

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.25>

УДК 004.94:004.89

Метод аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування інтелектуальних систем в умовах багаторівневої невизначеності

Комлева Наталія Олегівна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9627-8530>; komleva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57191858904

Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті запропоновано метод аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування інтелектуальних систем в умовах багаторівневої невизначеності. Метод призначений для кількісного оцінювання зміни характеристик процесу проєктування під впливом епістемічної, структурної та семантичної складових невизначеності. Для опису стану математичної моделі використано систему часткових критеріїв, що характеризують повноту відображення вимог, коректність граматико-математичної трансформації, структурну узгодженість, адаптивність і стійкість процесу проєктування. Часткові критерії поєднуються з інтегральним показником якості та інтегральним показником ризику, що дає змогу комплексно оцінювати поведінку математичної моделі за зміни умов проєктування. Встановлено взаємозв'язок між складовими багаторівневої невизначеності та критеріями оцінювання процесу проєктування, що дозволяє визначати характер їх безпосереднього й опосередкованого впливу. Експериментальне дослідження проведено для двох інтелектуальних систем із різними проявами невизначеності. На основі варіювання структурної узгодженості та адаптивності досліджено зміну інтегральної якості процесу проєктування та визначено області стійкої поведінки математичної моделі. Отримані результати підтверджують можливість застосування запропонованого методу для комплексного оцінювання поведінки математичних моделей процесу проєктування та визначення необхідності їх адаптації за зміни умов невизначеності.

Ключові слова: інтелектуальні системи; процес проєктування; математична модель; багаторівнева невизначеність; аналіз поведінки; структурна узгодженість; адаптивність; стійкість; інтегральний показник якості; ризик

Для цитування: Комлева Н. О. «Метод аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування інтелектуальних систем в умовах багаторівневої невизначеності». *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 1 (3): 298–307. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.25>

Актуальність. Проєктування інтелектуальних систем діагностування і прийняття рішень здійснюється в умовах неповноти та неоднозначності інформації, зміни вимог, структури взаємозв'язків між компонентами системи та ресурсних обмежень. Це зумовлює необхідність урахування невизначеності не лише під час функціонування інтелектуальної системи, а й безпосередньо в процесі її проєктування.

Особливого значення ця проблема набуває в умовах багаторівневої невизначеності, окремі складові якої мають різний характер впливу на результати проєктування. Зміна вимог, неоднозначність їх інтерпретації, виникнення альтернативних структурних відповідностей або зміна умов проєктування можуть призводити до зниження структурної узгодженості сформованої моделі, необхідності її адаптації та збільшення ризику процесу проєктування.

Для оцінювання процесу проєктування можуть використовуватися часткові критерії, що характеризують повноту, коректність трансформації, структурну узгодженість, адаптивність і стійкість, а також інтегральні показники якості та ризику. Однак отримання таких показників для певного стану моделі дає лише її статичну оцінку і не дозволяє встановити, як змінюватимуться характеристики математичної моделі при зміні умов проєктування.

Тому виникає необхідність переходу від оцінювання окремого стану математичної моделі до аналізу її поведінки. Під поведінкою математичної моделі процесу проєктування розуміється зміна сукупності її характеристик під впливом багаторівневої невизначеності. Такий аналіз має забезпечувати можливість визначення областей стійкого функціонування моделі, оцінювання впливу зміни умов проєктування на її характеристики та виявлення необхідності адаптації.

При цьому вплив складових багаторівневої невизначеності доцільно враховувати через зміну відповідних критеріїв процесу проєктування, а не шляхом введення додаткових

вагових коефіцієнтів. Це дозволяє встановити зв'язок між характером невизначеності, зміною характеристик математичної моделі та кінцевими показниками якості й ризику процесу проєктування.

Отже, актуальним є розроблення методу аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування, який поєднує профіль багаторівневої невизначеності, систему критеріїв оцінювання процесу проєктування, інтегральні показники якості та ризику і дозволяє визначати необхідність адаптації математичної моделі.

Метою дослідження є розроблення методу аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування інтелектуальних систем діагностування і прийняття рішень в умовах багаторівневої невизначеності, який забезпечує оцінювання зміни характеристик математичної моделі залежно від умов проєктування, визначення областей її стійкого функціонування та виявлення необхідності структурної адаптації.

Для досягнення поставленої мети необхідно встановити взаємозв'язок між складовими багаторівневої невизначеності та критеріями оцінювання процесу проєктування, визначити поточний стан математичної моделі та умови її стійкого функціонування, а також експериментально дослідити зміну характеристик математичних моделей за різних умов реалізації процесу проєктування.

