

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ**  
**ІМ. Г.Є. ПУХОВА**

**ВЕРЛАНЬ АНДРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 519.6, 004.942 : 519.876.2

**АДАПТАЦІЙНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАТЕМАТИЧНОГО**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-**  
**ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ (СТОСОВНО ДО СИЛОВИХ**  
**ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК)**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ– 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України.

**Науковий консультант:**

чл.-кор. НАН України,  
доктор технічних наук, професор,  
**Мохор Володимир Володимирович**  
Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
директор

**Офіційні опоненти:**

чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук,  
професор

**Хіміч Олександр Миколайович,**  
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,  
заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу  
чисельних методів та комп'ютерного моделювання

чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор

**Квєтний Роман Наумович,**  
Вінницький національний технічний університет  
МОН України,  
завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних  
інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор

**Святний Володимир Андрійович,**  
Державний вищий навчальний заклад "Донецький  
національний технічний університет" МОН України,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії

Захист відбудеться « 12 » грудня 2019 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01 Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: Україна, 03164, Київ-164, вул. Генерала Наумова, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: Україна, 03164, Київ-164, вул. Генерала Наумова, 15.

Автореферат розісланий « 25 » жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.В. Душеба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з важливих проблем техніки є створення сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем, зокрема, розвиток сучасної енергетики шляхом розроблення нових та модернізації існуючих зразків силових енергетичних установок (СЕУ), які застосовуються як автономні енергогенеруючі та рухомабезпечуючі системи різного призначення, в тому числі у виробництві та на транспорті.

Сучасний рівень комп'ютеризації СЕУ визначається розв'язуваними поточними завданнями, які і визначають можливості і потреби в комп'ютерній техніці. До розповсюджених завдань відносяться: проектування установок (при цьому широко відомий важливий недолік дорогих автоматизованих систем проектування – відсутність достатнього набору засобів модельної підтримки); обробка результатів випробувань (виконується автономними засобами); супровід результатів профілактики; реєстрація результатів вимірювань в контрольних точках при діагностиці та контролі; забезпечення процесів управління (використовуються регулятори, наприклад ПІД-регулятори, які не враховують властивості об'єкта). Таким чином, клас задач, які вирішуються комп'ютером, є досить обмеженим і має обмежену складність, і не забезпечує вирішення завдань повного спостереження і керування режимами функціонування СЕУ. Тоді як сучасні тенденції даного напрямку передбачають вирішення саме цих задач. Комп'ютерно-інтегровані системи з необхідними властивостями повинні задовольняти принципу «Full responsibility systems» (системи з повною відповідальністю). Створення таких систем з урахуванням комп'ютерно-інтегрованого виконання з властивими їм обмеженнями на ресурси вимагає вирішення нових проблем побудови математичних моделей динаміки установки, підсистем управління і діагностики, що забезпечують ефективне функціонування СЕУ. Рішення даних проблем потребує проведення фундаментальних досліджень в області процесів моделювання, управління, діагностування, алгоритмічного і програмного забезпечення. Задоволення вказаних вимог призводить до нагальної необхідності розробки адаптаційних методів з використанням процесів оптимізації.

Існуючі наукові досягнення в області математичного моделювання динамічних систем, здебільшого, базуються на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. На основі цього підходу створено та активно застосовується чимало методів і засобів комп'ютерного моделювання. Проте, такий підхід може мати деякі обмеження. Серед них можна виділити питання забезпечення стійкості обчислювального процесу при наявності значних рівнів високочастотних спектрів шумів у вихідних даних, розповсюджений прояв ефекту Гіббса при моделюванні об'єктів з розподіленими параметрами, обмежене застосування традиційних (не адаптованих) алгоритмів та ін. Для розв'язання вказаних питань необхідно, в доповнення до існуючих, створювати нові способи побудови і числової реалізації математичних моделей. Ефективним кроком у цьому напрямку є використання інтегральних операторів та рівнянь. Такий вибір обумовлений тим, що інтегральні моделі володіють низкою позитивних

властивостей, зокрема високою універсальністю (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об'єктів, а властивості задаються однією функцією – ядром інтегрального оператора), потенційно високою адекватністю процесів моделювання, властивістю згладжування при виконанні обчислень та використанні у реальних системах із значним рівнем спектрів високочастотних шумів, високою стійкістю обчислювальних процесів, можливістю ефективної побудови моделі за експериментальними даними тощо. Разом з тим, використання інтегральних моделей має ряд особливостей, врахування яких вимагає проведення низки теоретичних і практичних досліджень та розробок. Зокрема, це стосується проблеми отримання еквівалентних інтегральних моделей на основі відомої диференціальної моделі, оскільки значна частина фізичних законів записується в диференціальній формі.

Насичення установок вмонтованими комп'ютерними засобами дозволяє розв'язувати комплекс вказаних задач із забезпеченням інтелектуальних функцій. Поява можливості вирішення складних та специфічних задач обумовлює необхідність розробки ефективних математичних та комп'ютерних моделей даного класу об'єктів. Ця обставина породжує таку вимогу до комп'ютерних моделей, як здатність роботи в реальному часі при обмежених обчислювальних ресурсах.

Отже, для розв'язування задач проектування, управління, контролю, діагностики виникає необхідність розвинення методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання таких систем та їх складових елементів, які здатні враховувати зазначені особливості. Аналіз публікацій у напрямку створення таких методів свідчить про існування певних тенденцій, але розв'язання проблеми в цілому не можна вважати завершеним.

До найбільш відомих центрів, які здійснюють розробки в цьому напрямку відносяться підрозділи провідних світових фірм: "Дженерал Електрик", "Сіменс", "Елекрісіте де Франс", "Вестингауз", "Бабкок", "Тошіба", "Хітачі", В Україні подібними роботами займаються у СКТБ ВАТ "Турбоатом", ДП "Івченко-Прогрес", ВАТ "Мотор-Січ", ВАТ Мінпромполітики України "Елемент", ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект» .

Відмінною рисою технічних комп'ютерно-інтегрованих систем є різноманітність елементів, що входять до складу фізичної частини, що, породжує неоднорідність у математичному описі системи, що надає відповідні особливості методів і засобів математичного моделювання, що створюються.

Таким чином, у зв'язку з інтенсивним якісним розвитком, ускладненням структур і суттєвим розширенням області застосування комп'ютерно-інтегрованих систем актуальною є *науково-технічна проблема створення адаптаційних методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання процесів їх функціонування для дослідження і забезпечення якісних показників вказаного класу систем, ефективного розв'язання задач аналізу, синтезу та побудови засобів керування і діагностики з урахуванням обмежень до інформаційних ресурсів.*

Ефективне розв'язання вказаної проблеми може досягатись шляхом розширення класу математичних моделей для врахування особливостей окремих

типів ланок систем, що моделюються, в тому числі із залученням інтегральних динамічних моделей і макромоделей, створення та застосування методів еквівалентних та апроксимаційних перетворень моделей, отримання та застосування швидкодіючих алгоритмів для реалізації динамічних моделей, підвищення рівня адекватності відтворення процесів як в окремих ланках, так і в цілому в системі, структурно-алгоритмічної організації програмних засобів комп'ютерного моделювання. Урахування особливостей комп'ютерно-інтегрованих систем приводить до необхідності придання методам і засобам моделювання адаптуючих можливостей.

Для розв'язання вказаної проблеми доцільним є застосування структурно-орієнтованого підходу в моделюванні, на якому традиційно ґрунтуються дослідження та інженерні розробки при створенні зразків нової техніки, та який є основою для створення нових методів математичного моделювання з використанням принципу декомпозиції, а також засобів комп'ютерного моделювання шляхом організації сучасних моделюючих програмних комплексів. Підхід дозволяє використовувати, в тому числі одночасно, різні види динамічних моделей, створювати розгалужене алгоритмічне забезпечення з можливістю розробки і застосування відповідного набору програмних модулів, використовувати опис системи, що моделюється, в природній і зручній для розробника графічній формі.

Суттєвий внесок в проблему створення методів і засобів математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем внесли результати праць Бублика Б.М., Верляня А.Ф., Гаращенко Ф.Г., Горбаня А.В., Дячука О.А., Жученка А.І., Євдокимова В.Ф., Задираки В.К., Іванова В.В., Кветного Р.Н., Кириченка М.Ф., Кисельова Н. В., Клепікова В.Б., Кубрака А.І., Лозинського О. Ю., Мороза В.І., Москвіної С.М., Святного В.А., Стахіва П.Г., Федорчука В.А., Хіміча О.М., Ali-Zade P.G., Baker C.T.H., Bird J., Cinlar E., Harvill Lawrence R., Hoffman J.D., Lyshevski S. E., Moon F. C. та ін.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України в рамках науково-дослідних робіт: «Структурно-алгоритміческие методы и средства компьютерного моделирования сложных энергетических объектов с распределенными и переменными параметрами», № держреєстрації 0101U000024; «Математическое и компьютерное моделирование неоднородных динамических систем с сингулярными свойствами применительно к задачам управления и экологической безопасности в энергетике», № держреєстрації 0106U000622; «Математические методы и компьютерные средства повышения разрешающей способности систем технологического контроля и управления энергогенерирующего оборудования», № держреєстрації 0103U000218; «Створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в автономних енергетичних силових установках при побудові сучасних систем керування, діагностики і випробування» (шифр "Модус"), № держреєстрації 0111U007792; «Створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання процесів інверсної обробки

сигналів у вимірювальних каналах систем моніторингу енергетичних об'єктів» (шифр "Інверсія"), № держреєстрації 0114U003949.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення методів і засобів математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих технічних систем з адаптаційним забезпеченням можливостей дослідження і побудови засобів керування та діагностики.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- аналіз сучасного стану і особливостей проблеми дослідження, створення і вдосконалення технічних комп'ютерно-інтегрованих систем (на прикладах силових енергетичних установок), вибір та обґрунтування перспективних підходів до її вирішення;
- розробка адаптаційних методів формування динамічних моделей комп'ютерно-інтегрованих систем з урахуванням альтернативностей їх можливих форм;
- аналіз можливостей та розвиток методів параметричної редукції математичних моделей задач динаміки з урахуванням вимог до їх адаптації до особливостей об'єкта моделювання;
- розробка та дослідження метода спрощення базових математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді диференціальних рівнянь з частинними похідними;
- побудови та моделювання процесів функціонування адаптивних систем керування з використанням еталонної моделі об'єкта керування;
- розробка модельно-орієнтованих методів і структур систем діагностування на основі ідентифікаційного підходу;
- вибір та адаптація чисельних методів при створенні алгоритмів моделювання процесів в комп'ютерно-інтегрованих системах;
- розробка та апробація програмних засобів для реалізації обчислювальних алгоритмів моделювання.

**Об'єктом дослідження** є процеси функціонування комп'ютерно-інтегрованих динамічних систем.

**Предметом дослідження** є адаптаційні методи і засоби математичного та чисельного моделювання процесів функціонування технічних комп'ютерно-інтегрованих систем.

**Методи дослідження.** Для розв'язування поставлених задач у дисертації використовуються методи математичного моделювання динамічних систем; методи еквівалентного та апроксимаційного перетворення форм динамічних моделей, зокрема, методи математичної редукції; методи обчислювальної математики; методи теорії керування і діагностики; методи організації засобів комп'ютерного моделювання динамічних систем; методи обчислювальних експериментів при числовому дослідженні динамічних моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В рамках розв'язання проблеми створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем з урахуванням обмежених інформаційних ресурсів отримані наступні наукові результати.

Вперше запропоновано:

- метод еквівалентного перетворення диференціальних динамічних моделей до інтегральних (метод розділення з аналітичним розв'язком), який узагальнює відомі методи та дозволяє отримувати не тільки еквівалентні інтегральні рівняння, але низку ( $n-1$ ,  $n$  – порядок рівняння) еквівалентних моделей у вигляді інтегро-диференціальних рівнянь, що значно підвищує можливості адаптаційного вибору моделі;
- метод опорних перерізів апроксимаційного перетворення за інтерполяційним принципом моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді диференціальних рівнянь з частинними похідними до скалярних моделей у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь, розмір яких дорівнює кількості обраних опорних перерізів, що дозволяє отримати наближену модель із значно меншою складністю, ніж у випадку вихідної моделі та забезпечити суттєве зменшення вимог до швидкодії комп'ютерних засобів при реалізації моделей;
- ідентифікаційний (модельний) метод діагностування неперервних систем за принципом виявлення наявності, місця і виду несправності шляхом побудови (ідентифікації) моделі поточного стану несправного фрагменту системи і порівняння значень її параметрів з їх номінальними значеннями; метод забезпечує виявлення широкого класу можливих несправностей при обмеженому доступі до внутрішніх елементів системи; розроблені основні теоретичні положення методу та основи алгоритмічної реалізації.

Удосконалено:

- підхід до вибору або створенню математичного опису об'єкта моделювання на основі альтернативності задіяних форм динамічних моделей, що забезпечує адаптаційні можливості побудови необхідної моделі за принципом «складність – якість», тобто отримання моделі мінімальної складності при заданих вимогах до показників якості (точності);
- модельний підхід до організації систем керування технічними об'єктами із застосуванням еталонної динамічної моделі, згідно з яким запропоновані параметричний, сигнальний та комбінований способи настроювання керуючого блоку у зворотному зв'язку системи, а також новий метод побудови керуючого каналу зворотного зв'язку з використанням еталонної моделі об'єкта керування, що формує керуючий вплив за принципом неперервного відслідковування поведінки моделі без застосування оптимізаційних обчислень;
- інтегральний підхід до математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем на основі застосування одновимірних непараметричних інтегральних динамічних моделей у вигляді операторів і рівнянь типу Вольтерра, які можуть бути побудовані як шляхом аналітичних перетворень, так і за експериментальними даними та забезпечують можливість моделювання об'єктів з зосередженими і розподіленими параметрами та чисельну реалізацію засобами візуального (структурно-алгоритмічного) програмування.

