Центральний науково-дослідний інститут
Збройних Сил України
Military Science. Vol. 2 No. 1 (2024)

DOI: 10.62524/msj.2024.2.1.12

Комплексне моделювання складних процесів: адаптація параметрів аналітичних моделей при вирішенні кваліметричних задач

Олександр Машкін
Olexander Mashkin
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного відділу
Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України
03049, 28Б Повітрофлотський пр-т, Київ, Україна
e-mail: alexlen@meta.ua
ORCID: 0000-0002-3094-9984

Світлана Масленко
Svitlana Maslenko
старший науковий співробітник науково-дослідного відділу
Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України
03049, 28Б Повітрофлотський пр-т, Київ, Україна
e-mail: Sveta0213@i.ua
ORCID: 0000-0002-9673-3844

Анотація (Abstract). Актуальність дослідження обумовлена тим, що незважаючи на сталий розвиток методів та технології створення моделей різних класів і призначення, задачі управління їх якістю (так звані зворотні задачі теоретичної кваліметрії) достатньо часто залишаються за межами уваги. Так, в галузі інформаційних технологій значно більша увага приділена оцінці якості програмної продукції, що знайшло своє відображення у відповідних стандартах. Особливої актуальності згадані задачі набувають у випадку, коли моделі відображають складний процес (СП), при цьому такі процеси можуть бути унікальними, отримання повних об'єктивних даних відносно таких СП до моделювання утруднено або взагалі неможливо (моделі аварій та катастроф, бойових дій, природних катаклізмів та інших подібних). Основною метою статті вважається розгляд питань вирішення зворотної кваліметричної задачі шляхом параметричної адаптації аналітичних моделей до непередбачуваних ймовірних змін у характері перебігу складних процесів. Вирішення поставленої задачі засновано на комбінованому (аналітико-імітаційному) моделюванні унікальних процесів. Теоретична кваліметрія передбачає кількісну оцінку якісних властивостей будь-якої продукції, рівень забезпечення адекватності аналітичних моделей (за результатами їх параметричної адаптації) передбачається оцінювати з використанням відомих у метрології положень щодо відносних відхилень вимірювань. При цьому в якості еталонних при комбінованому моделюванні приймаються результати детального імітаційного моделювання. Складність процесів обумовлює доцільність їх полімодельного опису з метою взаємної компенсації об'єктивних недоліків різнорідних моделей, а також використання можливостей імітаційного моделювання для коригування параметрів аналітичних моделей у випадках, коли використання останніх обумовлене жорсткими часовими обмеженнями на отримання результатів розрахунків і вироблення на їх основі керуючих впливів. Наведений варіант формалізованої постановки задачі параметричної адаптації аналітичних моделей. Представлений приклад, у якому розглядається адаптація параметрів аналітичної моделі

ланчестерського типу, проведена за даними імітаційного моделювання. Адаптація параметрів може бути здійснена у різні способи, доцільність вибору певного з них обумовлюється оцінкою взаємних відхилень результатів різнорідного моделювання. Результати розрахунків свідчать, що параметрична адаптація може бути дієвим елементом вирішення однієї з ключових задач кваліметрії моделей, а саме забезпечення їх необхідних якісних властивостей. Перспективою подальших досліджень представляється розгляд питань структурної адаптації імітаційних моделей до заданих умов відображення складних процесів.

Ключові слова (Keywords): імітаційне та аналітичне моделювання; кваліметрія моделей; моделі ланчестерського типу; параметрична адаптація моделей.

Вступ (Introduction)

У сучасному світі використовують велику кількість способів і методів кількісного вимірювання і оцінки якості різноманітних видів продукції. Наука, яка вивчає і поєднує ці способи та методи, систематизує і розвиває їх, називається кваліметрією (від латинського слова qualitas – якість, властивість і давньогрецького metreon – міряти, вимірювати). Кваліметрія – наукова дисципліна, в рамках якої вивчаються методологія і проблематика комплексної, кількісної оцінки якості об'єктів (Куць, Столярчук, Друзюк, 2012), (Циба, 1997), (Боженко, 2003). Е. Геворкян (2022) дав таке визначення: кваліметрія – наукова галузь, яка вивчає і розробляє принципи та методи кількісної оцінки якості; встановлює кількісні закономірності формування різних показників якості продукції у галузях проектування, виготовлення та експлуатації; розкриває об'єктивні зв'язки між затратами на створення продуктів або виробів і корисним ефектом, який досягають внаслідок цих затрат. Термін «кваліметрія» лаконічно і точно передає зміст поняття "вимірювання якості" (Шаповал, 2002). У кваліметрії оперують двома основними поняттями – вимірювання і оцінка. Під вимірюванням розуміють знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Оцінювання в кваліметрії використовують як диференційне (одиничне), так і комплексне, залежно від потреби.