Аналіз існуючих рішень. Проблема врахування невизначеності під час моделювання складних програмних та інтелектуальних систем є предметом значної кількості сучасних досліджень. У роботі [1] систематизовано підходи до представлення невизначеності у програмних моделях та запропоновано класифікацію відповідних засобів моделювання. Подальший розвиток цього напрямку представлено в [2], де розглядається уніфіковане представлення невизначеності для кіберфізичних систем. Окрему увагу приділено невизначеності, пов'язаній із неповнотою знань: у [3] запропоновано засоби її явного представлення в моделях предметної області. Для інтелектуальних систем діагностування і прийняття рішень у [4] запропоновано поєднання нечіткої логіки та теорії Демпстера–Шафера як засобів опрацювання різних проявів невизначеності. Таким чином, простежується тенденція до переходу від описового врахування невизначеності до її формалізованого включення в структуру моделей.

Важливим напрямом є не лише представлення невизначеності, а й оцінювання її впливу на характеристики та поведінку систем. У [5] розглянуто кількісне визначення і поєднання невизначеності для покращення поведінки систем цифрових двійників. Такий підхід підтверджує необхідність дослідження змін характеристик моделі залежно від умов невизначеності, а не лише фіксації самого факту її наявності.

Проблема зміни поведінки системи під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників широко досліджується в теорії самоадаптивних систем. Систематичний огляд [6] показує різноманітність підходів до самоадаптації та їх застосування в різних предметних областях; ключовою властивістю таких систем є здатність підтримувати досягнення своїх цілей за зміни середовища. У [7] для планування адаптації застосовується стохастичне моделювання на основі архітектури програмної системи. У роботі [8] адаптація розглядається у взаємозв'язку з вимогами та механізмами керування, а в [9] досліджується контекстна адаптація вимог за наявності невизначеності під час функціонування системи. У [10] запропоновано модель і метод еволюційного керування структурою прийняття рішень в інтелектуальних системах, що передбачають її адаптацію до зміни умов функціонування та рівня невизначеності. Отже, адаптація розглядається як реакція на зміну умов, яка потребує встановлення зв'язку між поточним станом системи та необхідними змінами її моделі.

Поряд із механізмами адаптації важливого значення набуває кількісне оцінювання її результатів. У [11] систематизовано підходи до оцінювання самоадаптивних програмних систем та визначення характеристик, за якими може досліджуватися ефективність їх адаптації. Окремий напрям становлять дослідження узгодженості моделей. У [12] на основі аналізу промислових процесів модельно-орієнтованої розробки показано важливість контролю узгодженості та її відновлення при зміні взаємопов'язаних проєктних артефактів.

У [13] систематизовано практики забезпечення узгодженості в модельно-орієнтованій інженерії програмного забезпечення та UML. Ці результати є важливими з погляду дослідження поведінки проектних моделей, оскільки їх зміна та адаптація мають відбуватися зі збереженням необхідного рівня структурної і поведінкової узгодженості.

Ще одним аспектом оцінювання процесу проектування є врахування ризику. У [14] для підтримки прийняття рішень під час оцінювання ризиків на етапі проектування програмних систем використано апарат нечіткої логіки. Такий підхід демонструє доцільність кількісного врахування ризику поряд з іншими характеристиками процесу проектування, особливо за наявності невизначеності.

Математична модель процесу проектування та критерії її оцінювання. Об'єктом аналізу є математична модель процесу проектування інтелектуальної системи, подана у вигляді $M = \langle R^*, S, B, O \rangle$, де R^* – множина узгоджених вимог; S – структурні компоненти моделі; B – механізми логічного виведення та адаптації; O – множина можливих результатів проектування.

Для кількісного оцінювання процесу проектування використовується система часткових критеріїв K_{full} , K_{gram} , K_{cons} , K_{adapt} , K_{res} . Критерій повноти K_{full} характеризує ступінь відображення узгоджених вимог у сформованій проектній моделі. Критерій коректності граматико-математичної трансформації K_{gram} визначає частку вимог, для яких формалізація та подальше перетворення у структурно-поведінкові елементи проектної моделі виконані коректно. Критерій структурної узгодженості K_{cons} характеризує коректність і несуперечність зв'язків між сформованими елементами проектної моделі. Критерій адаптивності K_{adapt} відображає здатність моделі зберігати узгодженість при зміні вимог, структури або умов проектування без необхідності її повної перебудови. Критерій стійкості K_{res} характеризує здатність процесу проектування зберігати прийнятні результати за зміни вхідних даних та умов його реалізації [15].