Набули подальшого розвитку:

- метод адаптаційного визначення алгоритмів чисельної реалізації диференціальних динамічних моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь на основі запропонованих критеріїв оптимальності обчислювальних схем,

що відповідають заданим вимогам щодо швидкодії засобів комп'ютерної реалізації та точності результатів обчислень;

– ефективні та швидкодіючі квадратурні алгоритми чисельної реалізації інтегральних динамічних моделей у вигляді рівнянь Вольтерра II роду на основі застосування резольвенти, що забезпечують можливість побудови і реалізації явних інтегральних динамічних макромоделей, які реалізуються у вигляді сукупності числових масивів, зв'язаних між собою відповідними обчислювальними операціями; задіяний резольвентний чисельний метод розв'язання інтегральних рівнянь дозволяє при апроксимації дискретних залежностей отримувати явні моделі у аналітичній формі.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Створені засоби алгоритмічного та програмного забезпечення процесів моделювання динаміки комп'ютерно-інтегрованих систем забезпечують ефективну комп'ютерну реалізацію отриманих видів динамічних моделей з можливістю адаптивного вибору алгоритмів відповідно до властивостей конкретних задач, можливість використання швидких стійких рекурентних і високоточних процедур чисельного розв'язання диференціальних та інтегральних рівнянь. Запропоновані методи моделювання та комп'ютерні засоби дозволяють забезпечити якісне відтворення властивостей, характеристик і параметрів широкого класу комп'ютерно-інтегрованих систем. Розроблений пакет прикладних програм, реалізований в моделюючому середовищі Матлаб і призначений для дослідження та забезпечення процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем як у лабораторних дослідженнях, так і в умовах застосування в реальних системах із забезпеченням умов керування та діагностики. В роботі вирішено наступні прикладні задачі, що представлені у додатках: «Побудова спрощених математичних моделей при дослідженні силової установки з газовим приводом і системою керування» (додаток А); «Комп'ютерне моделювання бурильної колони бурової установки» (додаток Б); «Моделювання електромагнітних процесів та енергетично ефективних режимів роботи надпровідникових СЕУ» (додаток В); «Точнісна параметрична редукція моделі динаміки літака» (додаток Г); «Розробка спрощеної математичної моделі газотурбінного двигуна за каналом подачі палива» (додаток Д). Основні результати роботи та основні положення, які виносяться на захист, пройшли апробацію при розв'язанні модельних і практичних задач.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (акти впровадження наведено у додатку Е) у Науково-виробничому ТОВ «Прайм енерджи 2019», ТОВ «Мікросистеми експрес телеком», Науково-виробничому ТОВ "Інфотех", ТОВ «Оліс», а також впроваджені у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Одеського національного політехнічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримано автором самостійно. Роботи [2, 15, 20, 25, 26, 27, 40,



44, 46, 47, 48, 49, 60, 63, 73, 75, 92] написано самостійно. В опублікованих із співавторами здобувачеві належить наступний особистий внесок: [1] – методи чисельної реалізації інтегральних динамічних моделей мехатронних комп'ютерно-інтегрованих систем; [3] – алгоритм реалізації методу послідовних наближень при вирішенні нелінійного інтегрального рівняння Урисона; [4] – підхід до побудови квадратурних алгоритмів; [5] – підхід до моделювання однопараметричних первинних перетворювачів; [6] – підхід до моделювання багатопараметричних первинних перетворювачів; [7] – метод пониження порядку моделі, що забезпечує стаціонарно точну модель без використання методів пошуку; [8] – підхід до побудови інтегральних моделей систем з розподіленими параметрами; [9] – підхід до розв'язання систем інтегро-диференціальних рівнянь з використанням квадратурної формули; [10] – методи побудови фізико-статистичних моделей відмов радіоелектронних пристроїв; [11] – методи класифікації дефектів емісії в задачі моделювання систем діагностики; [12] – аспекти використання методу коллокації для розв'язання інтегральних рівнянь; [13] – математична модель системи захисту від ємнісних струмів витoku; [14] – безперервна кусочно-лінійна модель в рівняннях динаміки керованого руху; [16] – лінійні моделі електроприводу – моделі замкнутих систем; [17] – лінійні моделі електроприводу – моделі систем з фільтрами в ланцюзі зворотного зв'язку; [18] – нелінійні моделі електроприводу – нелінійні моделі із урахуванням нелінійностей системи управління тиристорами; [19] – об'єктно-орієнтована організація інтелектуальних систем комп'ютерного моделювання; [21] – метод спрощення динамічної моделі із забезпеченням умови стаціонарної точності за допомогою модельних експериментів; [22] – спосіб послідовного інтегрування при моделюванні нестационарних безперервних об'єктів; [23] – обчислювальні алгоритми розрахунку лінійних інтегральних динамічних моделей на основі квадратурних формул; [24] – автоматична побудова математичної моделі технологічних процесів та їх оптимізація; [28] – інтегральний метод при вирішенні задач параметричної ідентифікації за наявності похибки у вихідних даних; [29] – метод регуляризації введенням множника за заданим правилом, що забезпечує стійкий, достовірний розв'язок; [30] – спеціалізовані програмно-апаратні засоби інтегрованої системи захисту; [31] – метод розв'язання задачі декомпозиції структури комп'ютерної мережі; [32] – квадратурні алгоритми відкритого типу; [33] – розвиток підходу, заснованого на комп'ютерній реалізації багатозв'язних динамічних систем; [34] – метод локалізації несправних електронних модулів на основі принципу декомпозиції; [35] – метод статистичного моделювання та алгоритм обробки його результатів; [36] – основні теоретичні положення модельного методу ідентифікаційних експериментів; [37] – підхід до вибору оптимального методу розв'язання диференціальних рівнянь для систем моделювання; [38] – процедура модельного конструювання оптимальних регуляторів для нелінійних динамічних систем; [39] – модельний метод локалізації несправних електронних підсистем; [41] – спосіб формування нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерра другого роду; [42] – розвиток методу рядів Вольтерра для моделювання нелінійних систем з ввідними періодичними сигналами; [43] – RID-моделі в логіко семантичному

представленні нечіткої системи; [45] – спосіб розпаралелювання чисельного рішення двовимірного неоднорідного рівняння теплопровідності; [50] – високоточностний метод чисельної реалізації математичних моделей нестационарних теплових процесів при несиметричних граничних умовах I-II роду; [51] – швидкодіючий метод апроксимації функцій поліномами, що містять дрібно-степеневі члени в проблемі моделювання динаміки складних систем; [52] – метод локалізації несправних підсхем за принципом декомпозиції; [53] – розвиток модельно-орієнтованого методу діагностування технічних систем; [54] – алгоритмів редукції в просторі параметрів; [55] – досліджено можливість підвищення точності моделювання при застосуванні квадратурних формул для реалізації інтегральних макромоделей у вигляді рівнянь Вольтери; [56] – обґрунтування використання квадратурних алгоритмів для чисельної реалізації моделей об'єктів з розподіленими параметрами, застосування вироджених ядер; [57] – математична модель процесу відтоку газового струменя; [58] – підходи до редукції математичних моделей за коефіцієнтом узгодженості характеристик моделей і точності вихідних даних; [59] – способи отримання спрощених моделей за критеріям адекватності і точності по відношенню до базової моделі; [61] – інтегро-квадратурний алгоритм в проблемі моделювання динаміки систем вимірювання; [62] – підхід до оптимального вибору чисельних методів розв'язання динамічних рівнянь в проблемах моделювання систем управління з вбудованими інструментами обчислення; [64] – спосіб вибору параметрів регуляризованих зв'язків ланцюгів обчислювальних засобів, що моделюються; [65] – клас моделей динамічних об'єктів у формі інтегральних макромоделей, що побудовані на принципі «вхід-вихід»; [66] – метод моделювання, що відрізняється від відомих урахуванням додаткового руху і узгодження точності вихідних даних і збурень параметрів з необхідною точністю оцінок показників якості; [67] – підхід до моделювання динаміки силових ланцюгів з використанням узагальненого простору станів моделі; [68] – використання неявних моделей при моделюванні динаміки енергосистем; [69] – чисельна реалізація неявних інтегральних моделей динамічних об'єктів в реальному часі; [70] – підхід до моделювання динаміки силових систем енергетичного призначення з використанням узагальненої моделі простору-стану; [71] – розвиток чисельних методів для сингулярних систем; [72] – моделі енергетично ефективних режимів роботи надпровідникових систем енергозабезпечення; [74] – модельний метод формуючого фільтра стосовно до задачі ідентифікації; [76] – адаптивні квадратурні алгоритми в проблемі моделювання складних енергетичних систем; [77] – підхід до формування динамічних моделей складних сингулярних енергетичних систем; [78] – модель динаміки силової газової установки у вигляді системи нелінійних диференціальних і алгебраїчних рівнянь; [79] – математична модель систем спостереження у вигляді системи трьох інтегральних рівнянь Фредгольма I роду; [80] – квадратурна реалізація динамічної моделі у вигляді оператора згортки з експоненційно-ступеневими ядрами; [81] – підхід до адаптації сучасних методів та засобів моделювання систем навчання; [82] – організація повномасштабних імітаторів рухомих об'єктів у нелінійній постановці, включаючи вибір

математичної моделі; [83] – підхід до оптимального вибору чисельних методів розв'язання рівнянь динаміки в проблемах моделювання систем управління з вбудованими інструментами обчислення; [84] – редуційний підхід до вирішення задачі математичного та комп'ютерного моделювання об'єктів з розподіленими параметрами; [85] – підхід до побудови математичних моделей вимірювальних систем на основі алгоритму цифрової фільтрації; [86] – принцип спрощення моделей динаміки; [87] – апроксимаційна модель бурильної колони у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь, комп'ютерна оборотна модель; [88] – розвиток методу моделювання динамічних процесів в енергетичних системах з урахуванням реальних характеристик складових елементів; [89] – чисельні перешкодостійкі алгоритми, що реалізують інтегральний метод ідентифікації динамічних об'єктів; [90] – математичні та комп'ютерні методи дослідження процесів в нелінійних і багатозв'язкових динамічних системах, що описуються інтегральними та інтегро-диференціальними моделями; [92] – математичні моделі функціонування газотранспортних установок енергетичного призначення; [93] – адаптація чисельних методів при створенні алгоритмічних основ реалізації математичних моделей динамічних процесів в автономних енергетичних силових установках.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних, всеукраїнських та регіональних конференціях: NEU-CEE-2004, Second International Symposium on Electrical, Electronic & Computer Engineering, IEEE, TRNC, Lefkosa: 2004; 6<sup>th</sup> International Conference Control of Power System, Slovakia, 2004; междунар. конф. "Информационные технологии в управлении энергетическими системами" ИТУЭС-2005; Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2006, Tashkent, Uzbekistan, November 21–22, 2006; ISEECE 2006, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Electrical, Electronic and Engineering, IEEE, November 23–25, 2006, Nicosia, North Cyprus; Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Республиканская научно-техническая конференция, Институт математики и информационных технологий АН РУз, Ташкент, 2011; IV міжнародна наукова конференція “Моделювання-2012 / Simulation-2012”, Київ: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2012 р.; Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: V міжнар. наук. конф., Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2012; Проблемы энерго и ресурсосбережения, Республиканская научно-техническая конференции АНРУз, Ташкент, 22–23 декабря 2014 г.; The 11th International Conference on Multimedia Information Technology and Applications, June 30–July 2, 2015, Tashkent, Uzbekistan, organized by the Korea Multimedia Society (KMMS), the Republic of Korea, IEEE; 5th International Scientific Conference «Signal and non-Gaussian noise processing», Cherkasy State Technological University, May 20–22, 2015; XX International Scientific Practical Conference “Innovation-2015”, October 23–24, 2015, Tashkent, Uzbekistan; Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: 7-ма Міжнародна наукова конференція OPTIMA, Кам'янець-Подільський

національний університет імені Івана Огієнка, 21–22 квітня 2016; The 6th Conference on Learning Factories. Norwegian University of Science and Technology, published by Elsevier, 2016, *Procedia CIRP (Published by Elsevier, ScienceDirect® and Scopus® are registered trademarks of Elsevier, Web of Science)*; Ninth World Conference “Intelligent systems for industrial automation”, WCIS-2016, Abu Rayhan Beruni Tashkent State Technical University, Oct. 25–27, 2016, Tashkent; Міжнародна наукова конференція Питання оптимізації обчислень ISCOPT-2017, Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ, Кам’янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 26–28 вересня 2017 р., Київ: 2017; The XXII International Scientific and Practical Conference "Innovation-2017", Tashkent State Technical University, Center for Strategic Innovation and Informatization, Uzbekistan: Navruz, Oct.26–27 2017; 7TH International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE 2017), University of National and World Economy (UNWE), Sofia, Bulgaria, November 3–4, 2017; Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації, 8-ма Міжнародна наукова конференція, Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 18–20 квітня 2018 р.; IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20–24, 2018, Lviv, Ukraine. IEEE 2018 ISBN 978-1-5386-2556-9. (IEEE, видання включене до наукометричної бази SCOPUS).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 93 наукових праць, 1 монографія [1], 65 статей у наукових фахових виданнях [2–66] (з них 10 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз [57–66]), 21 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій [67–87], 6 статей в іншому виданні [88–93] (4 публікації проіндексовані в IEEE [67, 72, 77, 87], 2 публікації проіндексовані в Scopus [81, 87]), одноосібних публікацій 16.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається із анотації, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (234 найменування) та 6-ти додатків. Загальний обсяг дисертації складає 467 сторінок, в тому числі 293 сторінки основного тексту, включаючи 20 таблиць та 44 рисунки; обсяг додатків складає 130 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику роботи, актуальність проблеми, мету та завдання дослідження, відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, відзначені наукова новизна й практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві, відомості про апробацію результатів роботи.

**У першому розділі** розглянуто особливості комп'ютерно-інтегрованих систем як об'єктів моделювання, традиційні підходи до математичного моделювання динаміки силових енергетичних установок та основні підходи до побудови методів моделювання та функціонального забезпечення об'єктів, що розглядаються. До комп'ютерно-інтегрованих систем будемо відносити широкий

клас технічних об'єктів енергетичного, промислового, транспортного та іншого призначення. У роботі мається на увазі, що, перш за все, до цього класу об'єктів відносяться силові енергетичні установки різного виконання та застосування, до яких підвищились вимоги щодо функціональності та надійності таких установок, покращення їх динамічних характеристик, розвитку підсистем контролю та діагностики, розширенню та ускладненню функцій керування із застосуванням нових смарт-технологій. Тому науково-технічна проблема створення та подальшого розвитку методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в комп'ютерно-інтегрованих системах, зокрема в автономних енергетичних силових установках та їх системах керування, діагностики для розв'язання задач аналізу, синтезу та побудови засобів керування, є актуальною.

Характерним прикладом є електромеханічна система мехатронного типу, функціональна схема якої приведена на рис.1. Вона включає три підсистеми: 1 – інформаційну, 2 – енергоелектронну і 3 – електромеханічну.

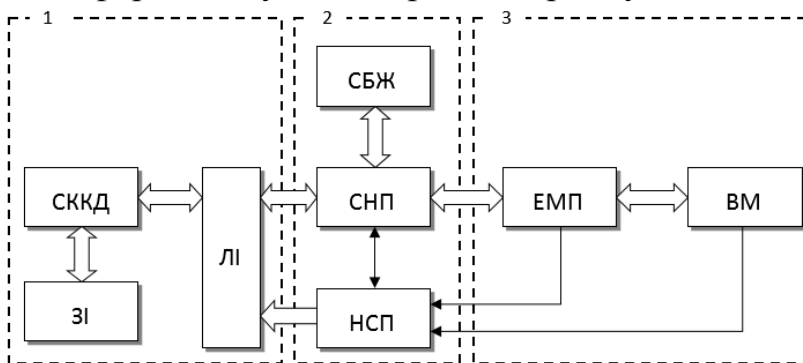


Рис. 1 - Електромеханічна система мехатронного типу

*Інформаційна* підсистема містить систему керування, контролю і діагностики (СККД), набір сенсорних пристроїв (ЗІ), локальний інтерфейс (ЛІ) та зовнішній інтерфейс (ЗІ).