Теоретична кваліметрія передбачає розрізнення прямих та зворотних задач, під якими розуміються відповідно задачі безпосереднього оцінювання якісних властивостей (прямі) та задачі управління якістю з метою забезпечення необхідних властивостей продукції будь-якого призначення (зворотні). Структура комплексного оцінювання якості імітаційних моделей наведена у статті Б. Бутвіна, М. Машкіна, О. Соболєва та ін. (2022). Оскільки самі моделі створюються як з метою аналізу вже існуючих об'єктів-оригіналів, так і з метою їх синтезу, в кваліметрії моделей основну роль відіграють саме зворотні задачі. За справедливим твердженням авторів Б. Соколова, Р. Юсупова (2004), Б. Соколова, Р. Юсупова, С. Міконі (2014, 2018), незважаючи на сталий розвиток методів та технології створення моделей різних класів і призначення, такі задачі достатньо часто залишаються за межами уваги. Особливої актуальності згадані задачі набувають у випадку, коли моделі відображають складний (унікальний) процес (СП), отримання повних об'єктивних даних відносно таких СП до моделювання утруднено або взагалі неможливо. Характерним проявом складності процесу з кібернетичної точки зору авторами С. Міконі, Б. Соколовим, Р. Юсуповим, (2018), М. Мойсеєвим (1981) пропонується вважати необхідність його полімодельного опису, залучення різнорідних моделей, що спираються на різну методичну базу. Використання об'єднаних у комплекс різнорідних моделей дозволить не тільки підвищити обґрунтованість припущень про ймовірний характер перебігу СП, а й надасть додаткові можливості для вирішення зворотних задач кваліметрії моделей. Серед двох основних видів моделювання –

аналітичного та імітаційного, імітаційні моделі (ІМ) володіють значно ширшими можливостями щодо відображення ключових факторів складних випадкових процесів. При цьому, незважаючи на стрімкий розвиток технологій розподілених обчислень, ІМ залишаються основними споживачами процесорного часу. Аналітичні моделі (АМ) забезпечують на порядок вищу оперативність у проведенні розрахунків, однак поступаються ІМ у адекватності відображення СП. В умовах, коли оперативність розрахунків є пріоритетною вимогою до моделювання, параметрична адаптація АМ (підстроювання, коригування параметрів до змінних умов моделювання СП) є дієвим способом підвищення адекватності моделей з одночасним збереженням оперативності розрахунків. Вирішення подібним чином зворотної кваліметричної задачі є актуальним практичним завданням, що й обумовило вибір теми статті.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для уникнення термінологічних розбіжностей в якості визначення поняття адекватності моделі приймається наступне (Мойсеєв, 1981), (Ахрем, 2007), (Румянцев, 2010): це здатність моделі до урахування найбільш значущих факторів, що впливають на перебіг СП. Сутність ІМ передбачає доцільність відображення всіх етапів модельованого процесу зі збереженням логічної послідовності їх перебігу у часі, а урахування випадкових важкоформалізуємих факторів здійснювати з використанням псевдовипадкових величин з відповідними законами їх розподілу. Поряд з можливістю використання у ІМ практично всього арсеналу методів аналітичного моделювання, це забезпечує достатню деталізацію опису СП і потенційно високу адекватність таких моделей (звісно, вони повинні пройти всі перевірочні етапи). За відсутності реальних даних відносно перебігу СП результати імітаційного моделювання можуть слугувати в якості опорних, еталонних по відношенню до АМ. У такому разі, при комплексному використанні АМ та ІМ можливий варіант задачі параметричної адаптації АМ представляється наступним чином.

Розглядається полімодельний комплекс (ПмК), призначений для прогнозування ймовірних варіантів перебігу СП та вироблення на основі результатів розрахунків керуючих впливів (КВ). До складу ПмК включена еталонна імітаційна модель (IM_e) та множина аналітичних моделей $\{AM_a\}$, $a = \overline{1,A}$ зі спрощеним описом процесу, які забезпечують необхідну оперативність моделювання і отримання усієї сукупності потрібних для вироблення КВ розрахункових показників ($\bar{Y}$). При необхідності вироблення КВ як реакції на зміни у перебігу СП, на час отримання показників $\bar{Y}$ накладаються часові обмеження. Такі обмеження обумовлюють можливість використання IM_e лише на етапі попередніх прогнозних розрахунків ймовірних варіантів розвитку СП, з його початком та при необхідності реакції на зміни у його ході використовуються можливості виключно множини $\{AM_a\}$ комплексу. З метою забезпечення адаптації АМ до змін в умовах моделювання СП необхідно:

1) визначити відносно усієї сукупності l-их параметрів $\bar{P}_l^{(a)}$ кожної a-ої аналітичної моделі ПмК доцільний порядок їх узгодження з аналогічними параметрами, отриманими шляхом імітаційного моделювання ($\bar{P}_l^{(e)}$). Використання узгоджених параметрів у АМ повинно мінімізувати поточне відхилення (абсолютне або відносне, ΔY) між результатами аналітичного та імітаційного моделювання, при цьому таке відхилення не може перевищувати деякого встановленого граничного значення (ΔY_D):

$$\Delta Y_{min}\left[AM_a\left(\bar{P}_l^{(a)}\right); IM_e\left(\bar{P}_l^{(e)}\right)\right] \le \Delta Y_D; \quad (1)$$

$$\overline{P_h}^{(a,e)} = \left\{P_1^{(a)}, \dots, P_l^{(a)};\ P_1^{(e)}, \dots, P_l^{(e)}\right\},\ \ l = \overline{1, L}.$$

2) чисельно оцінити можливість забезпечення адекватності АМ до змін умов перебігу модельованого СП за рахунок узгодження параметрів аналітичних моделей з параметрами еталонної ІМ.

