

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Пасічника Романа Мирославовича**
на тему «**Математичні моделі систем з лімітуючими факторами та методи їх ідентифікації**», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми. Математичне моделювання є фундаментальною основою для прийняття адекватних рішень у багатьох сферах функціонування суспільства і держави. Важливим напрямком наукових і прикладних досліджень у галузі моделювання є вивчення проблеми підвищення його ефективності з точки зору як збільшення точності прогнозування при одночасному зменшенні затрат зусиль і ресурсів, так і розширення можливостей перенесення його інструментарію на нові об'єкти і системи.

У процесі таких досліджень важливо враховувати істотні індивідуальні особливості як конкретного об'єкта, так і загалом класу подібних об'єктів, що допомагає уникати переускладнення моделей через внесення неістотних елементів, наслідком якого, як правило, є втрата точності моделювання інших об'єктів. Саме такий підхід, спрямований на одночасне зменшення складності математичних моделей, підвищення їх точності та забезпечення їх універсальності, лежить в основі дисертаційних досліджень Р.М. Пасічника.

Будь-яка модель стає придатною для прогнозування тільки після розв'язання задачі параметричної ідентифікації на основі даних спостережень за функціонуванням конкретного об'єкта. При належному формуванні методу ідентифікації для певного класу об'єктів можна досягти зменшення обчислювальних затрат і тим самим підвищити ефективність самого процесу моделювання. Розробка методів ідентифікації з широкою сферою застосування, крім того, знижує затрати на їх програмну реалізацію та спрощує процес ідентифікації моделей для нових об'єктів подібного класу.

Підвищений прикладний інтерес становить задача моделювання класів соціальних, біологічних та хіміко-технологічних об'єктів та систем з огляду на їх складність і важливість процесів, з ними пов'язаних. Специфіка таких об'єктів полягає в наявності певних факторів, які можуть відігравати роль або обмеженого матеріального ресурсу для функціонування об'єктів, або ж зовнішнього збурення, що може мати позитивний чи негативний вплив. Такі фактори називають обмежувальними або лімітуючими, і моделювати поведінку таких складних об'єктів під дією лімітуючих факторів можна, як правило, за допомогою моделей із відносно невеликою кількістю релевантних змінних.

Таким чином, в роботі Р.М. Пасічника досліджується актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності моделювання об'єктів і систем з лімітуючими факторами за рахунок узагальнення їх моделей, розроблення методів їх параметричної ідентифікації та створення відповідного програмного інструментарію з метою спрощення процесу прикладного моделювання при забезпеченні необхідної точності математичних моделей.

Про актуальність цієї проблематики додатково свідчить відповідність виконаних досліджень науковим напрямкам кафедри комп'ютерних наук, а також кафедри економічної кібернетики та інформатики Тернопільського національного економічного університету, де автор був відповідальним виконавцем науково-дослідницьких робіт, впроваджених у різних установах.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові результати в дисертації обґрунтовано теоретично і підтверджені розв'язанням низки прикладних задач. З метою теоретичного обґрунтування наукових положень та висновків роботи автор застосував: системний аналіз – для узагальнення моделей систем з лімітуючими факторами; методи оптимізації – для пошуку мінімуму функціоналу якості ідентифікації; методи розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь – для побудови прогнозів характеристик систем з лімітуючими факторами; теорію динамічних систем – для формування методу ідентифікації різновиду таких систем.

Отримані теоретичні результати підтверджуються відомими з літератури та результатами комп'ютерного моделювання і числових розрахунків.

Достовірність результатів досліджень

Вірогідність основних наукових положень і результатів підтверджується їх несуперечністю загальнонауковим засадам, коректним використанням методів системного аналізу, оптимізації, розв'язання жорстких систем рівнянь, теорії динамічних систем, а також відповідністю результатів, отриманих з використанням розроблених моделей систем з лімітуючими факторами та методів їх ідентифікації, експериментальним даним спостережень за перебігом конкретних процесів. Усі результати узгоджуються з одержаними при проведенні аналогічних досліджень і описаними в літературних джерелах.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

– запропоновано та обґрунтовано узагальнену модель системи з відокремленими обмежувальними факторами, яка відрізняється врахуванням впливу підпорядкованих процесів на забезпеченість системи, відокремлених лімітуючих факторів на підпорядковані процеси, зміни базових рівнів активності системи, ефектом її інгібування продуктом системи, що дозволило сформулювати ядро моделей широкого класу систем з лімітуючими факторами;