*Енергоелектронна* підсистема включає силовий напівпровідниковий перетворювач (СНП) і силовий блок

живлення (СБЖ). *Електромеханічна* підсистема містить виконавчий механізм (ВМ) і електромеханічний перетворювач (ЕМП).

Наведені в роботі приклади об'єктів моделювання свідчать про те, що суттєвими особливостями сучасних автономних силових установок, поряд із зростанням складності структур і режимів і підвищенням вимог до якості функціонування, є наявність ланок з розподіленими параметрами та комп'ютерних компонентів керування, контролю та діагностики. Зазначені особливості комп'ютерно-інтегрованих систем викликають появу нових вимог до методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів в енергетичних силових установках, зокрема необхідність застосування макромоделей, побудови моделей за експериментальними даними, підвищення адекватності математичних моделей за рахунок раціонального врахування розподіленості параметрів.

Традиційно задачі моделювання динаміки силових енергетичних установок ґрунтуються на застосуванні диференціальних моделей. Виникаючі при цьому утруднення стосуються накопичення похибок та складностей при моделюванні ланок з розподіленими параметрами, трудомісткості процедур зміни структур комп'ютерних моделей при відображенні відповідних змін в об'єкті моделювання. До ефективних шляхів розв'язання зазначених проблем відноситься розвиток та

розширене застосування оптимізаційного і адаптаційного підходу до формування алгоритмів та програмних засобів, залучення динамічних моделей у вигляді інтегральних операторів та інтегральних рівнянь, які володіють рядом таких позитивних властивостей, як висока універсальність (структура моделі залишається незмінною, а властивості об'єкта задаються однією функцією – ядром інтегрального оператора), потенційно висока адекватність процесів моделювання, властивість згладжування експериментальних даних.

При побудові детальних нелінійних динамічних моделей силових установок застосовуються спрощені математичні моделі, наприклад у вигляді:

$$\frac{d}{dt}\Delta x = A\Delta x + B\Delta u,$$

$$y = C\Delta x + D\Delta z,$$

де  $\Delta x$  – вектор відхилень від стаціонарного стану (збурень) змінних стану системи,  $\Delta u$  – вектор відхилень керувань,  $y$  – вектор спостережень, а  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  – матриці відповідної розмірності. Моделі отримуються методами ідентифікації їх параметрів.

Пошук можливостей для покращення існуючих методик моделювання пов'язаний з вирішенням задач побудови динамічних моделей процесів в фізичній частині комп'ютерно-інтегрованої системи, вибором та удосконаленням методів побудови підсистеми керування та діагностики, а також розробкою відповідних чисельних алгоритмів для реалізації моделей та розробки необхідних прикладних засобів.

Як математичні моделі так і алгоритми повинні мати можливості для врахування вимог до комп'ютерно-інтегрованих систем. Відмічені обставини обґрунтовують доцільність такої якості методів моделювання, як альтернативність форм динамічних моделей, згідно з якою один і той же об'єкт може бути описаний різними формами моделей, аналітично еквівалентних чи не еквівалентних (наближених) між собою. Ефективним підходом є використання певних видів інтегральних операторів і рівнянь.

Підхід до побудови фізичної частини системи оснований на методах спрощення моделей. Перспективним напрямком розвитку методів організації систем керування є їх побудова з використанням моделі об'єкту, тобто еталонної моделі. Створення алгоритмів та розробка програмних засобів призначені для забезпечення необхідних обчислювальних експериментів при побудові відзначених вище методів математичного моделювання. В цілому, з урахуванням сумісності наукового та інженерно-технічного характеру досліджень в розробках методів моделювання, доцільне застосування структурного підходу.

У **другому розділі** розглянуто основні види динамічних моделей, проведено аналіз методів еквівалентного перетворення скалярних динамічних моделей, розглянуто методи вирішення задачі апроксимаційного перетворення динамічних моделей на основі запропонованого принципу спрощення і корегування.

При розв'язуванні практичних задач моделювання комп'ютерно інтегрованих систем доводиться шукати компроміс між складністю отриманої

математичної моделі та необхідною точністю. При цьому вибір моделі може вестися в рамках одного виду рівнянь, або шляхом порівняння моделей.

Розповсюдженими на практиці формами скалярних динамічних моделей є диференціальні рівняння, передатні функції, частотні характеристики, дискретні  $z$ -передатні функції, макромоделі, структурно-функціональні моделі. Первинною формою є, як правило, диференціальні рівняння. Наприклад, у лінійному випадку це система диференціальних рівнянь кінцевого порядку  $k$ :

$$\begin{aligned} a_k(t)y^{(k)}(t) + a_{k-1}(t)y^{(k-1)}(t) + \dots + a_0(t)y(t) = \\ = b_l(t)x^{(l)}(t) + b_{l-1}(t)x^{(l-1)}(t) + \dots + b_0(t)x(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

де набори  $\{a_k(t), a_{k-1}(t), \dots, a_0(t)\}$  і  $\{b_l(t), b_{l-1}(t), \dots, b_0(t)\}$  складаються з матриць розмірності  $n \times n$  і  $n \times m$  відповідно.

Використання інтегральних динамічних моделей у вигляді інтегральних операторів і рівнянь типу Вольтерри, структура яких не залежить від того, моделюється об'єкт із зосередженими чи з розподіленими параметрами. Вони ефективно будуються за експериментальними даними з наявністю високочастотних завад у вихідних даних.

Лінійна багатоканальна система керування описується багатовимірним лінійним інтегральним рівнянням Вольтерри II роду

$$k(t)y(t) + \int_{t_0}^t K(t, \tau)y(\tau)d\tau = l(t)x(t) + \int_{t_0}^t L(t, \tau)x(\tau)d\tau + f(t, t_0), \quad (2.2)$$

де  $y(t) = (y^1(t), y^2(t), \dots, y^n(t))^T$  –  $n$ -вимірний вектор вихідних сигналів (реакцій) системи;  $x(t) = (x^1(t), x^2(t), \dots, x^m(t))^T$  –  $m$ -вимірний вектор вхідних (керуючих) впливів на систему;

$$K(t, \tau) = \begin{pmatrix} K_{11}(t, \tau) & K_{12}(t, \tau) & \dots & K_{1n}(t, \tau) \\ K_{21}(t, \tau) & K_{22}(t, \tau) & \dots & K_{2n}(t, \tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1}(t, \tau) & K_{n2}(t, \tau) & \dots & K_{nm}(t, \tau) \end{pmatrix}; L(t, \tau) = \begin{pmatrix} L_{11}(t, \tau) & L_{12}(t, \tau) & \dots & L_{1m}(t, \tau) \\ L_{21}(t, \tau) & L_{22}(t, \tau) & \dots & L_{2m}(t, \tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}(t, \tau) & L_{n2}(t, \tau) & \dots & L_{nm}(t, \tau) \end{pmatrix};$$

$K(t, \tau)$ ,  $L(t, \tau)$  – ядра інтегральних операторів Вольтерри, що відображають динамічні характеристики ланок системи, а також функції

$$k(t) = \begin{pmatrix} k_{11}(t) & k_{12}(t) & \dots & k_{1n}(t) \\ k_{21}(t) & k_{22}(t) & \dots & k_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1}(t) & k_{n2}(t) & \dots & k_{nm}(t) \end{pmatrix}; \quad l(t) = \begin{pmatrix} l_{11}(t) & l_{12}(t) & \dots & l_{1m}(t) \\ l_{21}(t) & l_{22}(t) & \dots & l_{2m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{n1}(t) & l_{n2}(t) & \dots & l_{nm}(t) \end{pmatrix};$$

$k(t)$ ,  $l(t)$  – з'являють собою матриці розміру  $n \times m$ ;  $t_0$  – момент початку функціонування системи (подачі керуючого впливу);  $t$  – поточний момент часу.

$f(t, t_0) = (f^1(t, t_0), f^2(t, t_0), \dots, f^n(t, t_0))^T$  – вільний член, що містить всю інформацію, необхідну для однозначного знаходження  $y(t)$  для всіх  $t \geq t_0$ .

Типовим блоком приведеної структурної моделі є матриця  $n \times m$  модулів (рис. 2.1), кожен з яких реалізує інтегральний оператор Вольтерри з ядром  $L_{nm}(t, \tau)$ .

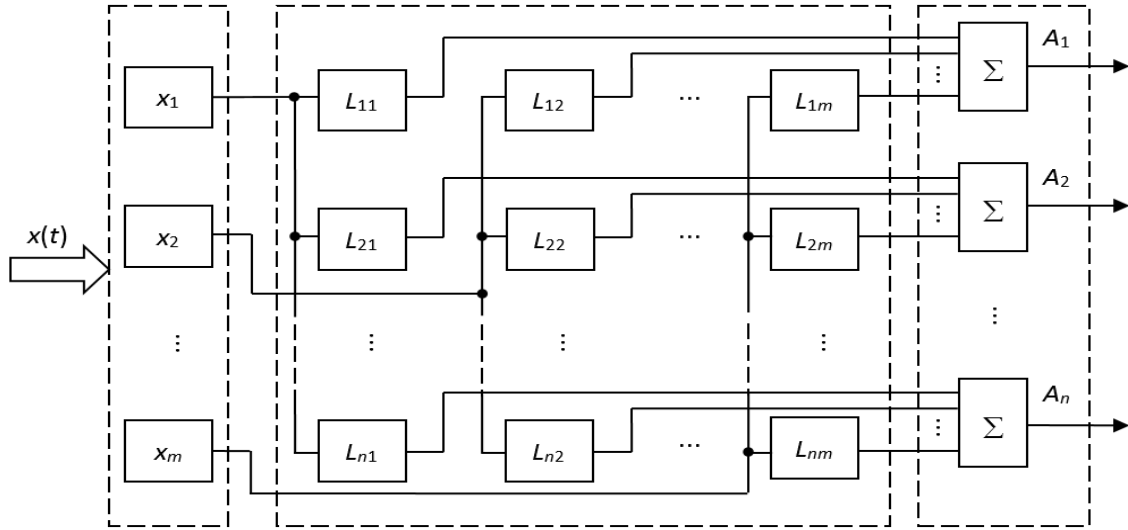


Рис. 2.1. Структура інтегрального модуля моделі багатоканальної керованої електромеханічної системи

Важливим методом вияву специфічних властивостей моделей і можливостей чисельної реалізації є представлення їх в різних еквівалентних формах, що потребує розвитку методів еквівалентного перетворення.

Розглянуто ряд методів еквівалентного перетворення динамічних моделей, зокрема запропоновано *метод перетворення з розщепленням*. Відома модель динамічного об'єкта у вигляді рівняння

$$D[y] = y^{(n)}(x) + \sum_{i=1}^n a_i y^{(n-i)}(x) = f(x), \quad y^{(i)}(0) = C_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (2.3)$$

або в операторній формі  $D[y] = f$ . Для отримання ряду еквівалентних інтегральних динамічних моделей розщеплюємо оператор  $D = D_1 + D_2$  і отримуємо диференціальне рівняння  $D_1[y] = \psi$ , де  $\psi(x) = f(x) - D_2[y]$ . Виконуючи аналітичний розв'язок рівняння, отримаємо розв'язок  $y = D_1^{-1}[\psi]$ , який є інтегральним (або інтегро-диференціальним) рівнянням.

Для рівняння  $y^{(n)}(x) + \sum_{i=1}^m a_i y^{(n-i)}(x) = f(x) - \sum_{i=m+1}^n a_i y^{(n-i)}(x)$ , після заміни змінних  $u(x) = y^{(n-m)}(x)$ ,  $u'(x) = y^{(n-m+1)}(x), \dots, u^{(m)}(x) = y^{(n)}(x)$  отримуємо диференціальне рівняння  $m$ -го порядку  $u^{(m)}(x) + \sum_{i=1}^m a_i u^{(n-i)}(x) = \psi(x)$ , де

$\psi(x) = f(x) - \sum_{i=m+1}^n a_i y^{(n-i)}(x)$ , використовуючи фундаментальний розв'язок якого

отримуємо інтегральне рівняння з ядром експоненціального виду  $u(x) = e^{Ax} u_0 + \int_0^x e^{As} \Phi(a, u, s) ds$ , де  $u(x) = [u'(x), u''(x), \dots, u^{(m)}(x)]$ ,

$u_0 = [u'(0), u''(0), \dots, u^{(m)}(0)]$ ,  $\Phi(a, u, s) = [0, 0, \dots, \psi(x)]$ , а відповідна матриця  $A$  має



порядок  $m$ . Для розв'язування інтегральних рівнянь є достатня кількість чисельних методів.

Апроксимаційне спрощення динамічних моделей виконується за принципом, згідно з яким для відомої моделі об'єкта  $Y = L(A)X$ , де  $L(A)$  – відомий оператор, розв'язується задача оцінювання параметрів  $A = (a_1, \dots, a_s)$ , або задача параметричної ідентифікації згідно з обраною функцією неузгодженості або якості математичної моделі  $\delta(A) = \|Y_0(t) - L(A)X\|$ , де  $Y_0(t)$  – вектор виходів об'єкта.

На практиці задача оцінювання параметрів оператора  $A$  моделі формулюється як екстремальна задача пошуку мінімуму  $\delta(A^*) = \min_{A \in \Theta} \delta(A)$ , де  $A^*$  – точки мінімуму. Задача корегування математичної моделі  $Y(t) = L(A_0)X(t)$  ставиться як задача уточнення вихідних числових параметрів  $A_0$  за  $X, Y$ , які належать заданій області  $D$ , до таких значень  $\tilde{A} \in \Theta$ , для яких критерій якості  $\delta(A)$  задовольняє умові  $\delta(\tilde{A}) \leq \Delta$ , де  $\Delta$  – необхідна точність.

На основі аналізу підходів до структурного спрощення динамічних об'єктів з розподіленими параметрами, з точки зору простору змінних, в яких відбувається спрощення моделі, розглянуто дві множини підходів до спрощення моделей: побудова спрощеної моделі за критерієм близькості показників якості вихідної і спрощеної моделі в просторі зображень та в просторі станів. Інтерполяційний підхід до спрощення моделей динамічних об'єктів з розподіленими параметрами є ефективним та перспективним.

У **третьому розділі** розглянуті способи спрощення математичних моделей; визначено принцип «точностної» параметричної редукції математичних моделей; запропоновано основи алгоритмізації «точностної» параметричної редукції та підхід до програмної реалізації процесів редукції моделей динамічних систем.