За результатами необхідної кількості прогонів IM_e, параметри ($\overline{P}_l^{(e)}$) будуть отримані у вигляді статистичних даних. Кориговані параметри ($\overline{P}_l^{(a)}$) можуть бути представлені у формі оцінок математичних сподівань (за результатами обробки статистичних даних) та як змінні величини. У залежності від класу включених до складу ПмК аналітичних моделей використання отриманих розподілів надає можливість використовувати їх з метою уточнених параметрів АМ у різні способи. Для наочності припустимо, що аналітичний розрахунок показників ($\bar{Y}$) здійснюється за допомогою систем диференціальних рівнянь. У такому разі в якості сукупності параметрів ($\overline{P}_l^{(a)}$) виступатимуть коефіцієнти при змінних та вільні члени рівнянь. Пояснення щодо порядку уточнення параметрів АМ можна продемонструвати на наступному прикладі.

Нехай за допомогою ПмК проводиться моделювання ходу та результатів бойових дій, одними з необхідних показників сукупності ($\bar{Y}$) є чисельності протиборчих угруповань на визначені моменти часу, які аналітичним шляхом визначаються за допомогою модифікацій аналітичних ланчестерських моделей (Фурсенко, Черновол, 2020). Припустимо також, що за умовами завдань така АМ повинна ураховувати відновлення чисельності сторін (замість втрачених) і має вид наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (-c - b)y + d[x(0) - x]; \\ \frac{dy}{dt} = (-g - f)x + h[y(0) - y], \end{cases} \qquad (2)$$

де x, y – чисельності угруповань протиборчих сторін у момент часу $t \geq 0$;
$x(0)$, $y(0)$ – початкові умови чисельності угруповань на момент початку дій (t =0);
c, g, b, f – інтенсивності втрат сторін через вплив різних типів озброєння;
d, h – інтенсивності відновлення чисельності сторін.

Незважаючи на унікальність кожної реалізації планів на бойові дії, загальні тенденції розвитку такого СП, виходячи, зокрема, з раніше отриманого досвіду для аналогічних умов, є орієнтовно відомими. Тобто, відомими також є деякі усереднені значення параметрів АМ, припускаючи, наприклад, що параметри c, g та b, f характеризують втрати від дії площинних та точкових засобів ураження відповідно. Варіант таких параметрів може приймати наступні значення, табл. 1:

Таблиця 1. Варіант усереднених (за результатами АМ) значень параметрів $\overline{P}_l^{(a)}$ системи рівнянь (2)

сторона ***x***	***c***	***b***	***d***
	0,0087	0,0121	0,0179
сторона ***y***	***g***	***f***	***h***
	0,0107	0,0058	0,0264

Для конкретизованих умов бойових дій та з метою параметричної адаптації АМ виду (2) за результатами імітаційного моделювання отримані розподіли вказаних параметрів та значення шуканого показника СП (у даному випадку це чисельність протиборчих сторін x_{IM_e} та y_{IM_e} на певний момент часу бойових дій). У відповідності до поставленої задачі необхідно мінімізувати розбіжність між показниками СП, отриманими аналітичним та імітаційним шляхом, з одночасним додержанням умови $\Delta Y \leq \Delta Y_D$. Можна вважати, що для розглядуваного типу моделей межі припустимого відхилення складають близько 15 % ($\Delta Y_D \approx 15\,\%$). Відхилення, тобто ΔY, може бути оцінено за відомим виразом для встановлення відносної похибки обчислень (щодо визначених показників):

$$\delta_x^* = \frac{|x_{IM_e} - x_{AM}^*|}{x_{IM_e}} \cdot 100; \quad \delta_y^* = \frac{|y_{IM_e} - y_{AM}^*|}{y_{IM_e}} \cdot 100, \tag{3}$$

де x_{AM}^*, y_{AM}^* – чисельності угруповань протиборчих сторін у визначений момент часу, встановлені за результатами аналітичного моделювання з коригованими параметрами; аналогічним чином визначаються відхилення для АМ з усередненими параметрами (означаються $\delta_{x,y}$ відповідно).

Власне, вираз (3) й може служити для чисельної оцінки рівня адекватності аналітичного моделювання імітаційному при комплексному моделюванні СП.

Вибір форми параметрів, що можуть бути використані в якості коригованих у АМ ($\overline{P_l}^{(a)}$), обумовлюється виглядом отриманих статистичних розподілів та результатами оцінки відносних відхилень $\delta_{x,y}$. У розглядуваному випадку в якості уточнених параметрів використовуються оцінки математичних сподівань (МСП) отриманих даних ($\widetilde{m}[\, x_{IM_e};\, y_{IM_e}]$), тобто модель (2) буде являти собою систему лінійних неоднорідних рівнянь. Припустимо, що за результатами імітації конкретизованих умов СП були отримані наступні оцінки МСП статистичних даних параметрів системи (2), табл. 2:

Таблиця 2. Варіант уточнених (за результатами ІМ) значень параметрів $\overline{P_l}^{(e)}$ системи рівнянь (2)

сторона ***x***	***c***	***b***	***D***
	0,0141	0,0152	0,0302
сторона ***y***	***g***	***f***	***H***
	0,0137	0,0078	0,0264