Значення часткових критеріїв агрегуються в інтегральному показнику якості процесу проектування $Q_p(M)$, який характеризує загальну ефективність застосування математичної моделі. Поряд із ним визначається інтегральний показник ризику $Risk(M)$, що враховує ризику, пов'язані з неповнотою формалізації вимог, граматико-математичною трансформацією, структурною узгодженістю, адаптивністю та стійкістю процесу проектування [16].

Для аналізу поведінки математичної моделі її поточний стан подамо у вигляді

$$X(M, U) = \langle K_{full}, K_{gram}, K_{cons}, K_{adapt}, K_{res}, Q_p(M), Risk(M) \rangle,$$

де U – профіль багаторівневої невизначеності.

Для аналізу розглядаються епістемічна U_{epist} , структурна U_{struct} та семантична U_{sem} складові невизначеності. Їх вплив може бути безпосереднім, коли зміна відповідної складової безпосередньо позначається на значенні критерію, або опосередкованим, коли вплив проявляється через зміну інших характеристик процесу проектування (Таблиця 1).

Таблиця 1. Вплив багаторівневої невизначеності на критерії процесу проектування

Складова U	K_{full}	K_{gram}	K_{cons}	K_{adapt}	K_{res}
U_{epist}	Опосередкований	Опосередкований	Безпосередній	Безпосередній	Опосередкований
U_{struct}	Опосередкований	Опосередкований	Безпосередній	Безпосередній	Опосередкований
U_{sem}	Опосередкований	Безпосередній	Безпосередній	Опосередкований	Опосередкований

Джерело: складено автором

Епістемічна невизначеність, пов'язана з неповнотою знань про об'єкт або умови проектування, найбільш суттєво проявляється через структурну узгодженість та адаптивність моделі. Поява нової інформації може вимагати уточнення сформованих структурних зв'язків або адаптації окремих фрагментів проектної моделі.

Структурна невизначеність виникає за наявності декількох можливих структурних відповідностей або альтернативних варіантів організації елементів моделі. Тому її безпосередній вплив проявляється насамперед у критеріях K_{cons} та K_{adapt} . Зі збільшенням кількості альтернативних структурних зв'язків ускладнюється забезпечення їх узгодженості та зростає потреба в адаптації моделі.

Семантична невизначеність пов'язана з неоднозначністю змісту та інтерпретації вимог. Вона безпосередньо впливає на K_{gram} , оскільки від однозначності формалізованого представлення вимоги залежить коректність її граматико-математичної трансформації. Крім того, різні інтерпретації однієї вимоги можуть призводити до формування різних структурно-поведінкових елементів проєктної моделі, що зумовлює безпосередній вплив на K_{cons} .

Вплив кожної складової U враховується через зміну відповідних часткових критеріїв, які надалі агрегуються в інтегральному показнику якості $Q_p(M)$ та враховуються під час визначення інтегрального ризику $Risk(M)$. Такий підхід дозволяє уникнути додаткової суб'єктивізації оцінювання через призначення ваг окремим видам невизначеності.

Метод аналізу поведінки математичної моделі. На основі встановленого взаємозв'язку аналіз поведінки математичної моделі виконується шляхом послідовної зміни умов проєктування та визначення відповідних станів моделі. Для заданого профілю багаторівневої невизначеності U визначається стан $X(M,U)=F(M,U)$, де F – оператор аналізу поведінки математичної моделі, який відображає вплив поточного профілю багаторівневої невизначеності на значення критеріїв процесу проєктування та сформованих на їх основі інтегральних показників.

Метод передбачає таку послідовність (Рис. 1): задається початковий стан математичної моделі; визначається поточний профіль багаторівневої невизначеності; встановлюються критерії, на які впливають його складові; повторно визначаються значення відповідних критеріїв процесу проєктування; розраховуються інтегральний показник якості $Q_p(M)$ та інтегральний показник ризику $Risk(M)$; отриманий стан математичної моделі порівнюється з установленими допустимими значеннями.

Отриманий вектор $X(M,U)$ характеризує поточний стан математичної моделі за заданого профілю багаторівневої невизначеності. Зміна профілю U приводить до зміни відповідних критеріїв процесу проєктування і, як наслідок, інтегральних показників $Q_p(M)$ та $Risk(M)$. Таким чином, поведінка математичної моделі визначається характером зміни її стану під впливом багаторівневої невизначеності.