Збільшення точності математичного моделювання досліджуваних об'єктів призводить до зростання обчислювальної складності моделей, які використовуються. Ступінь складності математичних описів динаміки спричиняє значний вплив на можливості моделювання в реальному часі процесів комп'ютерно-інтегрованих систем. При створенні останніх, реальним шляхом зниження вимог до швидкодії комп'ютерної частини є застосування замість складних математичних моделей більш простих, але таких, що зберігають в певному сенсі, інформативність результатів моделювання.

Питання спрощення (*редукції*) математичних описів об'єктів пов'язане із задачею *ідентифікації* та застосуванням *прийомів ідентифікації* для побудови *спрощених описів*.

Задача редукції моделі об'єкта з  $n$  входами  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(x_1, \dots, x_n)$  та  $m$  виходами  $\mathbf{y} = \mathbf{y}(y_1, \dots, y_m)$  ставиться як задача про уточнення або визначення параметрів  $\alpha$  оператора  $A$  математичної моделі  $\mathbf{Y} = A(\alpha)\mathbf{x}$ , причому  $\alpha$  визначається з умови  $\inf_{\alpha} \|Y_0 - A(\alpha)\mathbf{x}\|$  близькості моделі та об'єкта, точна модель якого – вектор-функція  $\mathbf{Y}_0 = \mathbf{Y}_0(x) = [y_1^0(x_1, \dots, x_n), \dots, y_m^0(x_1, \dots, x_n)]^T$ . Зроблено наступні визначення. В якості

міри наближення вектора  $\mathbf{Y}_M$  до вектора  $\mathbf{Y}_0$  обирається найбільш релевантна міра в залежності від вимог до моделі: рівномірна міра точності  $\max_j |y_j^M - y_j^0|_{x \in D} \leq \delta$ , де  $D$  – область зміни  $x(x_1, \dots, x_n)$ ,  $\delta$  – елемент вектора  $\mathbf{\Delta}$ , який відповідає певному, наперед прийнятому критерію (наприклад, мінімальний з усіх, тобто,  $\delta = \min_j (\delta_j)$ ,  $j = \overline{1, m}$ ); середньоквадратична міра  $\max_j \sum_{i=1}^N (y_j^M(x^{(i)}) - y_i^0(x^{(i)}))^2 \leq \delta$ , де  $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}) \in D$ ; або ймовірнісна міра  $\min_A M[\rho(\mathbf{Y}_M, \mathbf{Y}_0)]$ , де  $M[\cdot]$  – символ математичного очікування,  $\rho(\mathbf{Y}_M, \mathbf{Y}_0)$  характеризує неузгодження між векторами  $\mathbf{Y}_M$  и  $\mathbf{Y}_0$ .

Загальну і конструктивну постановку задачі спрощення математичних моделей на основі ідеї узгодження виду моделі з точністю вихідних даних сформулюємо як задачу мінімізації функціоналу складності на класі моделей, які формально можна співставити за точністю зі спостереженнями (вихідними даними). Клас моделей, які формально можна співставити, визначається обмеженням типу нерівності на міру точності.

Можливість застосування математичної моделі  $M$  або  $M'$  визначається умовою  $\varepsilon_{yM} + \varepsilon_{y\rho} \leq \varepsilon_3$ , де  $\varepsilon_{yM}$  – або міра похибки опису досліджуваного явища моделлю  $M$ , або міра похибки, зумовленої заміною заданої моделі  $M$  на якусь іншу  $M'$  (в тому числі більш просту),  $\varepsilon_{y\rho}$  – міра похибки вихідних (початкових) змінних вихідної моделі, зумовленої неточністю вихідних даних, тобто наявністю  $\varepsilon_\rho$ ,  $\varepsilon_3$  – задане значення міри похибки моделювання. Під  $\varepsilon_{yM}$  будемо розуміти саме міру похибки, зумовлену заміною початкової моделі більш простою. В якості характеристики узгодження з похибкою вихідних даних моделі  $M'$ , що заміняє модель  $M$ , приймемо величину  $\alpha = \varepsilon_{yM} / \varepsilon_{y\rho}$ , яку будемо називати коефіцієнтом узгодженості. При цьому умова застосування моделі  $M'$  набуває вигляду  $(\alpha + 1) \varepsilon_{y\rho} \leq \varepsilon_3$ .

Математична модель  $M'$  називається  $\alpha$ -узгодженою з похибкою вихідних даних  $\varepsilon_\rho$  моделі  $M$ , якщо  $\varepsilon_{yM} = \alpha \varepsilon_{y\rho}$  та  $\alpha > 0$ . Задача узгодження моделі  $M$  з точністю вихідних даних означає отримання моделі  $M'$  з певним значенням коефіцієнту узгодженості. Максимальне значення коефіцієнту узгодженості визначається як  $\alpha_{\max} = (\varepsilon_3 / \varepsilon_{y\rho}) - 1$ . Нехай  $N_M$  – міра обчислювальної складності математичної моделі  $M$ ,  $\mu_\alpha$  – множина математичних моделей, коефіцієнт узгодженості яких з похибкою вихідних даних не перевищує  $\alpha$ . Якщо  $\alpha < \alpha_{\max}$ , то всі моделі з  $\mu_\alpha$  еквівалентні в смислі можливості застосування. В той самий час, моделі з  $\mu_\alpha$ , можуть бути нееквівалентними в смислі обчислювальної складності. Саме при цій умові і з'являється можливість спрощення заданої моделі  $M$  шляхом її заміни на модель  $M' \in \mu_\alpha$ , для якої  $N_{M'} < N_M$ .

Математична модель  $M'_0$  називається *оптимально спрощеною*, якщо

$$N_{M'_0} = \min_{M' \in \mu_\alpha} N_{M'}.$$

Сформульовано і доведено твердження, що є теоретичним обґрунтуванням можливості застосування параметричного підходу до побудови спрощених математичних моделей на основі узгодження виду моделей з точністю вихідних даних: для будь-якого  $\Omega_\rho = \{\rho: \rho_\rho(\rho_3, \rho) \leq \varepsilon_\rho, \varepsilon_\rho > 0\}$  існує  $\alpha_0 > 0$  таке, що при  $\alpha > \alpha_0$  в множині  $\mu_\alpha$   $\alpha$ -узгоджених з похибкою вихідних даних коректних моделей  $M(\mathbf{y}, \mathbf{V}, \rho)$ , що визначається множиною параметрів  $\Omega_\rho(\alpha) = \{\rho: \rho_y(\rho_3, \rho) \leq \alpha \varepsilon_{y\rho}\}$ , міститься непуста множина  $\bar{\mu}_\alpha$ , моделей  $M(\mathbf{y}, \mathbf{V}, \bar{\rho})$  для яких  $(N_{\bar{\rho}} < N_\rho / \rho) \in \Omega_\rho$ . А факт існування  $\alpha$ -узгоджених моделей з меншим значенням міри обчислювальної складності ніж вихідна (початкова) модель, що визначається даним твердженням, складає сутність принципу «точностної» параметричної редукції математичних моделей: для будь-якої моделі з неточно заданими параметрами, за умови, що похибка змінних на виході є зростаючою та обмеженою функцією від похибки параметрів, існує більш проста  $\alpha$ -узгоджена модель, яка відрізняється від початкової значеннями деяких параметрів, що зменшують міру обчислювальної складності.

На основі викладених підходів та теоретичного обґрунтування можливостей спрощення моделей запропоновано низку основних алгоритмів «точностної» параметричної редукції в просторі параметрів (практичне застосування можливо у випадках, коли можуть бути отримані в явному вигляді рівняння для похибки  $\Delta y$ , що не усувається) та в просторі змінних на виході (можливість застосування алгоритмів третьої групи визначається можливістю побудови області  $\Omega_{\Delta y}$ ),

Структура алгоритмів редукції в просторі параметрів визначається як сукупність основних блоків: 1 – визначення  $\mathbf{y}_3$  – реакції початкової моделі з параметрами  $\rho_3$  на обраному режимі моделювання; 2 – призначення вектора параметрів  $\rho_y$  за умови  $\|\mathbf{y}_y - \mathbf{y}_r\| \ll \|\mathbf{y}_3 - \mathbf{y}_r\|$ , де  $\mathbf{y}_y$  – реакція початкової моделі з параметрами на режимі моделювання; 3 – визначення  $\mathbf{y}_r$  – реакції редукційованої моделі на обраному режимі моделювання; 4 – визначення вектора параметрів  $\rho_y$  за умови  $\|\mathbf{y}_y - \mathbf{y}_r\| \ll \|\mathbf{y}_3 - \mathbf{y}_r\|$ , де  $\mathbf{y}_y$  – реакція початкової моделі з параметрами на режимі моделювання; 5 – оцінка виконання умови  $\rho_y \in \Omega(\alpha)$ , що еквівалентно оцінці коефіцієнту узгодженості  $\alpha$  за умови малості  $\Omega_\rho$ ; 6 – аналіз результатів редукції. У випадку, якщо результати редукції задовільні, то здійснюється завершення алгоритму, інакше – повергнення до другого блоку.

Структура алгоритмів редукції в просторі координат на виході визначається як сукупність основних блоків: 1 – визначення реакції початкової моделі на обраному режимі; 2 – оцінка області можливих розв'язків вихідної системи, зумовленої неточністю завдання вектору параметрів  $\rho_3$ , тобто. оцінка  $\varepsilon_{y\rho}$ ; 3 –

визначення вектору параметрів  $\mathbf{p}_3$  такого, що  $N_{pr} < N_{\rho_3}$  або, іншими словами – вибір редуційованої моделі; 4 – визначення реакції редуційованої моделі; 5 – оцінка відхилення  $\mathbf{y}_3 - \mathbf{y}_r$  і визначення значення коефіцієнта узгодженості; 6 – аналіз результатів редуції у випадку, якщо результати задовільні, з наступним переходом на сьомий блок, інакше – повернення до третього блоку; 7 – корекція редуційованої моделі.

Аналіз наведених структур алгоритмів: порівняльну оцінку їх властивостей в смислі обчислювальної складності дозволяє зробити висновок про пріоритетність алгоритмів «точностної» параметричної редуції в просторі координат на виході при спрощенні достатньо складних математичних моделей: Запропоновано структуру комплексу програм комп'ютерної реалізації алгоритмів «точностної» параметричної редуції в просторі параметрів і координат на виході.

У четвертому розділі запропоновано і розглянуто інтерполяційний метод (опорних перерізів) для моделювання об'єктів з розподіленими параметрами.

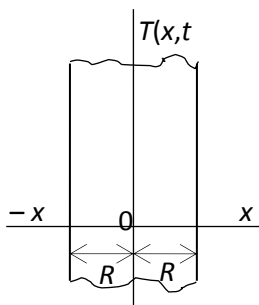


Рис. 4.1. Об'єкт моделювання

Запропонований метод розглянуто на прикладі задачі моделювання нестационарних теплових процесів в об'єкті з симетричними та несиметричними граничними умовами (Рис.4.1), проведено дослідження ефективності запропонованого методу. Метод дозволяє будувати ефективні моделі з більш простою структурою, тобто системи з невеликою кількістю скалярних диференціальних рівнянь, отриманих для малої кількості опорних перерізів. Задача описується рівнянням:

$$c(x)\rho(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + f(t), \quad -1 \leq x \leq 1,$$

де  $c(x)$  – питома теплоємність;  $\rho(x)$  – густина;  $k(x)$  – коефіцієнт теплопровідності;  $f(t)$  – внутрішнє джерело тепла;  $x$  – просторова координата, значення якої  $x = -1$  і  $x = 1$  відповідають координатам входу і виходу об'єкта;  $t$  – час, що дозволяє отримати модель теплоперенесення у вигляді рівняння параболічного типу:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a(x) \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + b(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + q(x) f(t), \quad -1 \leq x \leq 1,$$

у якому  $b(x) = \frac{k'(x)}{c(x)\rho(x)}$ ,  $q(x) = \frac{1}{c(x)\rho(x)}$ , а коефіцієнт температуропровідності

$a(x) = \frac{k(x)}{c(x)\rho(x)}$ . Припустимо, що розв'язок  $T(x,t)$  даного рівняння може бути

апроксимований рядом  $T(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) Q_n(x)$ , в якому функції  $V_n(t)$  і  $Q_n(x)$

підлягають визначенню, причому  $Q_n(x)$  повинні мати похідні другого порядку.

Тоді похідні  $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}$  можуть бути розвинені в ряд

$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) \frac{dQ_n(x)}{dx}$ ;  $\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) \frac{d^2 Q_n(x)}{dx^2}$ . Для апроксимації функції

$T(x,t)$  обмежимо ряд і побудуємо інтерполяційний поліном Лагранжа за п'ятьма опорними точками  $\{x_i\} = \left\{-1, -\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, 1\right\}$  (інтервал  $[-1,1]$  розбиваємо рівномірно

на 4 частини):  $T(x,t) \approx L_4(x,t) = \sum_{i=0}^4 T(x_i,t) \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^4 \frac{x-x_k}{x_i-x_k}$ . еручи до уваги, що

$T(-1,t) \equiv F_{ep1}^-(t)$  та  $T(1,t) \equiv F_{ep1}^+(t)$ , отримаємо

$$T(x,t) \approx \frac{1}{6}x(4x^3 - 4x^2 - x + 1)F_{ep1}^-(t) - \frac{4}{3}x(2x^3 - x^2 - 2x + 1)T\left(-\frac{1}{2},t\right) + \\ + (4x^4 - 5x^2 + 1)T(0,t) - \frac{4}{3}x(2x^3 + x^2 - 2x - 1)T\left(\frac{1}{2},t\right) + \frac{1}{6}x(4x^3 + 4x^2 - x - 1)F_{ep1}^+(t).$$

Продиференціювавши відповідну кількість разів за координатою  $x$ , отримаємо вирази для частинних похідних першого та другого порядку

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \approx \left(\frac{8}{3}x^3 - 2x^2 - \frac{1}{3}x + \frac{1}{6}\right)F_{ep1}^-(t) - \left(\frac{32}{3}x^3 - 4x^2 - \frac{16}{3}x + \frac{4}{3}\right)T\left(-\frac{1}{2},t\right) + \\ + 2x(8x^2 - 5)T(0,t) - \left(\frac{32}{3}x^3 + 4x^2 - \frac{16}{3}x - \frac{4}{3}\right)T\left(\frac{1}{2},t\right) + \\ + \left(\frac{8}{3}x^3 + 2x^2 - \frac{1}{3}x - \frac{1}{6}\right)F_{ep1}^+(t), \\ \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \approx \left(8x^2 - 4x - \frac{1}{3}\right)F_{ep1}^-(t) - \left(32x^2 - 8x - \frac{16}{3}\right)T\left(-\frac{1}{2},t\right) + \\ + 2(24x^2 - 5)T(0,t) - \left(32x^2 + 8x - \frac{16}{3}\right)T\left(\frac{1}{2},t\right) + \\ + \left(8x^2 + 4x - \frac{1}{3}\right)F_{ep1}^+(t).$$

Підставивши в (4.1) отримані вирази частинних похідних, отримаємо

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = W_1(x,a(x),b(x))F_{ep1}^-(t) + W_2(x,a(x),b(x))T\left(-\frac{1}{2},t\right) + \\ + W_3(x,a(x),b(x))T(0,t) + W_4(x,a(x),b(x))T\left(\frac{1}{2},t\right) + \\ + W_5(x,a(x),b(x))F_{ep1}^+(t) + q(x)f(t),$$

–  $W_5$  визначаються шляхом зведення спільних доданків і мають вигляд многочленів третього степеня змінної  $x$ . Вважаючи послідовно

$x \in \{x_i\} = \left\{-\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right\}$ ,  $i = \overline{1,3}$ , отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь

першого порядку для визначення невідомих  $T\left(-\frac{1}{2}, t\right)$ ,  $T(0, t)$  та  $T\left(\frac{1}{2}, t\right)$ , що розв'язується з початковими умовами  $F_{IV}(x_i)$ , які обчислюються із початкової умови задачі при відповідних значеннях  $x \in \{x_i\} = \left\{-\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right\}$ ,  $i = \overline{1,3}$ :

$$\begin{aligned} \frac{dT(x_i, t)}{dt} = & W_2(x_i, a(x_i), b(x_i))T\left(-\frac{1}{2}, t\right) + W_3(x_i, a(x_i), b(x_i))T(0, t) + \\ & + W_4(x_i, a(x_i), b(x_i))T\left(\frac{1}{2}, t\right) + W_1(x_i, a(x_i), b(x_i))F_{cp1}^-(t) + \\ & W_5(x_i, a(x_i), b(x_i))F_{cp1}^+(t) + q(x_i)f(t). \end{aligned}$$

(4.2) Розв'язок системи (4.2), таким чином, дозволяє обчислити наближені значення функції  $T(x, t)$  у будь-якій точці.