– запропоновано та обґрунтовано узагальнену модель системи із зовнішнім лімітуючим навантаженням, яка відрізняється рівнянням динаміки активності системи, враховує нелінійність реакції системи на прикладене навантаження та лінійний характер стабілізатора активності системи з лімітуючими факторами та з різнотипними навантаженнями;

– розроблено узагальнений метод ідентифікації моделей систем з лімітуючим фактором, який відрізняється процедурою виділення базового рівня та оптимізації лімітуючого параметра, налаштуванням початкових значень інших параметрів, уточненням параметрів на основі градієнтного методу, що забезпечило створення інженерного інструментарію для ідентифікації адекватних математичних моделей систем з обмежувальними факторами;

– розроблено метод ідентифікації моделей систем з лімітуючою забезпеченістю для випадків відсутності спостережень динаміки активності або забезпеченості системи, що базується на формуванні різницевих співвідношень для налаштування початкових значень параметрів моделі і забезпечує побудову адекватних моделей широкого класу систем з лімітуючими факторами;

– розроблено метод ідентифікації моделей систем із множиною відокремлених обмежувальних факторів для випадків відсутності спостережень динаміки активного середовища та субстрату, який відрізняється побудовою двовимірної нерівномірної сітки для початкових наближень лімітуючого параметра та його уточнення на базовій множині пошуку, що дозволило ідентифікувати модель добової динаміки глікемії хворого на цукровий діабет.

Набули подальшого розвитку:

– модель хіміко-технологічного процесу броварного бродіння із застосуванням методу ідентифікації моделей з лімітуючим забезпеченням, що дало можливість спростити процедуру ідентифікації, уникнувши її багатоетапності, та підвищити точність математичної моделі;

– модель динаміки відвідуваності Веб-сайтів із застосуванням єдиного методу ідентифікації моделей з лімітуючими факторами, що забезпечило створення спрощеного інструментарію для служб підтримки Веб-сайтів для короткотермінового і довготермінового прогнозування динаміки відвідуваності.

Удосконалено:

– математичну модель реакції пацієнтів на фізичні навантаження різних етапів реабілітації після серцево-судинних захворювань введенням виразу, що характеризує нелінійну реакцію організму на прикладені навантаження, а також застосуванням перемикача гальмування збурень характеристик системи при знятті навантажень, що дало можливість адекватно відобразити в єдиній моделі як неінтенсивні, так і субмаксимальні навантаження;

– математичну модель характеристик результатів навчання, яка відрізняється врахуванням динаміки успішності та новизни навчального матеріалу, що дало можливість адекватно поетапно прогнозувати успішність освоєння матеріалу в системі автоматизованого навчання.

Значущість отриманих результатів для науки і практики математичного моделювання полягає у розвитку теорії та узагальнених методів ідентифікації моделей широкого класу систем з лімітуючими факторами, які адекватно описують практично важливі процеси різної природи. Прикладне використання теоретичних результатів забезпечується розробленим програмним інструментарієм модульного типу, використання якого економить час і затрати користувача на створення відповідних засобів моделювання.

Практичне значення роботи. На основі результатів роботи розроблено програмне забезпечення, яке підтримує процеси моделювання систем з лімітуючими факторами з достатньою для практики точністю, зокрема:

– узагальнені структури моделей систем з лімітуючими факторами та метод ідентифікації їх параметрів уможливають побудову адекватних моделей з високою точністю для широкого класу прикладних задач;

– на основі узагальненої моделі систем з лімітуючим навантаженням побудовано модель реабілітації після серцево-судинних захворювань для оцінювання рівня допустимих навантажень у процесі адаптації організму хворого після завершення медикаментозного періоду лікування;

– побудовано варіант узагальненого методу ідентифікації моделей систем з лімітуючими факторами для одноетапної оцінки значень параметрів моделей броварного бродіння, що забезпечує високу точність моделювання в широких діапазонах змін параметрів його температурного управління;

– на основі узагальненої моделі систем із внутрішніми лімітуючими факторами розроблено модель засвоєння знань для планування навантаження студентів, а також модель відвідуваності Веб-сайтів для оцінювання ефективності просування Веб-сайтів у інформаційному середовищі;

– за узагальненим методом ідентифікації моделей з лімітуючими факторами сформовано модель добової динаміки глікемії хворих на цукровий діабет, що забезпечує підтримання допустимих концентрацій глюкози за рахунок корекції режиму харчування та дозування ін'єкцій інсуліну при необхідних обсягах передбачуваних фізичних навантажень.