Для оцінювання стійкості використовуються допустимі граничні значення часткових критеріїв та інтегрального ризику. Математична модель зберігає стійкий стан для профілю U_i , якщо $K_j(M) \geq K_j^{\min}$, $j = 1, \dots, 5$, та одночасно $Risk(M) \leq Risk^{\max}$, де $K_j^{\min}$ – мінімально допустиме значення відповідного критерію, $Risk^{\max}$ – максимально допустиме значення інтегрального ризику. Порухення хоча б однієї з установлених умов означає вихід математичної моделі за межі області стійкого функціонування. У такому випадку необхідно визначити критерій, зміна якого спричинила порушення, та відповідну складову багаторівневої невизначеності.

Область стійкої поведінки математичної моделі формується сукупністю її станів, для яких характеристики процесу проєктування залишаються в установлених допустимих межах. При цьому належність моделі до області стійкої поведінки визначається не лише значенням інтегрального показника якості, а результатом спільного оцінювання часткових критеріїв та інтегрального ризику. Такий підхід є принциповим, оскільки достатньо високе значення $Q_p(M)$ саме по собі не гарантує стійкості моделі: високі значення одних критеріїв можуть поєднуватися зі зниженням іншого критерію до неприйнятного рівня або зі збільшенням інтегрального ризику.