Апробація методу проведена шляхом обчислювального експерименту. Отримані результати використовувались для обчислення розв'язків для будь-яких значень просторової координати і для будь-якого моменту часу, результати представлені на рис. 4.2.

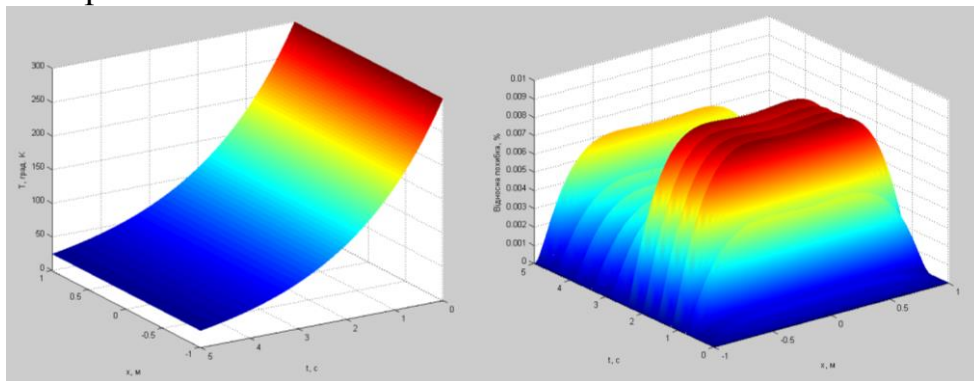


Рис. 4.2 Результати обчислювального експерименту – розв'язування модельної задачі та функції відносної похибки  $\delta(x, t)$

З метою дослідження ефективності числової реалізації математичних моделей методом опорних перерізів у порівнянні з традиційним методом скінченних різниць було проведено ряд обчислювальних експериментів, результати яких засвідчили: апроксимаційний метод показав значну перевагу (для різних випадків від 1,16 до 733 разів) за часом числової реалізації математичної моделі перед різницевою схемою. Проведений аналіз похибки методу згідно із запропонованим методом оцінки точності і методики вибору опорних перерізів (ряд обчислювальних експериментів із використанням в якості ряду інтерполяційного полінома Лагранжа) засвідчив, що спеціальний вибір опорних точок дозволяє підвищити адекватність математичної моделі (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Абсолютне інтегральне відхилення розв’язків, отриманих методом опорних перерізів та методом скінченних різниць

Кількість опорних точок	Корені многочлена Чебишева	Точки максимуму многочлена Чебишева	Рівномірний розподіл
5	$9,1 \cdot 10^{-03}$	$7,1 \cdot 10^{-03}$	$1,27 \cdot 10^{-02}$
7	$1,7 \cdot 10^{-03}$	$1,7 \cdot 10^{-03}$	$3,5 \cdot 10^{-03}$
9	$6,34 \cdot 10^{-04}$	$6,03 \cdot 10^{-04}$	$1,6 \cdot 10^{-03}$
11	$3,31 \cdot 10^{-04}$	$3,04 \cdot 10^{-04}$	$9,13 \cdot 10^{-04}$
13	$1,49 \cdot 10^{-04}$	$1,98 \cdot 10^{-04}$	$5,79 \cdot 10^{-04}$
15	Порушення стійкості обчислювального процесу	$1,36 \cdot 10^{-04}$	$4,24 \cdot 10^{-04}$

У **п’ятому розділі** одержав подальший розвиток метод синтезу стратегій і структур адаптивного керування ММ на основі вдосконалення безошукових АС із еталонною моделлю. В основу синтезу законів керування і структур АС покладена властивість задоволення їх стійкості, обумовлене за другим методом Ляпунова, що дозволяє врахувати нестационарність основного контуру АС а також деякі нелінійності, наприклад, обмеження на керуючий вплив. Задача синтезу вирішена для систем з параметричним (активним – ефект адаптації досягається за рахунок зміни параметрів керуючого пристрою), сигнальним (пасивним – ефект самонастроювання досягається за рахунок сигналів, що компенсують) та комбінованим настроюванням. Отримано математичний опис адаптивної системи з еталонною моделлю (ЕМ), яка складається з основної системи (сукупність об’єкта керування (ОК) і виконавчого пристрою) і контуру настроювання (комп’ютерна модель об’єкта (КМ) і керуючий пристрій (КП), тобто регулятор). Задача побудови адаптивної системи розв’язується як визначення алгоритму функціонування КП, тобто його структури й параметрів, при відомих рівняннях руху основної системи, КМ і характеристик вхідних сигналів.

Щодо керованої координати об’єкта керування частіше всього можуть описуватися рівнянням виду  $y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t)y^{(i)} = \sum_{j=0}^m d_j(t)x^{(j)}$ , де  $x$  – керуючий вплив;  $y$  – вихідна координата;  $a_i(t)$ ,  $d_j(t)$  – змінні в часі коефіцієнти, або в операторній формі  $A(p,t) \cdot Y(p) = D(p,t) \cdot X(p)$ , де  $A(p,t)$ ,  $D(p,t)$  – лінійні диференціальні оператори. Дана лінійна математична модель (ММ) вигляду руху ОК щодо розрахункової траєкторії коректна лише при певних обмеженнях, що накладаються на сигнали й координати об’єкта, діапазони й швидкості зміни його коефіцієнтів. Зазначені обмеження можна записати у вигляді нерівностей  $B_k[p, g, y, x, a_i(t), d_j(t), t] \leq 0$ , де  $B_k$  – деякі оператори;  $g$  – вхідний сигнал.

З урахуванням законів керування, слухних для замкненої системи, рівняння ОК приймає вигляд:  $y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} [a_i(t) + c_i(t)]y^{(i)} = \sum_{j=0}^m [d_j(t) + c_{xj}(t)]x^{(j)}$ . Представимо, коефіцієнти  $c_i(t)$  й  $c_{xj}(t)$ , що змінюються, у вигляді суми двох складових  $\{c_i(t) = \bar{c}_i + \Delta c_i(t); c_{xj}(t) = \bar{c}_{xj} + \Delta c_{xj}(t)\}$ , де  $\bar{c}_i, \bar{c}_{xj}$  – постійні величини,  $\Delta c_x(t), \Delta c_{xj}(t)$  – складові, що перебудовуються.

Вводячи позначення  $\{a_i = a_i(t) + \bar{c}_i; d_j = d_j(t) + \bar{c}_{xj}\}$ , можна записати  $y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} [a_i + \Delta c_i(t)]y^{(i)} = \sum_{j=0}^m [d_j + \Delta c_{xj}(t)]x^{(j)}$ , де зміни коефіцієнтів  $a_i$  і  $d_j$ , викликані зміною параметрів ОК, будуть компенсуватися відповідними змінами складових  $\Delta c_i(t)$  і  $\Delta c_{xj}(t)$  до значень, обумовлених ЕМ. Рівняння ЕМ

представимо в наступному виді:  $y_M^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} b_i y_M^{(i)} = \sum_{j=0}^m d_{jM} x^{(j)}$ , де  $b_i, d_{jM}$  – незалежні від часу коефіцієнти рівняння ЕМ. Якщо виділити бажані значення коефіцієнтів, рівні коефіцієнтам ЕМ, і їхні додаткові складові, то рівняння ОК набуває виду  $y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} [b_i + \Delta a_i(t) + \Delta c_i(t)]y^{(i)} = \sum_{j=0}^m [d_{jM} + \Delta d_j(t) + \Delta c_{xj}(t)]x^{(j)}$ .

Відхилення виходу основної системи й моделі  $\varepsilon = y - y_M$  знаходяться із попередніх рівнянь ЕМ:

$$\varepsilon^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \varepsilon^{(i)} = \sum_{j=0}^m [\Delta d_j(t) + \Delta c_{xj}(t)]x^{(j)} - \sum_{i=0}^{n-1} [\Delta a_i(t) + \Delta c_i(t)]y^{(i)}.$$

Групуючи члени в останньому рівнянні ОК, одержуємо:

$$\varepsilon^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \varepsilon^{(i)} = \left[ \sum_{j=0}^m \Delta d_j x^{(j)} - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta a_i y^{(i)} \right] + \left[ \sum_{j=0}^m \Delta c_{xj}(t) x^{(j)} - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta c_i(t) y^{(i)} \right].$$

Або  $\varepsilon^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \varepsilon^{(i)} = F + u$ , де  $F = \left[ \sum_{j=0}^m \Delta d_j x^{(j)} - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta a_i y^{(i)} \right]$  – еквівалентне

збурювання, що діє на систему й, відповідно, що викликає помилку  $\varepsilon$ ;

$u = \left[ \sum_{j=0}^m \Delta c_{xj}(t) x^{(j)} - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta c_i(t) y^{(i)} \right]$  – еквівалентний вхідний вплив КП.

З метою спрощення математичних описів, доцільно, увівши позначення  $\varepsilon^{(i)} = x_{i+1}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ), представити рівняння похибки у матричній формі

$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{U}$ , де  $\mathbf{X} = \|x_1, x_2, \dots, x_n\|^T$ ,  $\mathbf{A}$  – квадратна матриця розмірністю  $n \times n$ .

Задача синтезу системи може бути зведена в цьому випадку до вибору такого керування, при якому відбувається компенсація еквівалентного збурювання  $\mathbf{F}(t)$ .



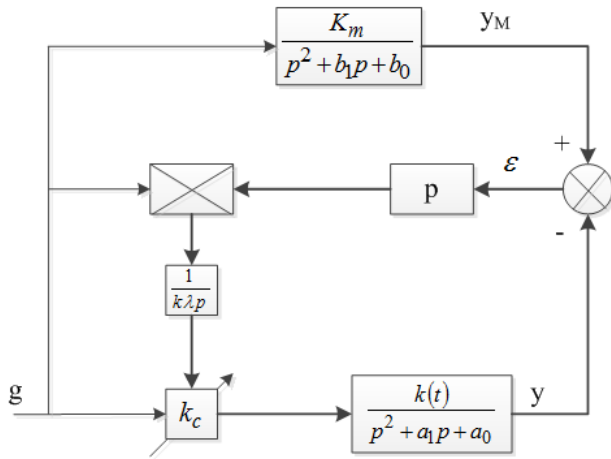


Рис. 5.1 – Структурна схема АС із коефіцієнтом підсилення, що перебудовується

Сутність методики синтезу АС із ЕМ і параметричним настроюванням за допомогою функцій Ляпунова розглянуто на прикладі побудови системи другого порядку. Структурна схема синтезованої АС наведена на рис. 5.1. Таким чином, запропонована методика дозволяє розробити процедуру синтезу алгоритмів і законів формування параметрів, що перебудовуються. При цьому рівняння основної системи і ЕМ мають вигляд

$$y^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t)y^{(i)} = k(t)g ; y_M^{(m)} + \sum_{i=0}^{m-1} b_i y_M^{(i)} = k_M g , \text{ де } k(t), a_i(t) - \text{змінні в часі}$$

коефіцієнти;  $k_M, b_i$  – постійні коефіцієнти моделі. Отримані рівняння дозволяють синтезувати АС із сигнальним настроюванням (Рис. 5.2) на основі другого методу Ляпунова, який дозволяє врахувати нестационарність основної системи й деякі нелінійності, наприклад, обмеження на керуючий вплив, АС із еталонною моделлю й параметричним настроюванням (рис. 5.3) та АС із комбінованим настроюванням.