Розроблене програмне середовище використано в КЗ ТОВ «Тернопільська університетська лікарня» для моделювання добової динаміки глікемії хворих на цукровий діабет, в ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського» для моделювання реакції пацієнтів на фізичні навантаження після серцево-судинних захворювань, у ТОВ «Яваре» для моделювання динаміки відвідуваності Веб-сайтів, у ТзОВ «Агрокомпанія «Дружба» для моделювання динаміки родючості ґрунтів; у навчальному процесі ТНЕУ при викладанні дисциплін “Аналіз проектних вимог”, “Моделювання в управлінні соціально-економічними системами” та “Технологія проектування та адміністрування баз даних та сховищ даних”.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.

Основні наукові результати дисертації відображено в 48 публікаціях, з них 25 публікацій у фахових виданнях України, з яких 5 входять до переліку провідних міжнародних наукометричних баз, 1 публікація в закордонному науковому журналі, 22 доповіді та тези в матеріалах наукових конференцій, причому матеріали 18 з них зареєстровано в наукометричній базі SCOPUS.

В опублікованих працях викладено всі винесені на захист положення дисертаційної роботи. Рівень і число публікацій та рівень апробації результатів відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Структура та зміст дисертації

Дисертацію викладено на 255 сторінках. Робота складається зі вступу, основного змісту, що містить шість розділів, висновків, переліку використаних джерел з 255 найменувань та 4 додатків, представлених актів впровадження. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 306 сторінок.

Матеріал розміщено по розділах цілком логічно і послідовно: у *першому* розділі досліджено сучасний стан моделювання систем з лімітуючими факторами, специфіку методів параметричної ідентифікації моделей таких

систем і визначено задачі, необхідні для досягнення мети дослідження; у *другому* побудовано узагальнену модель систем зі внутрішніми лімітуючими факторами з подальшим її розвитком за рахунок врахування різних ефектів, зокрема наявності відокремлених лімітуючих факторів, і на основі провідної ролі лімітуючого параметра побудовано узагальнений метод ідентифікації моделей; у *третьому* розділі розроблено методи ідентифікації моделей процесів з лімітуючим фактором за різних варіантів неповних спостережень стану системи та поширено підхід на багатоетапну ідентифікацію моделей завдяки здійсненню експериментів з послідовним додаванням підпорядкованих процесів по одному; у *четвертому* побудовано узагальнену модель систем із зовнішнім лімітуючим навантаженням, виявлено основні засоби зміни їх динаміки, що дозволило побудувати методи ідентифікації таких моделей як уточнену реалізацію узагальненого методу ідентифікації, який відрізняється різницею співвідношеннями для побудови початкових значень параметрів; у *п'ятому* розділі описано програмне середовище моделювання систем з лімітуючими факторами, формалізовано основні його процеси, спроектовано його інформаційні ресурси; у *шостому* розділі розроблене програмне середовище моделювання застосовано для побудови моделей реальних систем: реакція організму хворого на серцево-судинні захворювання на навантаження різної інтенсивності; перебіг хіміко-технологічних процесів; опис успішності навчання студентів та процесів відвідуваності Веб-сайтів; динаміка глікемії хворих на цукровий діабет у залежності від режимів харчування та ін'єкцій інсуліну; у *висновках* сформульовано основні наукові результати роботи.

Автореферат загалом відображає суть основних наукових положень і результатів, практичну значущість та висновки. Дисертація і автореферат оформлені в основному згідно з чинними вимогами до докторських дисертацій.

Результати кандидатської дисертації автора не використовуються як наукові результати докторської роботи і не виносяться на захист.