Для визначеності припустимо що аналіз дій проводиться на інтервалі часу до t = 5 (діб) з довільно взятими початковими умовами $x(0)$ = 30000; $y(0)$ = 25000. Значення показників, отриманих за IM_e, складають: $\widetilde{m}[\, x_{IM_e}(5)] = 23173$; $\widetilde{m}[y_{IM_e}(5)] = 19051$. Порівняльні оцінки результатів чисельного інтегрування системи (2) для визначених початкових умов представлені на рис. 1. Є також зрозумілим, що зміна (коригування) параметрів такого виду АМ обумовлює необхідність оцінки стійкості (у сенсі Ляпунова) отримуваних рішень. Для параметрів табл. 2 та системи виду (2) визначник представляється як:

$$\begin{bmatrix} -0{,}0302 - k & -0{,}0293 \\ -0{,}0215 & -0{,}0264 - k \end{bmatrix}, \tag{4}$$

відповідно, характеристичне рівняння:

$$k^2 + 0{,}0566k + 0{,}000167 = 0, \quad (5)$$

корені: $k_1 = -0{,}0031,\ k_2 = -0{,}0535.$

Вид коренів відповідає умовами існування стійких рішень.

Оцінка встановленого обмеження, проведена у відповідності до (2), дозволяє стверджувати, що використання уточнених параметрів забезпечує зменшення відхилення результатів імітаційного та аналітичного моделювання до припустимої різниці, з δ_x=19,23 % та δ_y=19,56 % до δ_x^*=15,68 % та δ_y^*=16,27 %, див. рис. 1.

Фізична сутність СП та результати імітації вказують на необхідність урахування впливу множини випадкових чинників, відображення деяких факторів СП можливе у вигляді АМ як систем стохастичних диференціальних рівнянь (СДР) (Debrabant, Roessler, 2008), (Клоден, 1992). Так, для розглядуваного умовного варіанту статистичні ряди параметрів (у вигляді гістограм) представлені на рис. 2. Приклад імітації, приведений, припустимо, для параметрів *b* та *d*, отриманий за результатами 40 незалежних прогонів IM_e та згрупований у 10 розрядах їх значень (I_i).

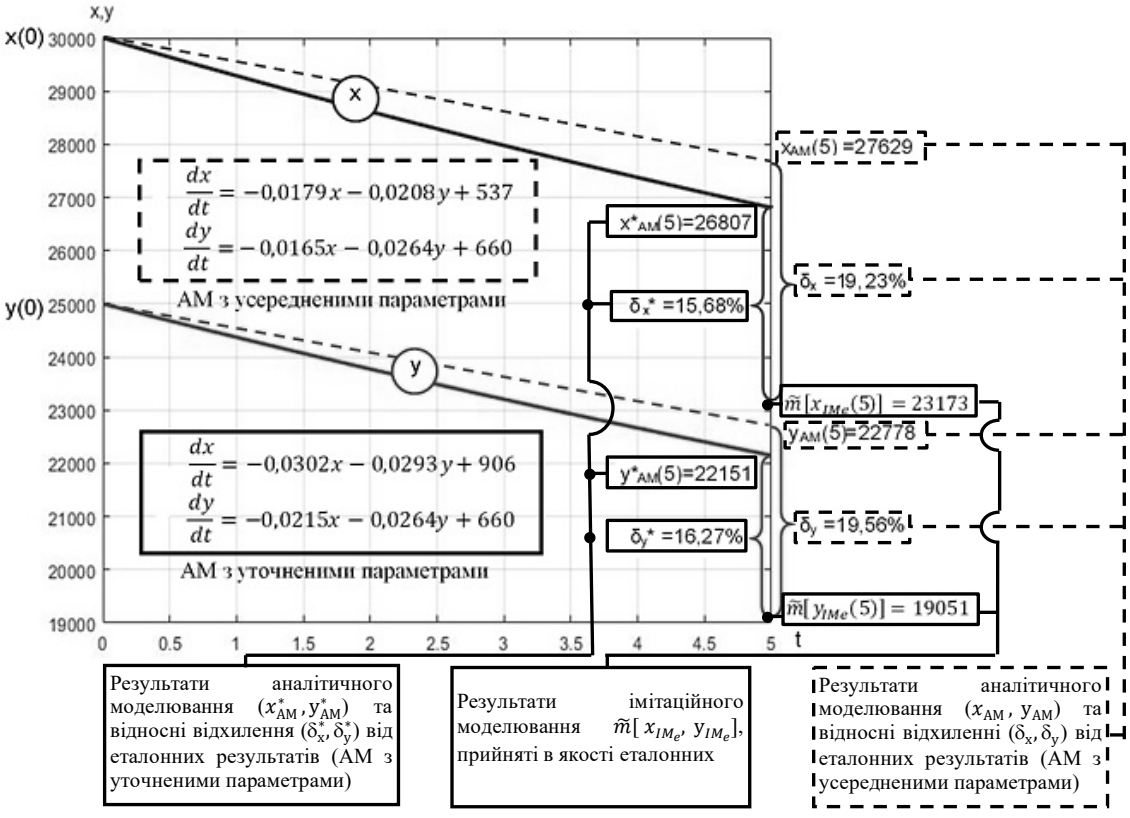
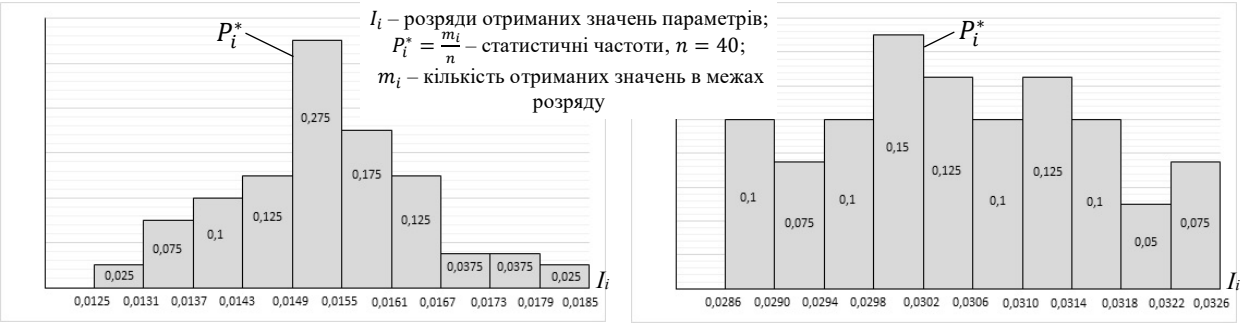