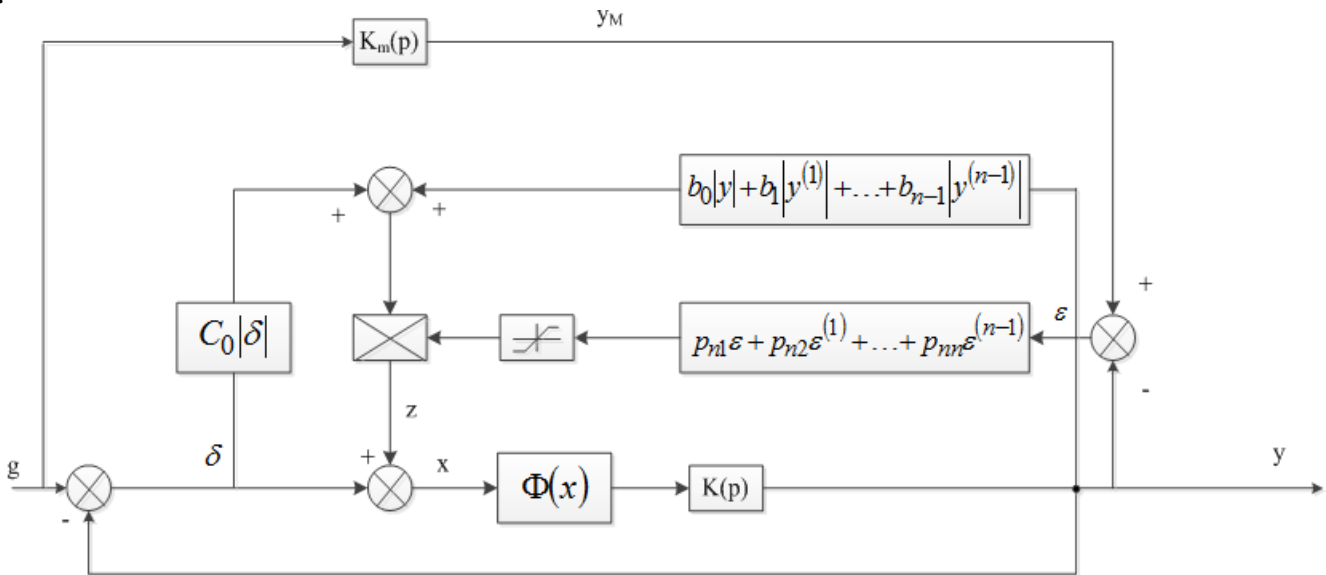


Рис. 5.2. – Структурна схема АС з сигнальним настроюванням

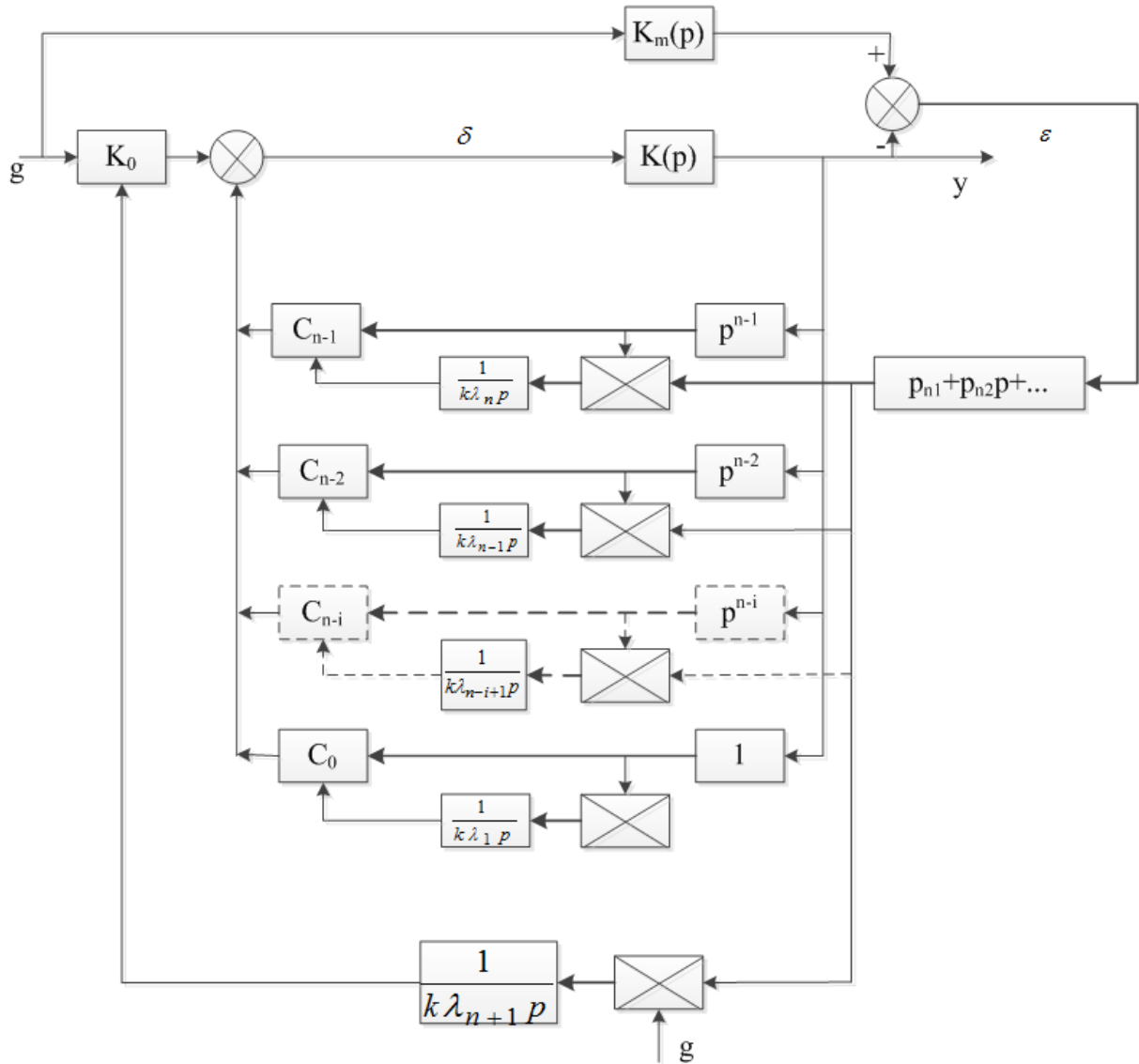


Рис. 5.3. – Структурна схема АС із еталонною моделлю і параметричним настроюванням

У шостому розділі розглянуто задачі ідентифікації і діагностики комп'ютерно-інтегрованих систем, виконано аналіз і вибір методів ідентифікації, процедуру модельного діагностування динамічних систем розглянуто для випадків підсистем з незалежним спостереженням, керуванням та з незалежним спостереженням і керуванням. Повний математичний опис комп'ютерно-інтегрованих об'єктів досягається складними системами диференціальних рівнянь із частинними похідними з досить непростими граничними умовами – розв'язання досить трудомістке і вимагає значних витрат машинного часу. Запропоновано модельний підхід до розв'язання задач ідентифікації і діагностики.

Нехай  $\varepsilon$  математична модель об'єкта енергетичної установки для розробки якої залучається вся апріорна інформація про об'єкт керування. Задачу ідентифікації можна сформулювати наступним чином. Модель установки задається оператором  $B = \{B_1, B_2\}$ :

$$B_1 = \left\{ \begin{array}{l} F_i \left( u_i, \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \frac{\partial u_i}{\partial y_i}, \frac{\partial u_i}{\partial z_i}, \frac{\partial u_i}{\partial t}, \dots, \frac{\partial^{m_i} u_i}{\partial t^{m_i}} \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, \alpha, \quad u_i = u_i(q_i); \\ q_i = \{x_i, y_i, z_i, t\} \in R_i^{K_i}; \quad \psi_j \left( u_i, \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \dots, \frac{\partial^{r_j} u_i}{\partial t^{r_j}} \right) \Big|_{q_i \in S_p} = \phi_i(q_i); \\ p = 1, 2, \dots, l, \quad j = 1, 2, \dots, \gamma, \quad K_i \leq 4 \end{array} \right.$$

де  $S_p$  – граничні замкнені багатобразності в просторах, розмірність яких менше  $K_i$ ;  $\phi_i(q_i)$  – задані функції, певні на багатобразностях  $S_p$ ;  $m$  і  $r$  визначають порядок вищих похідних за часом. Оператор  $B_{1z}$ , що є частиною математичної моделі установки, визначає загальний вид граничної задачі: систему рівнянь із частинними похідними і з відповідними граничними і початковими умовами. Аналогічно, задача Коші, обумовлена системою звичайних диференціальних рівнянь, задається оператором  $B_2$ :

$$B_2 = \left\{ \begin{array}{l} \Phi_i(t, u_i, u_i', u_i'', \dots, u_i^{(n_i)}) = 0, \quad i = \alpha + 1, \alpha + 2, \dots, \beta; \\ u_i|_{t=0} = u_{i0}, \quad u_i'|_{t=0} = u_{i0}', \quad u_i^{(n_i-1)}|_{t=0} = u_{i0}^{(n_i-1)}. \end{array} \right.$$

Сукупність просторів утворює простір  $SN$ ,  $\{R_i^{K_i}\} = S^N$ , тобто  $\sum_{i=1}^{\beta} K_i = N$ .

Задача ідентифікації. Нехай є експериментальні динамічні процеси, отримані при випробуваннях установки  $q_{\mathcal{Q}_i} \in \mathcal{Q}_i$  ( $\mathcal{Q}_i$  – виділений клас динамічних процесів,  $i = 1, 2, \dots, h$ ), які характеризуються вектор-функцією вимірюваних координат  $q_{\mathcal{Q}_i} \rightarrow \mu_i(t), \mu_i(t) = \{\mu_{ij}(t)\}$ ,  $\mu_i(t) \in M$  де  $j = 1, 2, \dots, \rho$ ;  $M$  – виділений клас вимірюваних функцій, що відповідають  $\mathcal{Q}_i$ . При цьому нехтуємо помилками вимірів і будемо вважати  $\mu_i$  точними значеннями. Необхідно визначити сукупність граничних і початкових умов, які відповідають експериментальним умовам, що породжують процеси  $q_{\mathcal{Q}_i}$ . Поставлені в такий спосіб граничні задачі породять розв'язки системи  $B(U) = 0 \rightarrow U_i^*$ , які будуть відповідати  $q_{\mathcal{Q}_i}$ . Позначимо процеси, відповідні до розв'язків  $i^*$ , а їх множину –  $Q = \{q_i\}$ . Далі виникає задача порівняння елементів множин  $Q$  і  $\mathcal{Q}_i$ . Процеси  $q_{\mathcal{Q}_i}$  характеризуються вимірюваними координатами  $\mu_i(t) \in M$ ,  $\mu_i(t)$  визначені на просторі вимірюваних координат  $S_z$ . Цей простір, природно, уже входить у простір координат, що розраховуються,  $S^N : S^z \in S^N$  системи. Введемо оператор  $P_y$ , що переводить розв'язки  $U_i^*$  у вектор-функції, що обчислюються вимірюваних обчислюваних координат  $y_i$ :  $P_y(U_i^*) = Y_i(t), Y_i(t) \in M$ . Природно, що вектор-функції  $Y_i$  мають ту ж розмірність, що і вектор-функції вимірюваних координат об'єкта  $\mu_i$ :

$Y_i(t) = \{y_{ij}(t)\}, j = 1, 2, \dots, \rho$ . Утворюємо величину  $\max_{t,j} |y_{ij}(t) - \mu_{ij}(t)| = \omega_i \in \Omega$ , яка буде мірою неточності моделі  $B$  у процесі  $q_{\exists i}$ . Задача ідентифікації полягає в такій зміні моделі  $B$ , щоб міра неточності моделі по всіх експериментальних процесах  $q_{\exists i} \in Q_{\exists}$  була б менше заданої величини:  $\omega_i < \varepsilon$ .

Для порівняльного аналізу і вибору методів ідентифікації у якості об'єкта ідентифікації розглянуто лінійну дискретну систему з одним входом  $i(t)$  і одним виходом  $y(t)$ :

$$x(t_{k+1}) = Fx(t_k) + bu(t_k) + dw(t_k), \quad z(t_k) = h^T x(t_k) + v(t_k),$$

де  $F$  – матриця системи розмірності  $(n \times n)$ ;  $b, h, d$  – вектор-стовпці розмірності  $(n \times 1)$ ;  $x(t_k)$  –  $n$ -мірний вектор стану (фазовий вектор);  $u(t_k), z(t_k)$  – вхідні, вихідні змінні об'єкта;  $w(t_k), v(t_k)$  – випадкові перешкоди і погрішності. Матриця  $F(n \times n)$

визначається через вектор-стовпець  $f = (f_1, \dots, f_n)$ :  $F = \begin{bmatrix} \Theta & E \\ f^T & \end{bmatrix}$ , де  $\Theta$  – нульовий

вектор розмірності  $(n-1)$ ;  $E$  – одинична матриця розмірності  $(n_1 \times n_1)$ ;  $n_1 = n - 1$ . Невідомими параметрами, моделі є вектори  $f$  і  $b$ , при цьому вимір  $z(t_k)$  в системі формується за допомогою вектор-рядка  $h$ :  $h^T = [1, 0, \dots, 0]$ . Якщо об'єкт ідентифікації є повністю керованим і спостережуваним, то його модель можна записати різницеvim рівнянням  $n$ -го порядку:

$$z(t_{k+n}) = \sum_{i=1}^n f_i z(t_{k+i-1}) + \sum_{i=1}^n b_i u(t_{k+i-1}) + \sum_{i=1}^{n+1} c_i \xi(t_{k+i-1}), \text{ де}$$

$$c_i \xi(t_{k+i-1}) = d_i w(t_{k+i-1}) - f_i v(t_{k+i-1}); c_{n+1} = 1; d_{n+1} = 0; f_{n+1} = -1.$$

Розв'язком цього рівняння є наступний вираз:

$$z(t_k) = h^T F^k x(t_0) + \sum_{j=0}^{k-1} h^T F^j b u(t_{k-j+1}) + \sum_{j=0}^{k-1} h^T F^j d w(t_{k-j+1}), \text{ який для нульових}$$

початкових умов і для  $b = d$  приймає вигляд

$$z(t_k) = \sum_{j=0}^{k-1} h^T F^j b [u(t_{k-j-1}) + w(t_{k-j-1})] = \sum_{j=0}^{k-1} g(j) [u(t_{k-j-1}) + w(t_{k-j-1})],$$

де  $g(j) = h^T F^j b$  – імпульсна перехідна функція моделі. З метою оцінки конкретних обчислювальних алгоритмів ідентифікації проаналізовано наступні методи розв'язання задач ідентифікації з порівнянням ряду критеріїв: взаємкореляційний, стохастичної апроксимації, максимальної правдоподібності, найменших квадратів. Для порівняння всіх описаних алгоритмів ідентифікації була обрана характерна лінійна система 3-го порядку, досить чутлива до шумів:

$$x(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix} x(t_k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} [u(t_k) + w(t_k)], \quad z(t_k) = (1, 0, 0) x(t_k) + v(t_k).$$

Отримані результати порівняльного аналізу, що характеризують можливості обчислювальних алгоритмів ідентифікації (таб. 6.1) вказують на перевагу методу

найменших квадратів, а також на важливий недолік – наявність статистичних даних і випадкових процесів (за винятком методу найменших квадратів).

Таблиця 6.1 – Порівняння методів ідентифікації

№ п/п	Метод	Характеристики алгоритму				Складність алгоритму ідентифікації
		Початкова оцінка	Час обчислень, с	Нормована помилка		
				2500 ітерацій	6000 ітерацій	
1	Взаєм- кореляційний	Довільна	2	0,050	0,015	Мала
2	Стохастичної апроксимації	Довільна	5	0,650	0,42	Мала
3	Максимальної правдоподібності	Близька	40	0,030	-	Значна
4	Найменших квадратів	Довільна	1	0,080	-	Мала

Запропонована трьохрівнева структура системи діагностики об'єкта в умовах створення вбудованої інформаційно-керуючої системи з врахуванням зазначених алгоритмів наведена на рис. 6.1 ( $T$  – період діагностики,  $T_p$  – тривалість сеансу роботи системи).

