

## 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 за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми.**

Останні десятиліття характеризуються розробленням математичних моделей процесів, характерних для складних предметних галузей, зокрема для біологічних та соціальних систем. Таким системам властивий високий рівень самоорганізації, згідно якого більшість характерних показників системи підтримуються на оптимальному рівні завдяки вбудованим підсистемам самоконтролю. Ці механізми самоконтролю допускають відхилення показників лише під дією значних сприятливих або несприятливих факторів, які мобілізують зусилля всієї системи на подолання негативних впливів або максимального використання сприятливих можливостей. Вони визначають роботу системи на певний період і отримали назву лімітуючих факторів. Моделі систем із лімітуючими факторами, в основному, використовувалися лише для моделювання динаміки популяцій мікроорганізмів та об'єктів екологічних систем. Останнім часом побудовані моделі систем із лімітуючими факторами для нових предметних областей, хоча робіт із узагальнення досвіду такого моделювання дуже мало.

Такі узагальнення повинні бути спрямованими на підвищення ефективності процесу моделювання, зокрема за рахунок покращення значень основних характеристик цих процесів при зменшенні затрат на їх досягнення. Точність побудованих моделей є однією із основних характеристик їх якості, а затратними ресурсами для її досягнення є час, затрачений на програмну реалізацію моделі, її ідентифікацію та прогнозування за її допомогою.

Спрощення процесу моделювання веде до зменшення затрат часу на його реалізацію, тим самим підвищуючи ефективність моделювання. Досягати такого спрощення не можна за рахунок огрублення моделі або методу ідентифікації, оскільки це неодмінно понизить точність моделювання. Тому виникає необхідність у розробці нових узагальнених моделей підвищеної точності із розширеною сферою використання а також узагальнених методів ідентифікації, які б мінімізували час на ідентифікацію а також були максимально стандартизованими.

Тому **актуальною** є науково-прикладна проблема побудови та дослідження процесу моделювання систем із лімітуючими факторами, які б ґрунтувалися на створенні нових універсальних моделей та методів їх ідентифікації, відповідному програмному та інженерному інструментарію і забезпечували необхідну точність моделювання.

*Основна ідея* дисертаційного дослідження полягає у розробці

узагальнених моделей систем із лімітуючими факторами а також методів їх ідентифікації, які забезпечують підвищення точності моделювання при одночасному зниженні затрат на її досягнення.

Важливість отриманих результатів впливає також із того, що робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедр комп'ютерних наук та економічної кібернетики та інформатики Тернопільського національного економічного університету. Дисертант був відповідальним виконавцем ряду науково-дослідних робіт, результати яких знайшли впровадження на виробництві та в науково-дослідних установах України, що підтверджено актами про впровадження.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Основні наукові результати отримали теоретичне обґрунтування в дисертації та втілені при розв'язанні сукупності прикладних задач.

Автором коректно застосовано для теоретичного обґрунтування наукових положень та висновків дисертаційної роботи наступні теоретичні підходи: системного аналізу – для побудови і аналізу моделей систем з лімітуючими факторами, оптимізації – для пошуку мінімуму функціоналу якості ідентифікації, розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь – для побудови прогнозів характеристик систем із лімітуючими факторами з метою встановлених значень параметрів їх моделей, а також теорії динамічних систем – для формування методу ідентифікації окремого виду таких систем.

Обґрунтовані теоретичні результати порівнювалися із результатами розв'язання модельних задач, а також із описаними в літературних джерелах результатами комп'ютерного моделювання.

В загальному наукові результати та висновки дисертації теоретично обґрунтовані, підтверджені експериментально та впроваджені в установах та підприємствах з метою підвищення ефективності їх функціонування.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність наукових положень та основних одержаних результатів підтверджується коректним використанням методів системного аналізу, оптимізації, теорії жорстких систем диференціальних рівнянь, теорії динамічних систем, а також відповідністю результатів, отриманих з використанням запропонованих моделей систем із лімітуючими факторами в сукупності із методами їх ідентифікації, спостережуваним значенням модельованих величин.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

#### **Вперше:**

– запропоновано та обґрунтовано узагальнену модель системи із відокремленими лімітуючими факторами, яка відрізняється від існуючих врахуванням впливу підпорядкованих процесів на забезпеченість системи, впливу відокремлених лімітуючих факторів на підпорядковані процеси, зміни базових рівнів активності системи, ефектом її інгібування продуктом системи. Це у сукупності дало можливість сформувати ядро математичних моделей розширеного класу систем з лімітуючими факторами;