Рисунок 1. Порівняння результатів імітаційного та аналітичного моделювання; вирішення системи (2) для визначених початкових умов з параметрами табл. 1 та табл. 2



а) б)

Рисунок 2. Гістограми статистичних рядів параметрів системи (2):
а) параметру b; б) параметру d

Вигляд гістограм статистичних рядів свідчить, що отримані величини параметру b групуються навколо статистичного середнього, у той час як величини параметру d мають виражений характер малих флуктуацій на всьому інтервалі їх можливих значень. За умови, що подібний характер носитимуть і інші тотожні параметри системи (2) таку модель можна представити у вигляді системи стохастичних диференціальних рівнянь (СДР) (Байрам, Партал, Бююкоз, 2018), (Аллен, 2007), (Wang, 2016) з мультиплікативним вінерівським шумом. У такому випадку, з урахуванням даних табл. 2, система СДР представляється як:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -0{,}0293y + 0{,}0302[x(0) - x]dw; \\ \frac{dy}{dt} = -0{,}0215x + 0{,}0264[y(0) - y]dw, \end{cases} \quad (6)$$

де dw – випадковий вінерівський процес, що реалізується як: $dw = \varepsilon\sqrt{dt}$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n), \varepsilon_i \sim N(0,1)$ – нормальний розподіл з нульовим середнім та одиничною дисперсією.

Використання з метою розв'язання системи (6) спеціалізованих методів чисельного інтегрування СДР (Лукшин, Смирнов, 1990), (Аверина, Артемьєв, 2005), (Точіно, Арданує, 2002) дозволяє отримувати результати у вигляді як наближених сильних, так і наближених слабких рішень. Слабкі рішення використовуються для знаходження розподілів ймовірностей шуканих величин, при цьому окремі реалізації не мають вирішального значення. У контексті задачі адаптації параметрів АМ (на основі імітаційних розрахунків) отримані розподіли ймовірностей за слабкими рішеннями представляють більший інтерес. Результати чисельного вирішення системи (6) методом Мільштейна (у слабкому сенсі) представлені на рис. 3.

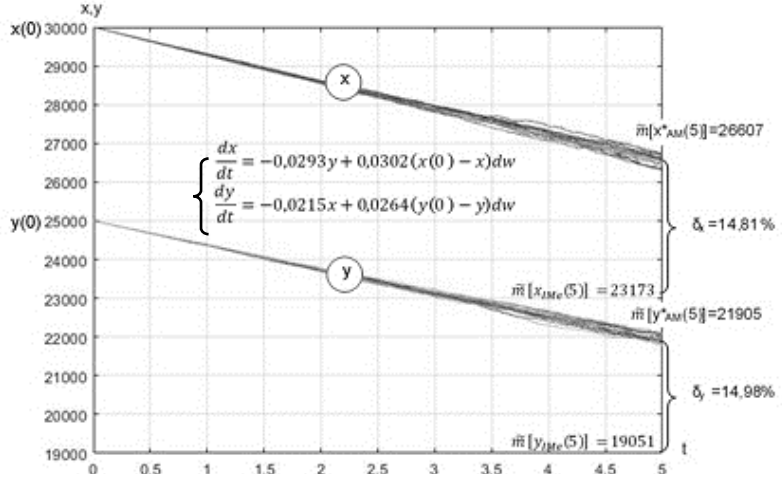


Рисунок 3. Результати вирішення системи (2) для визначених початкових умов методом Мільштейна (фрагмент для 20 траєкторій)

Оцінка стійкості рішення, як й у випадку звичайних диференціальних рівнянь, є важливою якісною характеристикою моделі (6), але у випадку використання СДР поняття стійкості має дещо ширше трактування, зокрема й пов'язане з методами вирішення таких рівнянь (Лукшин, Смирнов, 1990), (Аверина, Артемьєв, 2005), (Карлетті, Берраж, 2004). Приймаючи до уваги викладене у А. Лукшина, С. Смирнова (1990), Х. Мао (2007) та Т. Аверина, С. Артемьєва (2005), а також підтверджену стійкість детермінованої базової системи (рис. 2), результати вирішення (6) вважаються стійкими. Для їх виду, показаного на рис. 3, відносні відхилення обраних показників (δ_x та δ_y), розраховані за МСП розподілів для 10000 реалізацій системи (6), складають: $\delta_x = 14{,}81$ %; $\delta_y = 14{,}98$ %. Тобто, умова $\Delta Y \leq \Delta Y_D$ в даному випадку додержується, що свідчить про забезпечення задовільного рівня адекватності АМ.