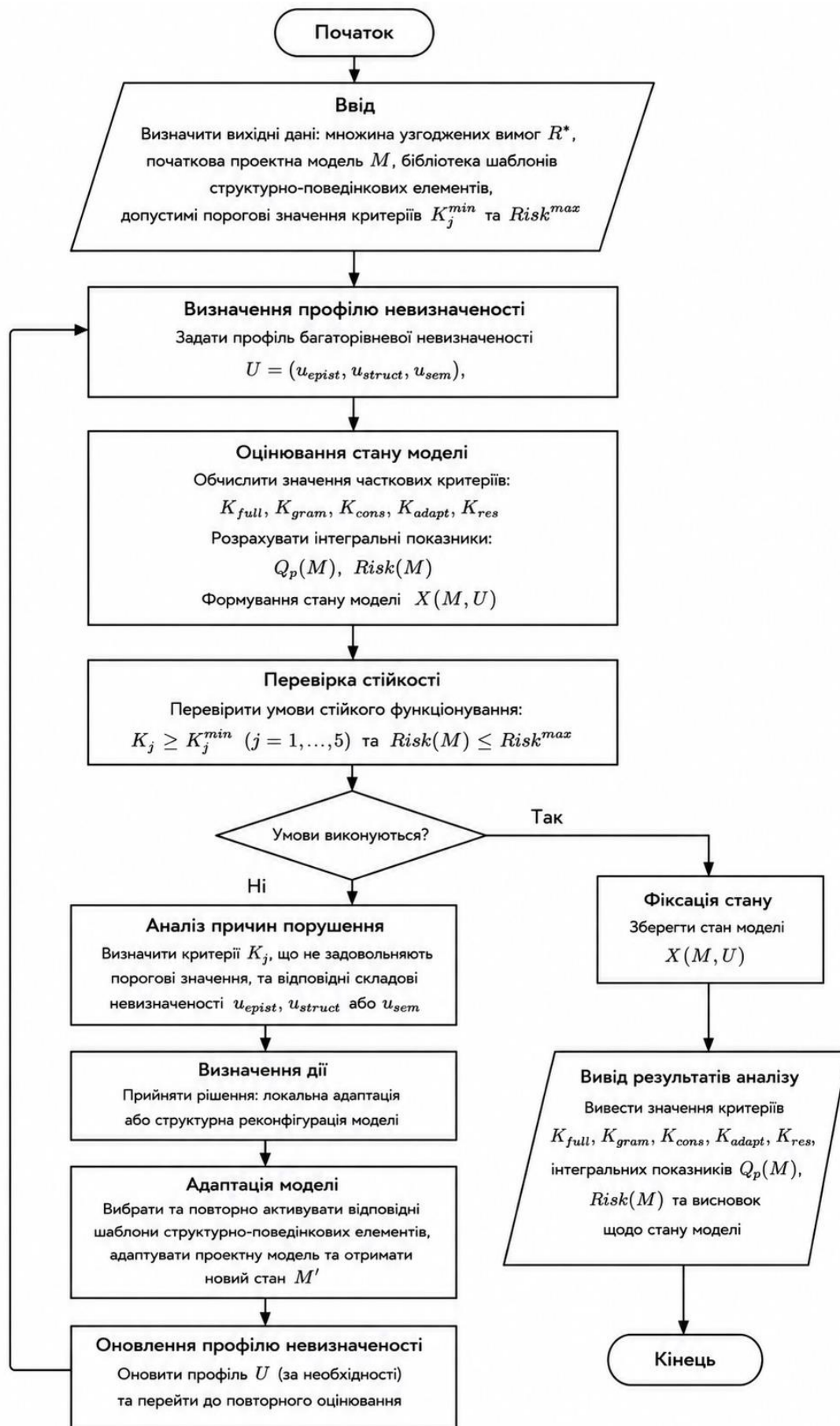


Рис. 1. Алгоритм аналізу поведінки математичної моделі процесу проектування

Джерело: складено автором

Зміна профілю багаторівневої невизначеності може спричиняти переміщення математичної моделі в межах області допустимих станів або її вихід за встановлені межі. У першому випадку змінюються окремі характеристики процесу проектування, проте модель зберігає стійкий стан і не потребує структурної перебудови. У другому випадку порушення допустимого рівня хоча б одного з контрольованих критеріїв або перевищення допустимого рівня інтегрального ризику свідчить про перехід моделі до нестійкого стану.

Важливим при цьому є не лише встановлення факту такого переходу, а й визначення характеристики процесу проектування, яка спричинила вихід за межі стійкої області. Завдяки встановленому взаємозв'язку між складовими багаторівневої невизначеності та частковими критеріями можна простежити джерело зміни стану моделі. Наприклад, зниження структурної узгодженості може бути пов'язане зі збільшенням кількості альтернативних структурних відповідей, тоді як зниження адаптивності характеризує ускладнення локальної перебудови проектною моделі при зміні умов її формування.

Таким чином, межа стійкої поведінки має практичне значення для керування процесом проектування. Наближення значень контрольованих характеристик до встановлених граничних рівнів може розглядатися як ознака необхідності аналізу відповідних фрагментів проектною моделі, а вихід за допустимі межі – як підстава для її адаптації. Це дозволяє перейти від констатації зміни інтегральних показників до визначення конкретних компонентів процесу проектування, для яких необхідне коригування.

Використання шаблонів проектних рішень під час адаптації. Особливістю запропонованого підходу є можливість пов'язати результати аналізу поведінки математичної моделі з механізмом адаптації проектною моделі. Під час її формування можуть використовуватися шаблони проектних рішень, які задають типові структурно-поведінкові фрагменти моделі та правила їх параметризації відповідно до сформованих вимог і поточних умов проектування.

Тому зміна умов проектування не обов'язково потребує повної перебудови сформованої моделі. Якщо результати аналізу свідчать про зниження K_{cons} або K_{adapt} , визначаються структурно-поведінкові фрагменти проектною моделі, для яких змінилися умови формування або використання. Для таких фрагментів здійснюється вибір відповідних шаблонів проектних рішень, їх повторна параметризація та включення до адаптованої моделі.

У загальному вигляді цей процес можна подати як $U_i \rightarrow \Delta K \rightarrow \{\Delta Q_p(M), \Delta \text{Risk}(M)\} \rightarrow P^* \rightarrow M'$, де U_i – зміна відповідної складової багаторівневої невизначеності; ΔK – зміна пов'язаних із нею критеріїв процесу проектування; P^* – множина шаблонів проектних рішень, що потребують вибору або повторної параметризації; M' – адаптований стан проектною моделі.

Отже, аналіз поведінки математичної моделі виконує не лише оцінювальну функцію. Його результати дозволяють визначити необхідність і локалізацію адаптації проектною моделі. Використання шаблонів проектних рішень при цьому дає змогу змінювати окремі структурно-поведінкові фрагменти без повної перебудови сформованої моделі.

Експериментальне дослідження та обговорення результатів. Експериментальне дослідження проведено на двох прикладах проектування інтелектуальних систем, що характеризуються різними проявами багаторівневої невизначеності. Перший експеримент стосувався проектування інтелектуальної системи діагностування аварійних ситуацій у вантажному відсіку літака. Другий експеримент проводився для системи діагностування технічного стану обладнання, особливістю якої є структурна невизначеність, зумовлена альтернативними відповідностями між діагностичними ознаками, вузлами обладнання та можливими дефектами.

Результати оцінювання математичної моделі процесу проектування для обох експериментів наведено в Табл. 2.

Таблиця 2. Результати оцінювання процесу проєктування

Критерій	Експеримент 1	Експеримент 2
K_{full}	1,000	1,000
K_{gram}	1,000	1,000
K_{cons}	0,984	0,918
K_{adapt}	0,870	0,820
K_{res}	0,941	0,885
$Q_p(M)$	0,958	0,925
Risk(M)	0,041	0,075

Джерело: складено автором

Як видно з Табл. 2, в обох експериментах зберігаються максимальні значення K_{full} та K_{gram} , тоді як основні відмінності спостерігаються за K_{cons} , K_{adapt} та K_{res} . Це узгоджується з характером другого експерименту, для якого наявність альтернативних структурних відповідей ускладнює збереження узгодженості проєктної моделі та її адаптацію при зміні умов проєктування.