– запропоновано та обґрунтовано узагальнену модель системи із зовнішнім лімітуючим навантаженням, яка на відміну від існуючих містить рівняння динаміки активності системи, враховує нелінійність реакції системи на прикладене навантаження та лінійний характер стабілізатора активності системи, що дало можливість сформулювати ядро математичних моделей з різнотипними навантаженнями на систему із лімітуючими факторами;

– розроблено узагальнений метод ідентифікації моделей систем із лімітуючим фактором, який відрізняється процедурою виділення базового рівня та вибору оптимальних значень лімітуючого параметра, побудовою співвідношень для налаштування початкових значень інших параметрів моделі, процедурою уточнення початкових значень параметрів моделі на основі градієнтного методу, що у сукупності забезпечує створення інженерного інструментарію для ідентифікації адекватних математичних моделей систем з лімітуючими факторами з різною природою процесів у них;

– розроблено метод ідентифікації моделей систем із лімітуючою забезпеченістю для випадків відсутності спостережень динаміки активності або забезпеченості системи, який відрізняється процедурою формування різницевих співвідношень для налаштування початкових значень параметрів моделі, що забезпечує побудову адекватних моделей широкого класу систем із лімітуючими факторами;

– розроблено метод ідентифікації моделей систем із множиною відокремлених лімітуючих факторів для випадків відсутності спостережень динаміки активного середовища та субстрату, який відрізняється процедурами побудови 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 із 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 із лімітуючими факторами, що забезпечило створення спрощеного інструментарію для служб підтримки веб-сайтів як для короткотермінового, так і для довготермінового прогнозування динаміки відвідуваності.

#### **Удосконалено:**

– математичну модель реакції пацієнтів на фізичні навантаження різних етапів реабілітації після серцево-судинних захворювань через введення виразу для відображення нелінійної реакції організму на прикладені фізичні навантаження, а також застосуванням перемикача гальмування збурень характеристик системи при знятті фізичних навантажень. Це дало можливість адекватно відобразити в єдиній моделі як неінтенсивні, так і субмаксимальні



навантаження і тим самим спростити інструментарій прогнозування визначення допустимих навантажень та підвищити його точність;

– 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 практичного використання** полягає у розвитку теорії ідентифікації моделей систем із лімітуючими факторами, що описують низку важливих процесів. Моделі дозволили побудувати узагальнений метод ідентифікації, на основі якого розроблено методи ідентифікації моделей ряду практично важливих задач.

Практичне використання розроблених теоретичних положень здійснюється у запропонованому середовищі моделювання.

**Практичне значення роботи.** На основі напрацьованих теоретичних результатів та методів створено алгоритмічні та програмні засоби, які дозволяють будувати прогноз характеристик систем із лімітуючими факторами із покращеною точністю:

1. Узагальнені моделі систем із лімітуючими факторами використані для напрацювання моделей для різних прикладних задач.
2. Узагальнений метод ідентифікації моделей систем з лімітуючими параметрами дозволяє формувати методи ідентифікації окремих груп прикладних задач.
3. На основі узагальненої моделі систем із лімітуючим навантаженням розроблена модель процесів реабілітації після серцево-судинних захворювань а також метод її ідентифікації для оцінювання допустимості навантажень на етапі адаптації організму хворого;
4. Створено метод ідентифікації моделей систем із лімітуючими факторами із високою точністю для ідентифікації параметрів моделей броварного бродіння, який дозволяє уникнути його багатоетапності.
5. На базі узагальненої моделі систем із лімітуючою забезпеченістю розроблено моделі характеристик успішності процесу засвоєння знань в автоматизованих системах навчання, а також модель відвідуваності веб-сайтів та єдиний метод їх ідентифікації, що дозволяє надійніше оцінювати ефективність зусиль із освоєння навчальних курсів а також рекламування веб-сайтів в глобальному інформаційному середовищі.
6. Розроблено метод ідентифікації моделі добової динаміки глікемії хворих на цукровий діабет на основі вимірювань концентрації глюкози в організмі в ході спеціально організованих експериментів.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено в практичну діяльність КЗ ТОВ «Тернопільська університетська лікарня» для моделювання добової динаміки глікемії хворих на цукровий діабет, ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського» для моделювання реакції пацієнтів на фізичні навантаження після серцево-судинних захворювань, ТОВ «Яваре» для моделювання динаміки відвідуваності веб-сайтів, ТЗОВ «Агрокомпанія «Дружба»; в навчальному процесі



Тернопільського національного економічного університету 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 відображені в 48 публікаціях, 25 публікацій у фахових виданнях України, з яких 5 входять до переліку провідних міжнародних наукометричних баз, публікація у міжнародному науковому журналі, 22 статті у матеріалах наукових конференцій, причому 18 із них зареєстровано у наукометричній базі SCOPUS.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Рівень та кількість публікацій 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 включає шість розділів, висновків, списку використаних джерел з 255 найменувань та 4 додатків, представлених актів впровадження. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 306 сторінок.