Результати (Result)

Приведений нескладний приклад свідчить про необхідність обґрунтованого вибору форми застосування уточнених параметрів, як результат аналізу всіх даних імітаційного моделювання СП. Аналогічним чином уточнюється форма параметрів у разі суттєво нестаціонарного процесу (О. Машкін, 2020), тобто приклад АМ виду (2) відображатиме процес вже як система лінійних нестаціонарних рівнянь (або комбіновано, як система нестаціонарних СДР). Якщо обґрунтоване використання встановлених форм уточнених параметрів не забезпечує виконання умови $\Delta Y \leq \Delta Y_D$, це свідчитиме про необхідність коригування вже виду або класу самої АМ, а не тільки її параметрів. Отже, лише при досягненні збіжності (у певних межах) результатів детального імітаційного та аналітичного моделювання унікальних СП може йти мова про можливість вироблення КВ за результатами аналітичних розрахунків.

Також, практичними розрахунками підтверджено, що збільшення кількості імітаційних прогонів (з подальшим уточненням параметрів АМ розглянутим чином) також сприяє забезпеченню узгодженості результатів різнорідного моделювання, та, відповідно, підвищенню адекватності АМ.

Обговорення (Discussions)

Параметрична та структурна адаптація моделей розглядаються у тематичних публікаціях (зокрема С. Міконі, Б. Соколов, Р. Юсупов (2018), Б. Соколов, Р. Юсупов (2004), М. Мойсеєв (1981)) як доцільні напрямки забезпечення необхідних якісних властивостей моделей. Проте, рекомендації у вказаних джерелах носять, здебільшого, загальнотеоретичний характер й обмежуються моделями реально існуючих об'єктів-оригіналів. Крім цього, певних складнощів у вирішенні згаданої задачі додає відсутність усталеної термінологічної бази у розглядуваній галузі. Розбіжності у розумінні поняття адекватності моделі, різні думки стосовно принципової можливості та методів кількісної оцінки адекватності моделей унікальних СП не сприяють однозначному встановленню такої якісної характеристики з кваліметричних позицій. За слушним зауваженням авторів С. Міконі, Б. Соколова, Р. Юсупова (2018) узагальнення результатів прикладних досліджень у розглядуваній галузі повинно стати тим

підґрунтям, яке сприятиме подальшому розвитку такого перспективного науково-практичного напрямку.

Висновок (Conclusion)

Вирішення зворотної кваліметричної задачі при комбінованому відображенні унікальних СП за рахунок параметричної адаптації АМ потребуватиме, у першу чергу, формування ПмК у складі узгоджених аналітичних та імітаційних моделей СП, у якому щонайменше одна (або єдина) імітаційна модель повинна слугувати для отримання еталонних результатів. При цьому доцільний порядок дій щодо адаптації параметрів АМ представляється наступною послідовністю:

– визначення найбільш важливих параметрів аналітичних моделей, які потребують уточнення імітаційним шляхом;

– визначення розподілів параметрів за прогонами еталонної ІМ для найбільш передбачуваних варіантів перебігу СП;

– використання уточнених імітаційним шляхом параметрів у аналітичних моделях у формі, яка обумовлюється аналізом результатів імітаційного моделювання (виглядом сукупності статистичних даних), класом використовуваних аналітичних моделей та особливостями їх програмної реалізації;

– оцінювання взаємного відхилення результатів аналітичного та імітаційного моделювання, коригування (комбінування), за необхідності, форм застосовуваних уточнених параметрів. У разі неможливості дотримання вимоги щодо узгодженості результатів різнорідного моделювання уточнення потребуватиме вже сам вид використовуваних аналітичних моделей.

Тобто, параметричну адаптацію аналітичних моделей можна вважати дієвим елементом вирішення однієї з ключових задач кваліметрії моделей, а саме забезпечення їх необхідних якісних властивостей при комплексному застосуванні різнорідних моделей складних процесів.

Перспективою подальших досліджень представляється розгляд питань структурної адаптації ІМ для визначення необхідних даних з метою параметричної адаптації АМ.

Посилання

1. Аверина Т. А., Артемьев С. С. (2005). Численное решение стохастических дифференциальных уравнений с растущей дисперсией // *Сиб. журн. вычисл. матем.* Новосибирск: Сиб. отд. РАН и ИВМиМГ, Т. 8, № 1. С. 1–10.
2. Аллен Е. (2007). Моделювання за допомогою стохастичних диференціальних рівнянь Ito. *Математичне моделювання: теорія та застосування.* Вип. 22.
3. Ахрем А. А. (2007). Математические методы анализа адекватности моделей сложных технических объектов // *Труды ИСА РАН*. Т. 29. С. 245-264.
4. Байрам Мустафа, Партал Тугцем, Бююкоз Гюльсен Орукова. (2018). Чисельні методи моделювання стохастичних диференціальних рівнянь.
5. Боженко Л. І.; ред. Крючкевич Л. І.(2003). Стандартизація, метрологія та кваліметрія у машинобудуванні: [навч. посіб. для ВНЗ]. Львів: Світ. 328 с.
6. Butvin B.I., Mashkin O.O., Sobolev O.M., Mykhalevych V.E., Open'ko P.V., Maslenko S.V. (2022). Parametric Adaptation as an Element of Mathematical Models Qualimetry of Complex Processes // *Advances in Military Technology*, Volume 17, No. 2. P. 427 – 437.
7. Геворкян Е. С. (2022). Основи кваліметрії: Конспект лекцій. Харків: УкрДУЗТ, 2022. 84 с.