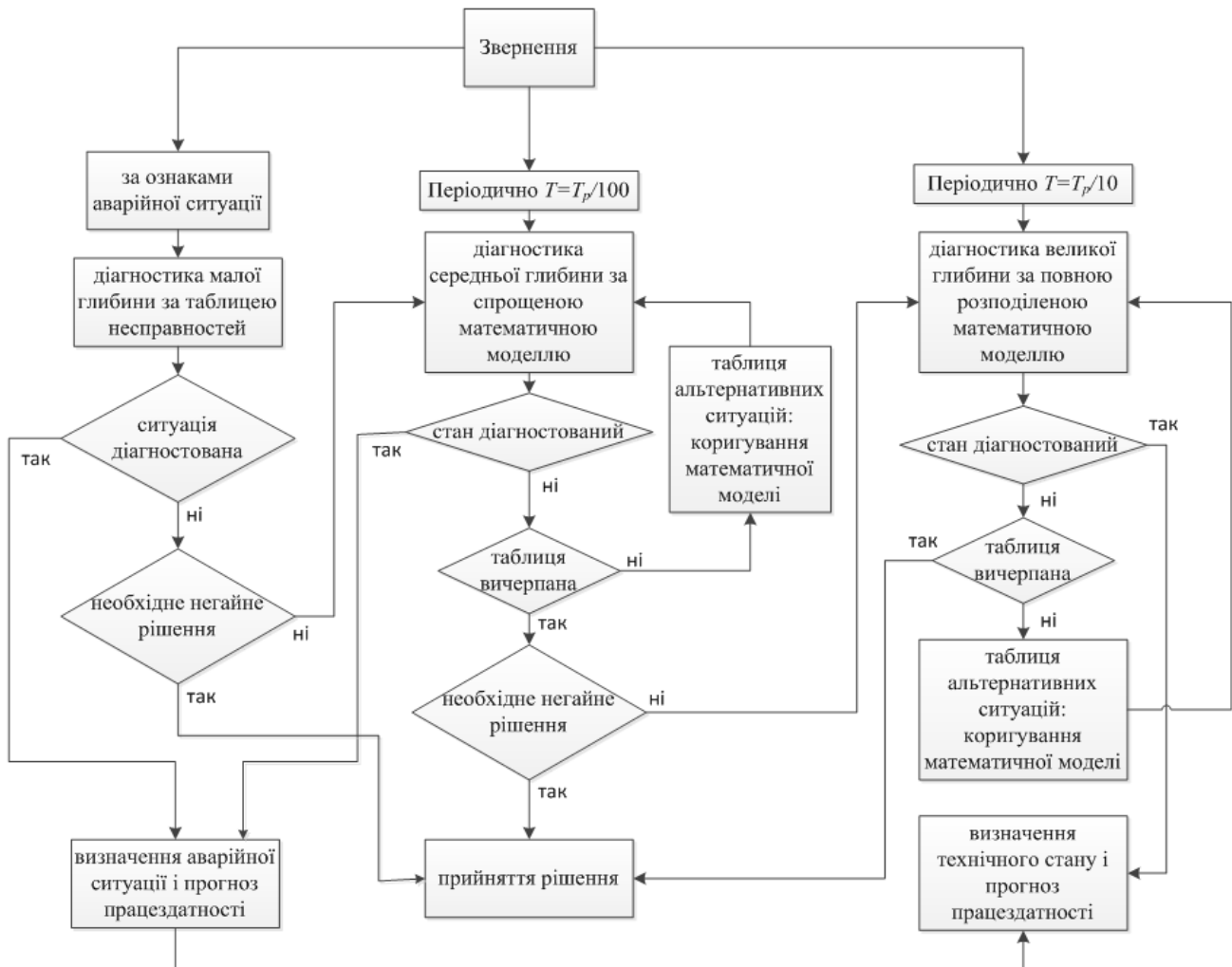


Рис. 6.1 – Структура системи діагностики силової установки

У цьому розділі розглянуто проблеми адаптації обчислювальних алгоритмів реалізації диференціальних динамічних моделей, вибору найкращого алгоритму, моделюванню задач аналізу динамічних об'єктів на основі рівнянь типу Вольтерри II роду (прямі задачі). Умови функціонування динамічних комп'ютерно інтегрованих систем жорстко визначають вимоги до швидкодії обчислювально-керуючих систем, які мають обмежені ресурси, що свідчить про актуальність питання цільового вибору або адаптації чисельних методів розв'язання рівнянь динаміки об'єктів, що моделюються при організації обчислювальних процесів. Квадратурні методи – третя група однокрокових методів чисельного розв'язання задачі Коші (для спрощення  $\dot{y} = f(y, t)$ ,  $y(0) = y_0$ ), побудова яких заснована на застосуванні квадратурних формул при обчисленні

інтеграла в  $y_{i+1} = y_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{y}(r) dr$ . Для викладу основної ідеї побудови

квадратурних методів представимо даний вираз у вигляді

$$y_{i+1} = y_i + h \int_0^1 f(y(t_i + \alpha h), t_i + \alpha h) d\alpha = y_i + h \int_0^1 \varphi(\alpha) d\alpha,$$

що досягається заміною змінних  $\alpha = [(t - t_i)/h]$ . Для обчислення інтеграла скористаємося формулою Гаусса. Тоді отримаємо наближене значення для  $y_{i+1}$

у вигляді  $y_{i+1} \approx y_i + h \sum_{j=1}^q p_j \varphi(\alpha_j) = y_i + h \sum_{j=1}^q p_j f(y(t_i + \alpha_j h), t_i + \alpha_j h)$ . Права

частина містить  $2q$  параметрів, які вибираються з умови точності квадратурного правила для поліномів  $r$ -го ступеня. З теорії квадратур відомо, що такі правила можуть бути побудовані для будь-яких  $r \leq (2q - 1)$ , причому похибка обчислення інтеграла в припущенні безперервності  $\varphi^{(r+2)}(\alpha)$  є величиною  $O(h^{r+2})$ . В результаті отримується метод чисельного розв'язання диференціальних рівнянь  $(r + 1)$ -го порядку. Якщо з  $2q$  параметрів  $m$  параметрів вважати вільними, то можна будувати методи  $(2q - m)$ -го порядку точності. Умова точності квадратурного правила для поліномів  $r$ -го ступеня призводить до наступної системи рівнянь щодо

параметрів:  $\sum_{i=1}^q p_i \alpha_i^{(j-1)} = \frac{1}{j}$ ,  $j = \overline{1, (2q - m)}$ , в якій  $m$  параметрів можуть бути

обрані довільно. У теорії квадратур доводиться, що при  $m = 0$  дана система має єдиний розв'язок для будь-якого  $q \geq 1$ . З цього випливає, що вона сумісна при будь-яких  $m < 2q$ .

Для вибору найкращого алгоритму розглянуто критерії оптимальності. Реальні припущення щодо властивостей керованих об'єктів рівняння динаміки представляються у вигляді задачі Коші для систем звичайних диференціальних рівнянь  $\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{p})$ ,  $\mathbf{y}(0) = \mathbf{y}_0$ , де  $\mathbf{y}$  – вектор змінних стану, компонентами якого є (в загальному випадку) вихідні координати динамічного об'єкта, значення відхилень керуючих органів, різні змінні параметри тощо;  $\mathbf{u}$  – вектор керуючих

сигналів, що діють на вході системи управління об'єкта;  $\mathbf{p}$  – вектор параметрів, що характеризують властивості об'єкта і його системи управління, а також властивості зовнішнього середовища;  $\mathbf{y}_0$  – вектор початкових значень змінних стану.

Сформульована задача оптимального вибору методу:

а) потрібно визначити чисельний метод інтегрування рівнянь динаміки об'єкта, що моделюється, для якого необхідна швидкодія управляючої системи – мінімальна, а похибка розв'язання рівнянь динаміки не перевищує заданої величини  $\delta_D$ .

Критерієм оптимальності при цьому є функція  $W = \frac{N_i}{\delta_i^{-1}(\delta_D)}$ , де  $i$  – індекс методу,

$N_i$  – обсяг обчислень на кроці інтегрування  $i$ -м методом,  $\delta_i^{-1}(h)$  – функціональна залежність похибки розв'язку від величини кроку інтегрування  $h$  (оптимальний метод мінімізує значення цієї функції);

б) швидкодія обчислювача задана і потрібно знайти метод, що дає мінімальну похибку розв'язання рівнянь динаміки об'єкта, що моделюється. У цьому випадку

критерієм оптимальності є функція  $E = \delta_i \left( \frac{N_i}{W_3} \right)$ , де  $W_3$  – задана швидкодія, а

оптимальний метод також мінімізує її значення. При виборі методів аналізу динаміки з врахуванням додаткових витрат часу критерій оптимальності слід

замінити на  $W_1 = \frac{N_i T}{(T - \Delta T_i) \delta_i^{-1}(\delta_D)}$ , де  $T$  – інтервал моделювання, а  $\Delta T_i$  – додаткові

часові витрати при програмній реалізації  $i$ -го методу.

Моделювання задач аналізу динамічних об'єктів на основі рівнянь типу

Вольтерри II роду  $\varphi(x) - \int_a^x K(x,s) \cdot \varphi(s) ds = f(x)$  перехід до дискретних

обчислювальних схем здійснюються за допомогою виразу

$\varphi(x_i) - \int_a^{x_i} K(x_i,s) \cdot \varphi(s) ds = f(x_i)$ . Беручи значення  $x_i$  в якості вузлів квадратурної

формули і замінюючи інтеграл скінченною сумою, отримаємо систему

алгебраїчних рівнянь  $\tilde{\varphi}(x_i) - \sum_{j=1}^i A_j K(x_i, x_j) \cdot \tilde{\varphi}(x_j) \cong f(x_i)$ , (7.52), де  $x_j = j \cdot h$ ,  $h$  –

крок квадратури,  $\tilde{\varphi}(x_i)$  – наближені значення функції  $\varphi(x_i)$  в вузлах  $x_i$ . Для

побудови ефективного алгоритму доцільно отримати рекурентний вираз,

користуючись тим, що це можна зробити саме для рівнянь Вольтерри, на відміну

від рівнянь Фредгольма. Застосовуючи, наприклад, формулу трапецій можна

записати наступні розрахункові вирази для змінного кроку (загальний випадок):

$$\tilde{\varphi}(x_1) = f(x_1), \quad \tilde{\varphi}(x_2) = \frac{\left( f(x_2) + \frac{h_2}{2} K(x_2, x_1) \cdot \varphi(x_1) \right)}{1 - \frac{h_2}{2} K(x_2, x_2)},$$

$$\tilde{\varphi}(x_i) = \frac{\left( f(x_i) + \frac{h_2}{2} K(x_i, x_1) \cdot \varphi(x_1) + \sum_{j=2}^{i-1} \frac{h_j + h_{j+1}}{2} K(x_i, x_j) \cdot \varphi(x_j) \right)}{1 - \frac{h_i}{2} K(x_i, x_i)}, \quad \text{де}$$

$$i = 3, 4, \dots, n; \quad h_j = x_j - x_{j-1}.$$

При використанні даного традиційного виразу час обчислення шуканої функції залежить від кількості кроків дискретизації, збільшення яких призводить до збільшення кількості обчислювальних операцій.

Розрахунковий вираз, отриманий у випадку ядра, що розділяється  $K(x, s) = \sum_{l=1}^m \alpha_l(x) \beta_l(s)$ , із застосуванням формули трапецій, має наступний вигляд при змінному кроці дискретизації (загальний випадок):

$$\tilde{\varphi}(x_1) = f(x_1), \quad \tilde{\varphi}(x_2) = \frac{f(x_2) + \frac{h_2}{2} \sum_{l=1}^m \alpha_l(x_2) \cdot \beta_l(x_1) \cdot \varphi(x_1)}{1 - \frac{h_2}{2} \sum_{l=1}^m \alpha_l(x_1) \cdot \beta_l(x_1)},$$

$$\tilde{\varphi}(x_i) = \frac{f(x_i) + \frac{h_2}{2} \sum_{l=1}^m \alpha_l(x_i) \beta_l(x_1) \varphi(x_1) + \sum_{l=1}^m \alpha_l(x_i) \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \frac{h_j + h_{j+1}}{2} \beta_l(x_j) \varphi(x_j)}{1 - \frac{h_i}{2} \sum_{l=1}^m \alpha_l(x_i) \cdot \beta_l(x_i)},$$

де  $i = 3, 4, \dots, n; \quad h_j = x_j - x_{j-1}$ .

Аналогічно можуть бути отримані розрахункові вирази для розв'язання систем інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.

Результати проведеного обчислювального експеримент ілюструють ефективність запропонованого обчислювального алгоритму – алгоритми, отримані на основі використання роздільності ядра є більш швидкодіючими, ніж традиційні.

У таблиці 7.1 представлені результати обчислень, а також точний розв'язок  $\varphi_0(x_i)$ . На рис. 7.1 наведено графік кривої похибки отриманого розв'язку.



Таблиця 7.1 – Результати дослідження для прикладу 7.1.