Для дослідження поведінки математичної моделі при зміні умов структурної невизначеності виконано варіювання пов'язаних із нею критеріїв K_{cons} та K_{adapt} . Вибір саме цих критеріїв обумовлений тим, що вони найбільш безпосередньо реагують на структурні зміни та необхідність адаптації проєктної моделі. Значення критеріїв змінювалися в діапазоні від 0 до 1 з кроком 0,2. Для кожної комбінації K_{cons} та K_{adapt} розраховувалися відповідні значення інтегрального показника якості $Q_p(M)$ та інтегрального ризику Risk(M), а також перевірялося виконання встановлених умов стійкості. Мінімум допустиме значення часткових критеріїв приймалося на рівні 0,80, а максимально допустиме значення інтегрального ризику – 0,10. Отримані залежності $Q_p(M)=f(K_{cons}, K_{adapt})$ наведені на Рис. 2.

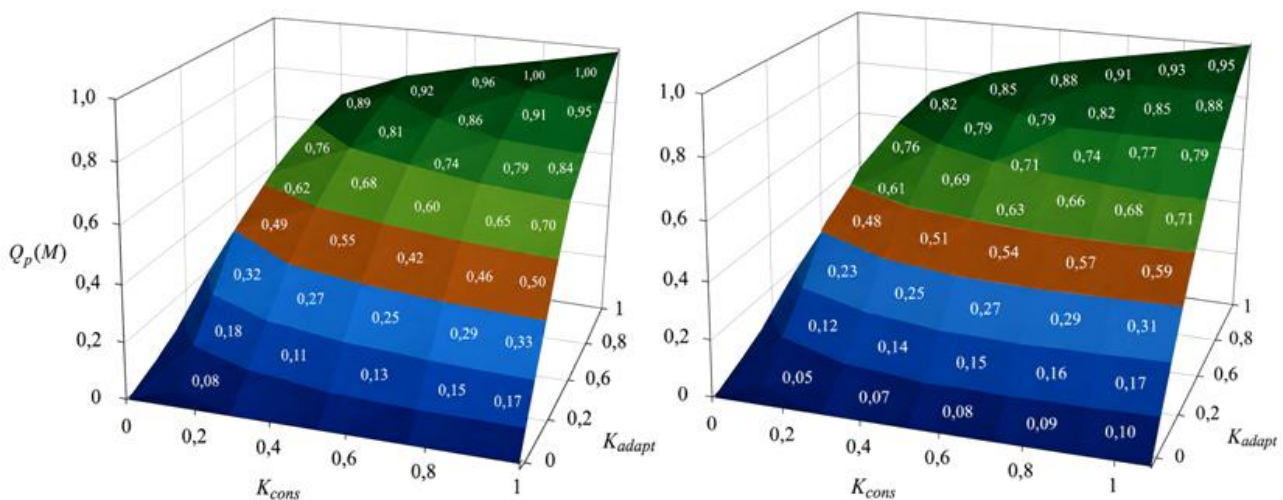


Рис. 2. Вплив структурної узгодженості та адаптивності на якість процесу проєктування

Джерело: складено автором

Для інтерпретації значень інтегрального показника якості процесу проєктування $Q_p(M)$ використано такі діапазони: 0-0,19 – дуже низький рівень якості; 0,20-0,39 – низький рівень якості; 0,40-0,59 – середній рівень якості; 0,60-0,79 – високий рівень якості; 0,80-1,00 – дуже високий рівень якості.

Для фактичних станів обох експериментів установлені умови стійкості виконуються. У першому експерименті найменше значення часткового критерію становить $K_{adapt}=0,870$, а інтегральний ризик – Risk(M)=0,041; у другому – $K_{adapt}=0,820$ та Risk(M)=0,075. Отже, фактичні стани математичних моделей в обох експериментах належать до області стійкої поведінки.

Перевірка умов стійкості для всіх комбінацій варійованих значень K_{cons} і K_{adapt} дала змогу розмежувати області стійкої та нестійкої поведінки математичної моделі та визначити межі збереження її допустимого стану при погіршенні характеристик процесу проєктування.

Отримані залежності демонструють спільну закономірність для обох експериментів: зі збільшенням структурної узгодженості та адаптивності інтегральна якість процесу проєктування зростає, тоді як зниження одного або обох критеріїв приводить до переходу в області нижчої якості. Найвищі значення інтегрального показника формуються за одночасно високих значень обох критеріїв.