*У першому розділі* на основі аналізу існуючих публікацій досліджено сучасний стан моделювання систем із лімітуючими факторами. Описано підходи до побудови методів параметричної ідентифікації моделей систем із лімітуючими факторами. Визначено задачі, які вимагають вирішення та обґрунтовано підходи до вирішення цих задач.

*У другому розділі* побудовано узагальнену модель систем із лімітуючими факторами. Модель дозволяє враховувати ефекти інгібування кінцевим продуктом, зміни базових рівнів активностей процесів а також вплив відокремлених лімітуючих факторів на забезпеченість основного процесу системи. Встановлено ключовий вплив на динаміку змінних моделі лімітуючого параметра. Побудовано узагальнений метод ідентифікації моделей із лімітуючою забезпеченістю, який передбачає встановлення прийняттого порядку значень лімітуючого параметра, формування наближених різницевих співвідношень між параметрами моделі, побудову початкових значень коефіцієнтів моделі та її ідентифікації згідно середньоквадратичного критерію за допомогою градієнтного методу.

*У третьому розділі* розроблено методи ідентифікації моделі процесів з лімітуючим фактором за спостереженнями лише субстрату або змінної активного середовища, моделі із відокремленими лімітуючими факторами за спостереженнями загальної забезпеченості процесів системи. Розглянуто особливості багатоетапного методу ідентифікації, який зустрічається у задачах, що враховують вплив людського фактора.

Для моделей процесів з внутрішніми лімітуючими факторами із спостереженням змінної забезпеченості або лише змінної активності запропоновано модифікацію методу ідентифікації, яка базується на загальному методі ідентифікації моделей із внутрішнім лімітуючим фактором а також на



співвідношеннях, які дозволяють оцінити значення неспостережуваних параметрів.

Запропоновано багатоетапний метод ідентифікації, який базується на загальному методі ідентифікації моделей із внутрішнім лімітуючим фактором а також на спостереженнях, отриманих в ході здійснення послідовності експериментів для моделей процесів із внутрішніми відокремленими лімітуючими факторами. Будуються спеціальні сітки значень лімітуючих параметрів із застосуванням процедури мінімізації максимальних відносних похибок моделі на експериментальних даних. На кожному із етапів ідентифікації додається вплив одного підпорядкованого процесудля вибору початкових значень лімітуючих параметрів.

*У четвертому розділі* побудовано узагальнену модель систем із зовнішнім навантаженням, яке виступає лімітуючим фактором. Це уможливило встановлення залежності між зовнішнім навантаженням та змінними активності для класу практично важливих процесів. Розроблено модифікацію узагальненого методу ідентифікації, зокрема різницеві співвідношення для побудови початкових значень параметрів моделі із зовнішнім навантаженням.

*У п'ятому розділі* описано програмне середовище моделювання систем із лімітуючими факторами. За допомогою діаграм активностей базових процесів згаданого середовища побудовано діаграму варіантів використання, що дало змогу сформулювати вимоги до програмного продукту, який спрощує процес розробки програмних реалізацій математичних моделей систем із лімітуючими факторами в різних предметних галузях.

Формалізовано основні його процеси для спрощення розробки програмної реалізації моделей. Спроектовано взаємозв'язок класів програмного середовища моделювання систем з лімітуючим фактором та схему взаємозв'язку основних модулів середовища, що дозволило реалізувати функціональні можливості середовища моделювання та забезпечити повторність використання розроблених програмних модулів.

*У шостому розділі* розроблені узагальнені моделі та методи їх ідентифікації застосовано для розв'язання важливих прикладних задач. Напрацьовані моделі можна використати як прототипи для побудови моделей в окремих предметних галузях.

Побудовано єдину модель реакції організму хворого на серцево-судинні захворювання в процесах неінтенсивних та субмаксимальних навантажень а також єдиний метод їх ідентифікації із використанням циклу по значеннях лімітуючого параметра. Змодельовано реакцію організму на дію зовнішнього навантаження для різних етапів процесу реабілітації.

Побудовано метод ідентифікації автономних моделей хіміко-технологічних процесів на основі циклу по значеннях лімітуючого параметра, що виключає багатоетапні уточнення параметрів моделі та підвищує її точність.