8. Карлетті М., Берраж К. (2004). Чисельне моделювання стохастичних звичайних диференційних рівнянь у біоматематичному моделюванні. Математика обчис. Симул. Т.64(2). С. 271-277.
9. Клоден Пітер Е., Платен Екхард. (1992). Застосування стохастичних диференціальних рівнянь. Кн. серія: Applications of Mathematics (SMAP). Т.23. С.253–275.
10. Куць В. Р., Столярчук П. Г., Друзюк В. М. (2012). Кваліметрія // Навч. посіб. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів: Вид-во Львів. політехніки. 256 с.
11. Лукшин А. В., Смирнов С. Н. (1990). Численные методы решения стохастических дифференциальных уравнений // *Матем. моделирование*: журн. Москва: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. Т. 2, № 11. С. 108–121.
12. Mao X. (2007). Stochastic Differential Equations and Applicatios. 2nd edition. Elsevier, 9, 12, 13, 17.
13. Машкін О. О. (2020). Особливості чисельного вирішення диференційних рівнянь моделей ланчестерського типу у стохастичній постановці // «*Системи обробки інформації*»: наук.-техн. журн.: ХНУПС ім. І. Кожедуба. Харків. № 1(160). С. 67–72.
14. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. (2018). Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: моногр. Москва: РАН. 314 с.
15. Моисеев Н.Н. (1981). Математические задачи системного анализа. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 488 с.
16. Румянцев М. И. (2010). К вопросу оценки адекватности имитационных моделей банковских бизнес-процессов. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании*: сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф. (Одесса, 19 нояб. 2010 г.). Одесса: Черноморье. Т. 15. – С. 84–93.
17. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. (2004). Концептуальные и методические основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Труды СПИИРАН. 2004. Вып. 2, т. 1. С. 10–35.
18. Соколов Б. В., Юсупов Р. М., Микони С. В. (2014). Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: состояние исследований и перспективы развития. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор». С. 44–53.
19. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. (2004). Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления. Москва. № 6. С. 5–16.
20. Точіно А., Арданує Р. (2002). Методи Рунге-Кутта для чисельного розв'язування стохастичних диференціальних рівнянь. Журнал. *Обчисл. математика*, 138(2). С. 219-241.
21. Фурсенко О. К., Черновол Н. М. (2020). Ланчестерські моделі бойових дій. *Зб. наук. праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. №4(66). С.85–91.
22. Циба В. Т. (1997). Основи теорії кваліметрії // Навч. посіб. Київ: Інститут змісту і методів навчання МО України. 160 с.
23. Шаповал М. І. (2002). Менеджмент якості: підручник. Київ: Знання.
24. Debrabant, K. and A. Roessler. (2008). Classification of Stochastic Runge–Kutta Methods for the Weak Approximation of Stochastic Differential Equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 77(4), pp. 408-420.
25. Wang, Liguo. (2016). Numerical Solutions of Stochastic Differential Equations. PhD diss., University of Tennessee. https://trace.tennessee.edu/utk.graddiss/3974.

References

1. Averina, T. A., Artemev, S. S. (2005). Numerical solution of stochastic differential equations with increasing dispersion (in russian) // Siberian Journal of Computational Mathematics. Novosibirsk: Siberian Dept. RAS and IVMiMG, Vol. 8, No. 1. P. 1-10.
2. Allen E. (2007). Modeling with stochastic Ito differential equations. Mathematical modeling: theory and application. Issue 22.
3. Ahrem A. A. (2007). Mathematical methods for analyzing the adequacy of complex technical objects' models. *Proceedings of the ISA RAS*. T. 29. P. 245-264.
4. Bayram Mustafa, Partal Tugcem, Buyukoz Gülsen Orukova (2018). Numerical methods for modeling stochastic differential equations.
5. Bozhenko, L. I.; ed. Kryuchkevich, L. I. (2003). Standardization, metrology and qualimetry in mechanical engineering: [textbook for universities]. Lviv: Svit. 328 p.Butvin, B. I., Mashkin, O. O., Sobolev, O. M., Mykhalevych, V. E., Open'ko, P. V., Maslenko, S. V. (2022). Parametric Adaptation as an Element of Mathematical Models Qualimetry of Complex Processes. *Advances in Military Technology*, Vol. 17, No. 2. P. 427-437.
6. Gevorgyan, E. S. (2022). Fundamentals of qualimetry: Lecture notes. Kharkiv: UkrDUZT, 84 p.
7. Carletti, M., Berraj, K. (2004). Numerical modeling of stochastic ordinary differential equations in biomathematical modeling. *Math. comput. simul*. T.64(2). P. 271-277.
8. Cloden, Peter E. and Platten, Eckhard (1992). Applications of stochastic differential equations. In: *Applications of Mathematics* (SMAP). T.23. P.253-275.
9. Kuts, V. R., Stoliarchuk, P. G., Druziuk, V. M. (2012). Qualimetry. Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, Lviv Polytechnic National University. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House. 256 p.
10. Lukshin, A. V., Smirnov, S. N. (1990). Numerical methods for solving stochastic differential equations (in Russian). *Mathematical modeling: journal*. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences. T. 2, № 11. P. 108-121.
11. Mao, X. (2007). Stochastic Differential Equations and Applicatios. 2nd edition. Elsevier, 9, 12, 13, 17.
12. Mashkin, O. O. (2020). Features of the numerical solution of Lanchester-type models differential equations in a stochastic formulation. *Information Processing Systems*: scientific and technical journal: KhNUPS named after I. Kozhedub. Kharkiv. № 1 (160). P. 67-72.
13. Mikoni, S. V., Sokolov, B. V., Yusupov, R. M. (2018). Qualimetry of models and polymodel complexes: monograph: RAS. 314 p.
14. Moiseiev, N. N. (1981). Mathematical problems of system analysis. Moscow: Nauka. Main edition of physical and mathematical literature. 488 p.
15. Rumiaantsev, M. I. (2010). On the issue of assessing the adequacy of simulation models of banking business processes. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*: a collection of scientific papers on the material of the international scientific and practical conference (Odesa, 19th of November). Odesa: Black Sea. VOL. 15, PP. 84-93.
16. Sokolov, B. V., Yusupov, R. M. (2004). Conceptual and methodological bases of qualimetry of models and polymodel complexes (in Russian). *Proceedings of SPIRAN*. Issue 2, Vol. 1. P. 10-35.
17. Sokolov, B. V., Yusupov, R. M., Mikoni, S. V. (2014). Qualimetry of models and polymodel complexes: state of research and prospects for development. Sankt-Petersburg: TsNII Elektropribor. P. 44-53.
18. Sokolov, B. V., Yusupov, R. M. (2004). Conceptual foundations for evaluating and analyzing

