings of 14th International Conference. Surabaya, Indonesia: IEEE, 2023. P. 13–17. https://doi.org/10.1109/ICTS58770.2023.10330874
7. Prykhodko S. Evaluating quality of software systems by the confidence and prediction intervals of regressions for RFC, CBO, and WMC metrics. *WSEAS Transactions on Systems*. 2024. Vol. 23. P. 322–330. https://doi.org/10.37394/23202.2024.23.36
8. Levasseur M., Badri M. Prioritizing unit tests using object-oriented metrics, centrality measures, and machine learning algorithms. *Innovations in Systems and Software Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/s11334-024-00550-9
9. Khan S.A., Khan R.A. Object oriented design complexity quantification model. *Procedia Technology*. 2012. Vol. 4. P. 548–554. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.087
10. Navas-Su J., Gonzalez-Torres A., Hernandez-Vasquez M. et al. A metrics suite for measuring indirect coupling complexity. *Programming and Computer Software*. 2023. Vol. 49, Issue 8. P. 735–761. https://doi.org/10.1134/S0361768823080157
11. Prykhodko A.S., Malakhov E.V. Determining object-oriented design complexity due to the identification of classes of open-source web applications created using PHP frameworks. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. Vol. 69, № 2. P. 160–166. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-16
12. Приходько С.Б., Кольцов А.В., Грабінський М.Р. Математична модель для визначення складності об'єктно орієнтованого проєктування через зв'язки між класами застосунків з відкритим кодом на Kotlin. *Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS-2023) :* матеріали IV-ї Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції, 30–31 жовтня 2023 р. Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2023. С. 38–39. URL: https://itconf.nuos.edu.ua/2023/proceedings/.

References

1. Madaehoh, A., & Senivongse, T. (2022). OSS-AQM: An open-source software quality model for automated quality measurement. In *the 2022 International Conference on Data and Software*

Engineering (ICoDSE) (pp. 126–131). Denpasar, Indonesia: IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoDSE56892.2022.9972135 [in English].
2. Chidamber, S.R., & Kemerer, C.F. (1994). A metrics suite for object-oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 6 (20), 476–493. https://doi.org/10.1109/32.295895 [in English].
3. Prykhodko, S., Prykhodko, N., & Smykodub, T. (2022). A joint statistical estimation of the RFC and CBO metrics for open-source applications developed in Java. In *the 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 442–445). Lviv, Ukraine: IEEE. https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000457 [in English].
4. Chidamber, S.R., & Kemerer, C.F. (1991). Towards a metrics suite for object oriented design. *ACM SIGPLAN Notices*, 11 (26), 197–211. https://doi.org/10.1145/118014.117970 [in English].
5. Molnar, AJ., Neamţu, A., & Motogna, S. (2020). Evaluation of software product quality metrics. In: Damiani, E., Spanoudakis, G. & Maciaszek, L. (eds) Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering. ENASE 2019. *Communications in Computer and Information Science*, 1172, 163–187. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40223-5_8 [in English].
6. Wikantyasa, I.M.A., Kurniawan, A.P., & Rochimah, S. (2023). CK metric and architecture smells relations: Towards software quality assurance. In *2023 14th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)* (pp. 13–17). Surabaya, Indonesia: IEEE. https://doi.org/10.1109/ICTS58770.2023.10330874 [in English].
7. 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 [in English].
8. Levasseur, M., & Badri, M. (2024). Prioritizing unit tests using object-oriented metrics, centrality measures, and machine learning algorithms. *Innovations in Systems and Software Engineering*. https://doi.org/10.1007/s11334-024-00550-9 [in English].
9. Khan, S.A., & Khan, R.A. (2012). Object oriented design complexity quantification model. *Procedia Technology*, 4, 548–554. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.087 [in English].
10. Navas-Su, J., Gonzalez-Torres, A., Hernandez-Vasquez, M., Solano-Cordero, J., Hernandez-Castro, F., & Beer, A. (2023). A metrics suite for measuring indirect coupling complexity. *Programming and Computer Software*, 8 (49), 735–761. https://doi.org/10.1134/S0361768823080157 [in English].
11. Prykhodko, A.S., & Malakhov, E.V. (2024). Determining object-oriented design complexity due to the identification of classes of open-source web applications created using PHP frameworks. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2 (69), 160–166. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-16 [in English].
12. Prykhodko, S.B., Koltsov, A.V., & Grabinsky, M.R. (2023). Matematychna model dlia vyznachennia skladnosti obiektno-oriientovanoho proektuvannia cherez zviazky mizh klasamy zastosunkiv z vidkrytym kodom na Kotlin [A mathematical model for determining the complexity of object-oriented design through relationships between classes in open source Kotlin applications]. *Informatsiini tekhnolohii: modeli, alhorytmy, systemy (ITMAS-2023) : materialy IV-i Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet konferentsii, 30–31 zhovtnia 2023 r. Mykolaiv : NUK imeni admirala Makarova – In the* 4th *All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference on Information technology: models, algorithms, systems (ITMAS-2023)* (pp. 38–39). Mykolaiv, Ukraine: Admiral Makarov NUOS. Retrieved from: https://itconf.nuos.edu.ua/2023/proceedings/ [in Ukrainian].

Приходько Андрій Сергійович – аспірант кафедри математичного забезпечення комп'ютерних систем Одеського національного університету імені І. І. Мечникова. E-mail: whiterandrek@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7109-5508.

Prykhodko Andrii Serhiiovych – Postgraduate Student at the Department of Mathematical Support of Computer Systems of the Odesa I.I. Mechnikov National University. E-mail: whiterandrek@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7109-5508.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-17