Запропоновано модель успішності навчання а також метод її ідентифікації на основі розробленого підходу до багатоетапної ідентифікації. Це дозволяє раціонально розподіляти зусилля при плануванні процесу освоєння навчального матеріалу. Побудовано єдиний метод



ідентифікації моделей відвідуваності веб-сайтів, який на відміну від існуючих не вимагає врахування типів росту відвідуваностей, а також допоміжних поліноміальних апроксимацій. Такі властивості методу забезпечуються за допомогою циклу по значеннях лімітуючого параметра, щопідвищує надійність прогнозування росту відвідуваності. Побудовано метод ідентифікації моделі добової глікемії хворих на цукровий діабет за допомогою підходу до ідентифікації моделей процесів з лімітуючим фактором на основі спостереження значень системної забезпеченості. Це дозволяє прогнозувати реакцію на вибрані режими харчування та вводу ін'єкцій інсуліну хворого протягом доби.

**У висновках** сформульовано основні наукові результати і окреслено перспективу можливих подальших досліджень.

**Автореферат** відображає суть основних наукових положень, практичну значущість та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до докторських дисертацій в Україні, хоча по тексту дисертації зустрічаються описки, стилістичні неточності.

**Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищена кандидатська дисертація.**

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію "Чисельне розв'язання мішаної задачі Діріхле для хвильового рівняння методом інтегральних рівнянь" (1989 рік) за спеціальністю 01.01.07 – "обчислювальна математика", не використовуються як наукові результати докторської дисертації здобувача і не виносяться на її захист.

#### **Зауваження до роботи.**

1. У першому розділі доцільно було б чіткіше окреслити клас систем із лімітуючими факторами, оскільки запропонована автором узагальнена математична модель цих систем не в повній мірі враховує всі можливі випадки зазначеного класу, зокрема не враховано випадки взаємодії різних процесів, які можуть привести до синергетичних ефектів.
2. У моделі з відокремленими лімітуючими факторами, механізм дії яких в достатній мірі описано в другому розділі, зроблено припущення, що змінним моделі не властиві різкі коливання. Це не завжди відповідає дійсності, наприклад, у випадку суттєвого ускладнення нелінійної частини моделі. Тому в дисертації доцільно було б окреслити випадки, коли це припущення порушується і подати певні кількісні оцінки параметрів системи.
3. У третьому розділі розглянуто метод ідентифікації процесів з лімітуючими факторами, коли частину змінних неможливо виміряти. Автором запропоновано на початкових етапах ідентифікації таких моделей використовувати наближене подання поведінки цих змінних. При цьому не досліджується вплив точності таких апроксимацій на точність результатів моделювання.
4. В узагальненому методі ідентифікації моделей систем із лімітуючими факторами використано ряд прийомів, зокрема різниці апроксимації похідних, розв'язання систем лінійних рівнянь, використання оцінок



невимірних величин за допомогою наперед встановлених сталих. Доцільно було б ці прийоми подати єдиною схемою.

5. У розділі 6 автором розроблено низку математичних моделей систем із лімітуючими факторами, зокрема математична неавтономна модель хіміко-технологічного процесу броварного бродіння. При цьому для синтезу керуючих чинників застосовано генетичний алгоритм, особливості застосування якого зовсім не описані в дисертаційній роботі. Загалом зазначене питання доцільно було б вилучити з тексту дисертації, оскільки воно не стосується мети та цілей дисертаційної роботи.
6. В текстах автореферату та дисертації зустрічаються окремі неточності (“прискорення” с. 15, табл.1 стрічка 6, стовпчик 3 автореферату, зміст, розділ 6.3: «літуючі» замість «лімітуючі», неточності в розділових знаках крапках, комах, крапках з комами), однак їх не надто багато.

#### **Загальні висновки.**

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 роботою, в якій отримані нові, обґрунтовані та практично важливі результати, що у сукупності вирішують науково-прикладну проблему, пов'язану з потребами моделювання систем із лімітуючими факторами з одночасним забезпеченням необхідної точності та розробки для цих цілей інженерного інструментарію. Розв'язання зазначеної проблеми забезпечило побудову моделей систем із лімітуючими факторами для низки предметних галузей.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертаційна робота за своїм змістом загалом відповідає вимогам п.п. 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 за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

#### **ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

Завідувач кафедри прикладної  
математики  
Національного університету  
«Львівська політехніка»,  
доктор фіз.-мат. наук, професор

П. П. Костробій

Підпис професора Костробія П. П. засвідчую

Вчений секретар  
Національного університету  
«Львівського політехніка»  
доцент, к.т.н.



Р. Б. Брилинський