Водночас положення та форма поверхонь для двох експериментів відрізняються, оскільки значення інших складових інтегрального показника визначаються фактичними результатами відповідного процесу проєктування. У другому експерименті більш виражена структурна невизначеність зумовлює нижчі значення структурної узгодженості, адаптивності та стійкості, що зміщує інтегральну оцінку якості від 0,958 у першому експерименті до 0,925 у другому.

Порівняння двох поверхонь показує, що запропонований метод відображає не лише загальну закономірність зміни інтегральної якості, а й особливості поведінки математичної моделі за різних умов проєктування. Зміна характеристик, пов'язаних із проявами багаторівневої невизначеності, приводить до зміни положення моделі в області значень інтегральної якості та дає змогу оцінити, наскільки її поточний стан наближається до меж, за яких може виникнути необхідність адаптації.

Результати експериментального дослідження використовуються для визначення поточного стану математичної моделі процесу проєктування відповідно до запропонованого алгоритму. Спільний аналіз інтегральної якості та інтегрального ризику дає змогу встановити, чи зберігає модель допустимі характеристики за поточного профілю багаторівневої невизначеності. У разі виходу відповідних показників за встановлені допустимі межі визначаються критерії, зміна яких спричинила погіршення стану моделі, та відповідні складові невизначеності. Це дозволяє локалізувати необхідні зміни і перейти до адаптації окремих фрагментів проєктної моделі без її повної перебудови.

Висновки. У роботі запропоновано метод аналізу поведінки математичних моделей процесу проєктування інтелектуальних систем в умовах багаторівневої невизначеності, який поєднує оцінювання часткових критеріїв, інтегральної якості та ризику процесу проєктування. Встановлено взаємозв'язок між складовими багаторівневої невизначеності та критеріями оцінювання без введення додаткових вагових коефіцієнтів.

Експериментальне дослідження підтвердило можливість використання методу для оцінювання зміни стану математичної моделі за різних умов проєктування, визначення областей її стійкої та нестійкої поведінки та встановлення необхідності адаптації. Отримані результати створюють основу для локалізації змін і адаптації окремих фрагментів проєктної моделі без її повної перебудови.

Перспективою подальших досліджень є перевірка методу для інших предметних областей та різних профілів багаторівневої невизначеності.

Конфлікт інтересів: Автор є членом редакційної колегії цього журналу. Ця роль не вплинула на процес рецензування або редакційне рішення щодо цього рукопису

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису

Використання засобів штучного інтелекту: Під час підготовки рукопису використовувався інструмент GPT-5.5 штучного інтелекту (ШІ) для граматичної та стилістичної перевірки тексту. Усі фрагменти, опрацьовані за його допомогою, були перевірені й відредаговані автором. ШІ не використовувався для генерації тексту, формул і таблиць, формування наукових положень, отримання результатів або формулювання висновків. Наукові положення, результати та висновки є власним інтелектуальним внеском автора