До змісту рецензованої роботи слід зробити такі зауваження:

1. Метою дослідження названо «підвищення точності прогнозування ... у спосіб розроблення узагальнених моделей...». Тут невдалим є вираз «у спосіб», причому у роботі йдеться не лише про *точність* і навіть не про *прогнозування*, адже автор часто наголошує, що його результати спрямовані на різні аспекти *забезпечення ефективності* процесу моделювання. Тому доцільнішим було б таке формулювання: «Метою дослідження є підвищення ефективності моделювання об'єктів і систем з лімітуючими факторами за рахунок узагальнення їх моделей, розроблення методів їх параметричної ідентифікації та створення програмного інструментарію для спрощення процесу прикладного моделювання при забезпеченні необхідної точності математичних моделей».

2. Об'єкт дослідження сформульовано не зовсім адекватно: це не «процес *прогнозування* поведінки систем», а скоріше «процес *побудови моделей* поведінки систем» з лімітуючими факторами.

3. Автор на стор. 21 некоректно сформулював основну *проблему*, вирішенню якої присвячено його дослідження: «створення нового класу математичних

моделей, розробка універсальних методів їх ідентифікації для формування інженерного інструментарію із розширеною сферою застосування в прикладних дослідженнях». Таке формулювання насправді описує *сукупність задач*, розв'язання яких допомогло би вирішити певну проблему, яку не описано.

4. Опис моделі Фергюльста (1.4)-(1.6) динаміки росту популяції містить грубі помилки: у формулі розв'язку (1.6) цієї моделі під знаком експоненти має стояти вираз $[-(b-d)K(t-t_0)]$, а так званою «горизонтальною асимптотою» тобто стаціонарним розв'язком при $t \rightarrow \infty$, є просто K , що очевидно з (1.4).

5. В авторефераті, характеризуючи класичну модель хижак-жертва Лотки-Вольтерри, автор помилково зазначає: «В такій моделі мала кількість хижаків може компенсуватися ростом чисельності жертв, що не відповідає дійсності.» Насправді ж це якраз адекватно відповідає дійсності: при зменшенні кількості хижаків зростає чисельність жертв, і навпаки, тобто відбуваються коливання чисельності. Причому в дисертації такого некоректного твердження немає.

6. У параграфі 1.2 «Особливості моделювання систем із лімітуючими факторами в окремих практичних задачах» взагалі немає жодної моделі, тому не зовсім зрозуміло, які підстави для віднесення таких систем до одного класу.

7. Не зрозуміло, чому автор стверджує на стор. 57, що «В пропонуваній схемі організації досліджень ... відпадає необхідність у визначенні модельних аналогів» – адже з пошуку аналогів завжди починається будь-яке дослідження.

8. Мету дисертаційного дослідження автор сформулював зовсім по-різному у Вступі та у підсумку Розділу 1 на стор. 58.

9. В дисертації формулою (2.2) означено функцію Моно *першого* роду, натомість відсутнє означення функції Моно *другого* роду, яка відіграє важливу роль у результатах автора. В авторефераті роботи цю функцію описано.

10. На стор. 207 вказано: «Метод ґрунтується на моделі нечітких хіміко-технологічних процесів» – але ж реальний процес не може бути «нечітким»; напевно, мова йде про *нечіткі моделі* процесів.

11. У формулі (6.13) введено параметр γ як «ступінь важливості досягнення заданого рівня максимуму змінної», проте не вказано, які значення він може приймати і не надано рекомендацій щодо визначення його доцільної величини.

12. У більшості прикладних задач автор визначає підвищення точності моделювання переважно в порівнянні з власними попередніми моделями, але при цьому ніяк не характеризує зручність і прискорення процесу побудови моделей.

13. Авторська методика послідовного оцінювання параметрів нелінійних моделей аналізованого класу фактично передбачає проведення спеціальних експериментів для елімінації впливу параметрів, неістотних для даного етапу ідентифікації, проте автор чомусь уникає терміну «планування експериментів».

14. Формулювання пп. 2 і 3 дисертаційних Висновків у дисертації та авторефераті дещо відрізняються.

15. У тексті роботи зустрічаються некоректні терміни: *направлений* пошук (замість *спрямований*); *середнє гармонійне* (замість *гармонічне*); *найвірогідніше* значення функції (замість *найімовірніше*). А замість терміну «лімітуючі фактори» варто було б використовувати «обмежувальні чинники/фактори».