the quality of models and polymodel complexes (in Russian). *Theory and systems of management*. Moscow. № 6. P. 5-16.
19. Tochino, A., Ardanui, R. (2002). Runge-Kutta methods for numerical solution of stochastic differential equations. *Journal Computational Mathematics*. No 138 (2). P. 219-241.
20. Fursenko, O. K., Chernovol, N. M. (2020). Lanchester models of combat operations. *Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force*. №4(66). P.85-91.
21. Tsyba, V. T. (1997). Fundamentals of the theory of qualimetry. *Study guide*. Kyiv: Institute of Content and Methods of Education of the Ministry of Defense of Ukraine. 160 p.
22. Shapoval, M. I. (2002). Quality management: a textbook. Kyiv: Znannia.
23. Debrabant, K. and A. Roessler (2008). Classification of Stochastic Runge-Kutta Methods for the Weak Approximation of Stochastic Differential Equations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 77(4), pp. 408-420.
24. Wang, Liguo (2016). Numerical Solutions of Stochastic Differential Equations. PhD diss., University of Tennessee. https://trace.tennessee.edu/utk.graddiss/3974.

Complex modeling of complicated processes: analytical model parameters adaptation in solving qualimetric problems

Olexander Mashkin
Doctor of Engineering, senior staff
scientist Chief of scientific-research
branch

The Central Research Institute of the Armed Forces of
Ukraine 03049, 28B Povitroflotskyi Avenue, Kyiv, Ukraine

e-mail: alexlen@meta.ua
ORCID: 0000-0002-3094-9984

Svitlana Maslenko
senior staff scientist of scientific-research branch

The Central Research Institute of the Armed Forces of
Ukraine 03049, 28B Povitroflotskyi Avenue, Kyiv, Ukraine

e-mail: Sveta0213@i.ua
ORCID: 0000-0002-9673-3844

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that despite the sustainable development of methods and technologies for creating models of various classes and purposes, the tasks of managing their quality (the so-called inverse problems of theoretical qualimetry) are often neglected. For example, in the field of information technology, much more attention is paid to assessing the quality of software products, which is reflected in the corresponding standards. These tasks become especially relevant when models reflect a complex process (CP), and such processes may be unique, and obtaining complete objective data on such CPs prior to modeling is difficult or impossible (accidents and disasters

models, military operations, natural disasters, and others like that). The article's main purpose is to consider the issues of solving the inverse qualimetric problem by parametric adaptation of analytical models to unpredictable possible changes in the complex processes' nature. The solution to this problem is based on the combined (analytical and simulation) modeling of unique processes. Theoretical qualimetry involves a quantitative assessment of any product's qualitative properties; to ensure the adequacy level of analytical models (based on the results of their parametric adaptation), it is planned to evaluate with the use of well-known metrology principles regarding relative measurement deviations. In this case, detailed simulation modelling results are used as a reference for combined modelling. The complexity of the processes conditiond by the expediency of their polymodel description in order to mutually compensate for the objective deficiencies of heterogeneous models, as well as the use of simulation capabilities to adjust the parameters of analytical models in cases where the use of the latter is due to strict time constraints on obtaining calculation results and developing control actions based on them. A variant of the formalized statement of the problem of parametric adaptation of analytical models is presented. A presented example that considers the adaptation of parameters of the Lanchester-type analytical model conducted on simulation data. The adaptation of parameters could be carried out in different ways, and the expediency of choosing a certain one is determined by the assessment of mutual deviations of the results of heterogeneous modeling. The results of the calculations witnesses that parametric adaptation can be an effective element in solving one of the key tasks of model qualimetry, namely, ensuring their required qualitative properties. The prospect of further research is to consider the issues of structural adaptation of simulation models to the given conditions for displaying complex processes.

Keywords: simulation and analytical modeling; model qualimetry; Lanchester-type models; parametric model adaptation.