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Troya, J., Moreno, N., Bertoa, M. F. & Vallecillo, A. “Uncertainty representation in software models: A survey”. *Software and Systems Modeling*. 2021; 20 (4): 1183–1213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-020-00842-1>.
2. Mäkelburg, J., Perez Palacin, D., Mirandola, R. & Acosta, M. “Surveying uncertainty representation: A unified model for cyber physical systems”. *arXiv*. 2025: 1–20, <https://www.scopus.com/pages/publications/105036859436>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.23892>.
3. Burgueño, L., et al. “Dealing with belief uncertainty in domain models”. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2022; 32 (2): 31, <https://www.scopus.com/pages/publications/85153791867>. DOI: <https://doi.org/10.1145/3542947>.
4. Komleva, N. & Antoshchuk, S. “Modeling of diagnostic and decision-making systems based on the combination of fuzzy logic and Dempster–Shafer theory”. *Advanced Computer Information Technologies*. 2025. p. 114–117, <https://www.scopus.com/pages/publications/105019923486>. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185655>.
5. Deantoni, J., et al. “Quantifying and combining uncertainty for improving the behavior of digital twin systems”. *Automatisierungstechnik*. 2025; 73 (2): 81–99, <https://www.scopus.com/pages/publications/85217846985>. DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0036>.
6. Wong, T., Wagner, M. & Treude, C. “Self-adaptive systems: A systematic literature review across categories and domains”. *Information and Software Technology*. 2022; 148: 106934, <https://www.scopus.com/pages/publications/85129943393>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106934>.
7. Franco, J. M., et al. “Improving self-adaptation planning through software architecture-based stochastic modeling”. *Journal of Systems and Software*. 2016; 115: 42–60, <https://www.scopus.com/pages/publications/84960942679>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.01.026>.
8. Angelopoulos, K., Papadopoulos, A. V., Souza, V. E. S. & Mylopoulos, J. “Engineering self-adaptive software systems: From requirements to model predictive control”. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*. 2018; 13 (1): 1–27, <https://www.scopus.com/pages/publications/85064529237>. DOI: <https://doi.org/10.1145/3105748>.
9. Zavala, E., et al. “SACRE: Supporting contextual requirements adaptation in modern self-adaptive systems in the presence of uncertainty at runtime”. *Expert Systems with Applications*. 2018; 98: 166–188, <https://www.scopus.com/pages/publications/85041225552>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.009>.
10. Komleva, N. O. “Model and method for evolutionary control of the decision-making structure in intelligent systems”. *Herald of Advanced Information Technology*. 2026; 9 (2): 181–198, <https://www.scopus.com/pages/publications/105035182291>. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.09.2026.13>.
11. Gerostathopoulos, I., Vogel, T., Weyns, D. & Lago, P. “How do we evaluate self-adaptive software systems? A ten-year perspective of SEAMS”. *Proceedings of the International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS)*. 2021. p. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEAMS51251.2021.00018>.
12. Jongeling, R., Ciccozzi, F., Carlson, J. & Cicchetti, A. “Consistency management in industrial continuous model-based development settings: A reality check”. *Software and Systems Modeling*. 2022; 21 (6): 1511–1530, <https://www.scopus.com/pages/publications/85128275171>. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-022-01000-5>.
13. Torre, D., Labiche, Y., Genero, M. & Elaasar, M. “How consistency is handled in model-driven software engineering and UML: An expert-opinion survey”. *Software Quality Journal*. 2023; 31 (1): 1–54, <https://www.scopus.com/pages/publications/85128744172>. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11219-022-09585-2>.

14. Aregbesola, G. D., Adewumi, A. O. & Akinwale, A. T. “Fuzzy logic model for informed decision-making in risk assessment in design phase of software projects”. *Systems*. 2025; 13 (9): 825, <https://www.scopus.com/pages/publications/105017426167>. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13090825>.

15. Komleva, N. & Liubchenko, V. “Formalized methodology for ensuring consistency and adaptation of requirements in intelligent diagnostic systems”. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2025; 4: 92–104. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-4-9>.

16. Комлева, Н. О. “Модель ризиків у системах діагностування і прийняття рішень в умовах невизначеності”. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2026; 3 (2): 107–114. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.3.11>.

Отримано 14.07.2026

Отримано після перегляду 20.08.2026

Прийнято 28.08.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.25>

UDC 004.94:004.89

Method for analyzing the behavior of mathematical models of the intelligent systems design process under conditions of multilevel uncertainty

Nataliia O. Komleva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9627-8530>; komleva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57191858904
Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article proposes a method for analyzing the behavior of mathematical models of the design process of intelligent systems under conditions of multilevel uncertainty. The method is intended for quantitative assessment of changes in the characteristics of the design process under the influence of epistemic, structural and semantic components of uncertainty. To describe the state of the mathematical model, a system of partial criteria was used that characterize the completeness of the requirements reflection, the correctness of the grammatical-mathematical transformation, structural consistency, adaptability and resilience of the design process. Partial criteria are combined with an integral quality indicator and an integral risk indicator, which allows for a comprehensive assessment of the behavior of the mathematical model under changes in design conditions. The relationship between the components of multilevel uncertainty and the criteria for evaluating the design process is established, which allows determining the nature of their direct and indirect impact. An experimental study was conducted for two intelligent systems with different manifestations of uncertainty. Based on the variation of structural coherence and adaptability, the change in the integral quality of the design process was investigated and the areas of stable behavior of the mathematical model were determined. The results obtained confirm the possibility of using the proposed method for a comprehensive assessment of the behavior of mathematical models of the design process and determining the need for their adaptation under changing uncertainty conditions.

Keywords: Intelligent systems; design process; mathematical model; multilevel uncertainty; behavior analysis; structural consistency; adaptability; resilience, integral quality indicator; risk

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА



Комлева Наталія Олегівна - кандидат технічних наук, завідувач кафедри Інженерії програмного забезпечення. Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

Галузь досліджень: аналіз даних, програмна інженерія, розподілені обчислення

Nataliia O. Komleva - PhD, Associate Professor, Head of Department of System Software. Odesa Polytechnic National University, Odesa, 65044, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9627-8530>; komleva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57191858904

Research field: Data Analysis, Software Engineering, Distributed Computing