16. Зустрічаються некоректні або невдалі позначення:

- на стор. 52 некоректно позначено перелік вузлів $t_0 - t_{m-1}$ та значення розв'язку в цих вузлах $\bar{x}_0 - \bar{x}_{m-1}$ – ці вирази читаються як різниці величин;
- у розділі 2 введено дуже невдалі позначення: $D_{X, J-1/2}$, $D_{X, J+1/2}$, $X_{J+1/2}$, $X_{J-1/2}$, $X_{J+1/2}$, $S_{J-1/2}$, $S_{J+1/2}$ – це ніби величини з дробовим індексом;
- той же недолік мають і величини $t_{1/2}$, $L_{1/2}$ в розділі 4.

17. Зауваження щодо оформлення тексту дисертації:

- незручні посилання на літературу внаслідок її оформлення в алфавітному порядку, а не в порядку посилань;
- на Рис. 1.2. має бути якийсь зв'язок між моделлю і об'єктом – напевно, на схемі бракує блоку «Результат моделювання»;
- на Рис. 1.3 Аналітик, Дослідник і Розробник ніяк не пов'язані між собою;
- у поясненні до формули (1.11) вказано величину K_S , якої немає в цій формулі, а з виразів (1.11) та (1.14) не зрозуміло, що таке k_{+2} , k_1 та k_2 ;
- у виразі (1.45) повторно вказана формула (1.34);
- на стор. 87 розділу 2 вказано некоректне посилання: «похідна від функцій Моно (2)-(3)», проте формул з такими номерами в цьому розділі немає – натомість вони є в авторефераті;
- в роботі однаковою літерою M позначено кількість підпорядкованих процесів і обидві функції Моно;
- на рис. 5.1-5.5 не зрозуміло, що означають виходи 1 та 2;
- на Рис.5.14 «Діаграма активності формування методу прогнозування в середовищі моделювання систем з лімітуючими факторами» є блок з дивною назвою «Відтворення попереднього прогнозу»;
- в авторефераті не пояснюється зміст величин $T(t)$ та H_6 в моделі (4)-(11).

18. Зауваження щодо мовних недоліків:

- неправильний родовий відмінок: модель об'єкту; значення параметру тощо;
- явне зловживання сполучника «із»: узгодження моделі із даними; в контакт із аналітиками; на сітці із кроком тощо; є навіть дивний вираз «постановка задачі із моделювання»;
- чимало явних русизмів: згідно законів, згідно критерію, згідно методу тощо; задовольняти обмеженням; при відсутності; не дивлячись на; предметна область; убунання забезпеченості;
- некоректні вирази типу «ріст менш масштабніший»; «освоєння навчального матеріалу»;
- описки типу «виключено стабілізуючий компоненти» (стор.138).

Зрозуміло, що вказані недоліки помітно знижують загалом позитивне враження від рецензованої роботи, проте вони стосуються переважно оформлення результатів роботи, а не їх наукової суті, і тому не заважають в цілому високо оцінити теоретичні та прикладні результати, отримані автором при виконанні дисертаційних досліджень і підтверджені їх реальним застосуванням у виробничих і наукових установах та навчальному процесі.

Загальний висновок

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Пасічника Романа Мирославовича на тему «Математичні моделі систем з лімітуючими факторами та методи їх ідентифікації» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові, науково обґрунтовані та практично важливі результати, що в сукупності вирішують науково-прикладну проблему підвищення ефективності моделювання об'єктів і систем з лімітуючими факторами за рахунок узагальнення їх моделей, розроблення методів їх параметричної ідентифікації та створення відповідного програмного інструментарію, який забезпечує необхідну точність моделей. За допомогою розробленого інженерного інструментарію розв'язано реальні задачі побудови моделей систем з лімітуючими факторами для кількох предметних галузей різної природи.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема, наступним пунктам розділу II: отримання принципово нових (нетрадиційних) видів математичних моделей, оцінки, ідентифікації та оптимізації математичних моделей, модифікація та спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності, створення і дослідження нових обчислювальних методів і алгоритмів, що враховують особливості реальних технічних та технологічних задач, забезпечують створення ефективних програмних засобів комп'ютерної реалізації.

Дисертаційна робота за своїм змістом, оформленням та отриманими результатами загалом відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, а її автор Пасічник Роман Мирославович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Завідувач відділу інформаційних технологій
індуктивного моделювання
Міжнародного науково-навчального центру
інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України,
доктор технічних наук, професор



 В.С. Степашко