$x_i$	$\varphi_T(x_i)$	$\varphi_0(x_i)$	$\varepsilon(x) =  \varphi_T(x_i) - \varphi_0(x_i) $	$\varphi_M(x_i)$	$\varepsilon(x) =  \varphi_T(x_i) - \tilde{\varphi}_0(x_i) $
1	2	3	4	5	6
0	0,0000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,02	0,0202	0,02024	0,00004	0,02024	0,00004
0,04	0,0409	0,04097	0,00007	0,04097	0,00007
0,06	0,0622	0,06221	0,00001	0,06221	0,00001
0,08	0,0839	0,08395	0,00005	0,08395	0,00005
0,1	0,1062	0,10622	0,00002	0,10622	0,00002
0,12	0,1290	0,12902	0,00002	0,12902	0,00002
0,14	0,1523	0,15237	0,00007	0,15237	0,00007
0,16	0,1762	0,17628	0,00008	0,17628	0,00008
0,18	0,2007	0,20076	0,00006	0,20076	0,00006

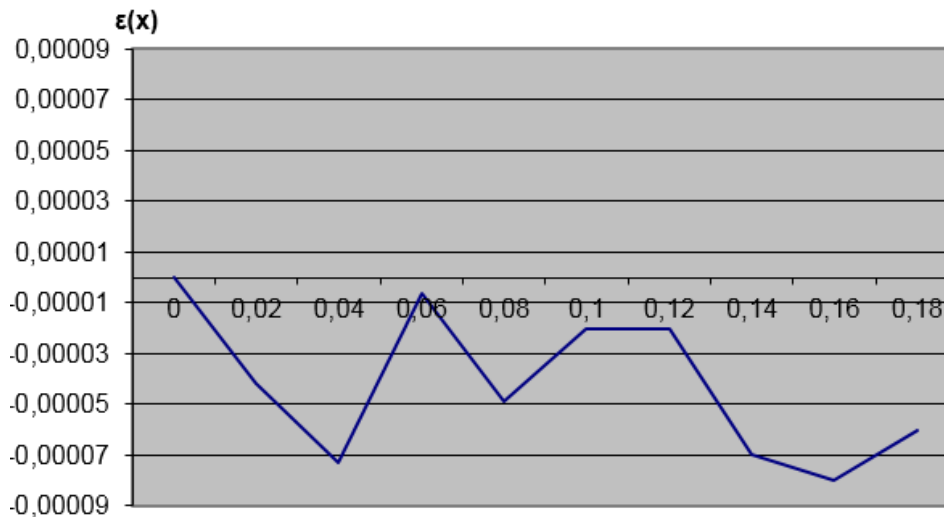


Рис. 7.1 – Графік похибки розв'язання

Подальшим розвитком чисельного алгоритму для розв'язання інтегрального рівняння Вольтерри II роду є запропонований резольвентний метод. Загальною аналітичною формою розв'язання рівняння Вольтерри II роду є вираз

$$y(x) = f(x) + \int_a^x R(x,s)f(s)ds, \text{ де функція } R(x,s) \text{ є резольвентою (резольвентним або}$$

розв'язуючим ядром). Резольвента рівняння визначається виразом

$$R(x,s) = \sum_{n=0}^{\infty} K_{n+1}(x,s), \text{ де } K_n(x,s) \text{ – ітеровані (повторні) ядра, які визначаються}$$

рекурентними співвідношеннями  $K_1(x,s) = K(x,s)$ ,

$$K_{n+1}(x,s) = \int_s^x K(x,t)K_n(t,s)dt, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ . Запропонований метод визначення}$$

резольвенти чисельним методом дозволяє використати переваги алгоритму явного виду. Визначення резольвенти і чисельна або аналітична означає операцію обернення оператора об'єкта, що моделюється, представленого лівою частиною

рівняння. Запропонований підхід до пошуку розв'язку відкриває можливість отримання ряду нових чисельних алгоритмів моделювання, що реалізують явне подання оберненого оператора задачі, що ефективніше, ніж алгоритми неявного виду. Отримані висновки підтверджуються багатьма обчислювальними експериментами. Зокрема, при розв'язанні інтегрального рівняння Вольтерри 2-го

роду  $y(x) - \int_0^x e^{-(x-s)} y(s) ds = e^x$  методом квадратур знадобилося  $0,2369 \cdot 10^{-2}$  с;

резольвентним методом (резольвента визначається методом ітеративних ядер) – 5 ітеративних ядер і  $0,2567 \cdot 10^{-2}$  с; методом вироджених ядер –  $0,1859 \cdot 10^{-2}$  с; методом виродженої резольвенти (резольвента отримана методом ітеративних ядер (2-й спосіб)) – 5 ітеративних ядер і  $0,1659 \cdot 10^{-2}$  с. Графіки апроксимуючих

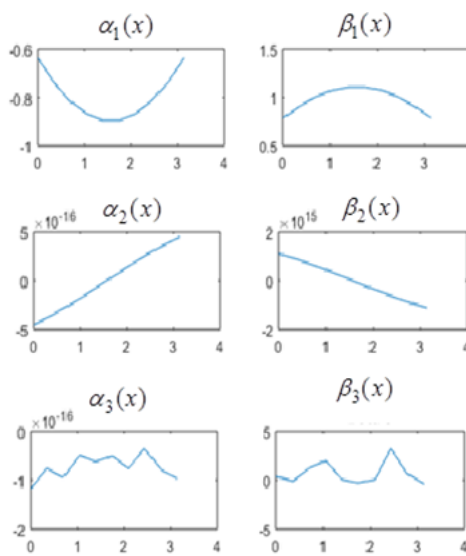


Рис. 7.2. Графіки апроксимуючих функцій

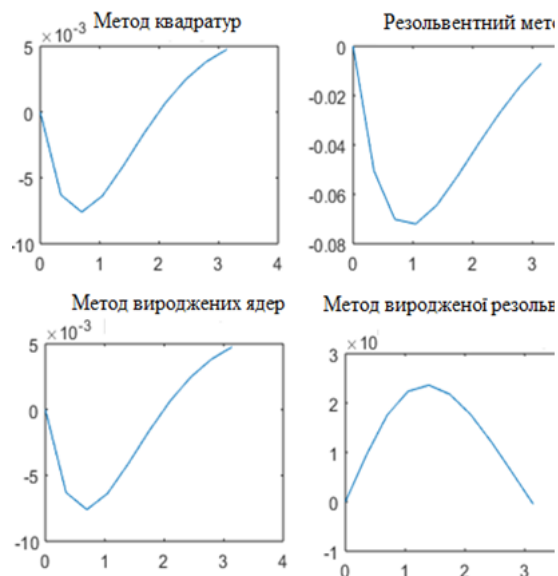


Рис. 7.3. Графіки отриманих похибок

функцій (Рис. 7.2) та отриманих похибок використаних методів (Рис. 7.3) об'єктивно характеризують перевагу методів вироджених ядер і методу виродженої резольвенти.

У розділі 8 «Розробка програмних засобів реалізації обчислювальних алгоритмів» виконано обґрунтування вибору середовища моделювання, наведено опис розробленого блоку програм для перетворення динамічних моделей та засобів формування і реалізації моделей об'єктів із розподіленими параметрами, результати обчислювальних експериментів з оцінки запропонованого методу, опис розроблених комплексів програм для реалізації динамічних макромоделей та для розв'язання інтегральних динамічних моделей. Структура системи інструментальних засобів для виконання еквівалентного та апроксимаційного перетворення моделей динамічних об'єктів зображена на рис. 8.1.

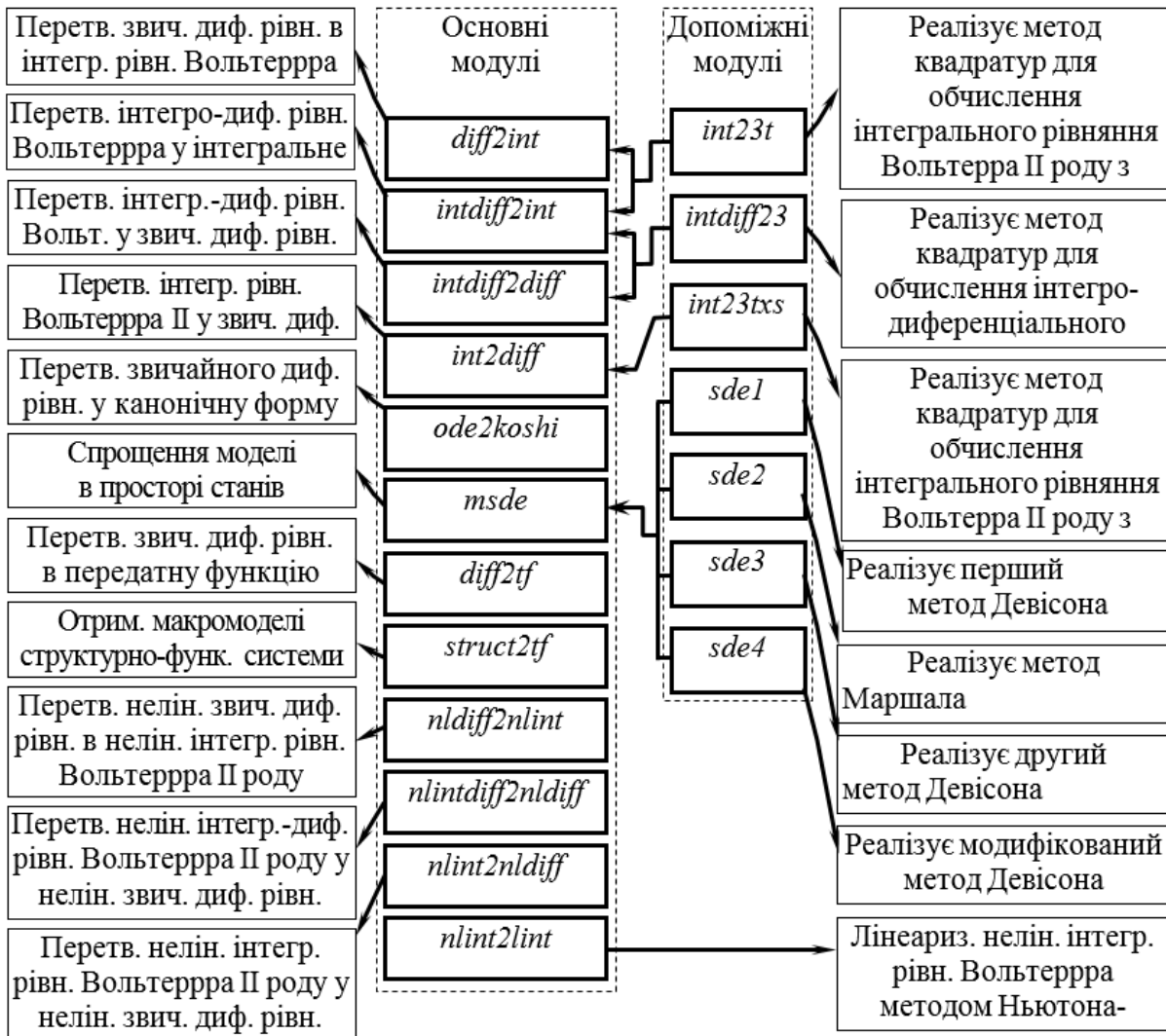
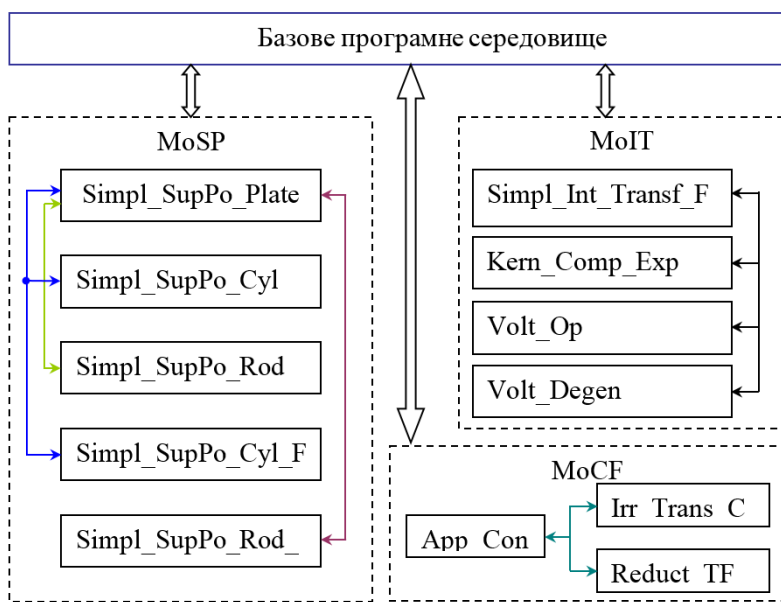


Рис. 8.1 – Структура блоку програмних інструментальних засобів перетворення моделей (Model Transformation Toolbox)



Розроблений комплекс програм формування і реалізації моделей об'єктів із розподіленими параметрами включає три основні модулі (рис. 8.2), які виконують структурне спрощення базових моделей об'єктів із розподіленими параметрами (ОРП), представлених у різних формах, та чисельно реалізують їх. Результати обчислювальних експериментів, у яких

Рис. 8.2 – Структура комплексу програм.

порівнювався затрачений на розв'язання задачі час методом опорних перерізів у порівнянні з традиційним широкоживим методом скінченних різниць та функцією `rdere` ядра пакету моделювання Matlab, наведені на рис. 8.3. Для дослідження ефективності запропонованого векторно-матричного способу числової реалізації інтегрального оператора Вольтерри проведено ряд обчислювальних експериментів, в яких визначалась реакція лінійного динамічного об'єкта на вхідний вплив у вигляді одиничного стрибка.. Запропонований спосіб виявився ефективніший у порівнянні із традиційним обчисленням квадратур із застосуванням оператора циклу

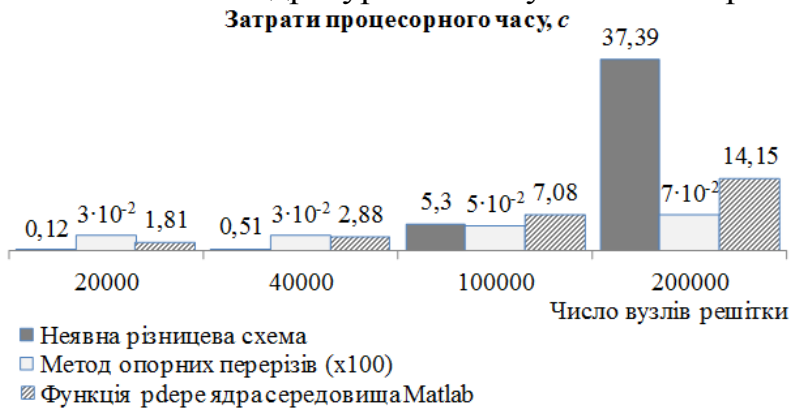


Рис. 8.3 – Дослідження ефективності методу

З метою визначення якісної характеристики засобів числової реалізації різних форм математичного опису моделі ОРП було проведено низку обчислювальних експериментів. (табл. 8.6), за результатами яких можна зробити висновок: найменше часу для розв'язання потребує векторно-матричний спосіб

реалізації квадратур для математичного опису у вигляді інтегрального оператора Вольтерри.

Систему комп'ютерного моделювання для розв'язання задач організовано у вигляді комплексу прикладних програм (рис. 8.4), використовуючи модульний принцип організації – програми розбиваються на декілька підпрограм і функцій, що допускають їх подальший розвиток та корекцію. Розроблений комплекс складається із 10 основних моделей, призначених безпосередньо для числової реалізації розглядаємих видів макромоделей.

Таблиця 8.6 – Якісні характеристики числової реалізації різних форм моделі довгого пружного валу

Математичний опис	Рівняння з частинними похідними	Оператор Вольтерри з ядром типу згортки	Дробово-раціональна передатна функція	Оператор Вольтерри із ядром типу згортки	Оператор Вольтерри з виродженим ядром
Засіб числової реалізації	Скінченно-різницевий обчислювач	Структурна <code>simulink</code> -модель	<code>Simulink</code> -блок <code>Transfer Function</code>	<code>M-file</code> (реалізація квадратур з використанням оператора циклу <code>for</code> )	<code>M-file</code> (векторно-матричний алгоритм обчислення квадратур)
<b>Час розрахунку, с</b>	9,0196	46,241	0,943	0,0264	0,00148

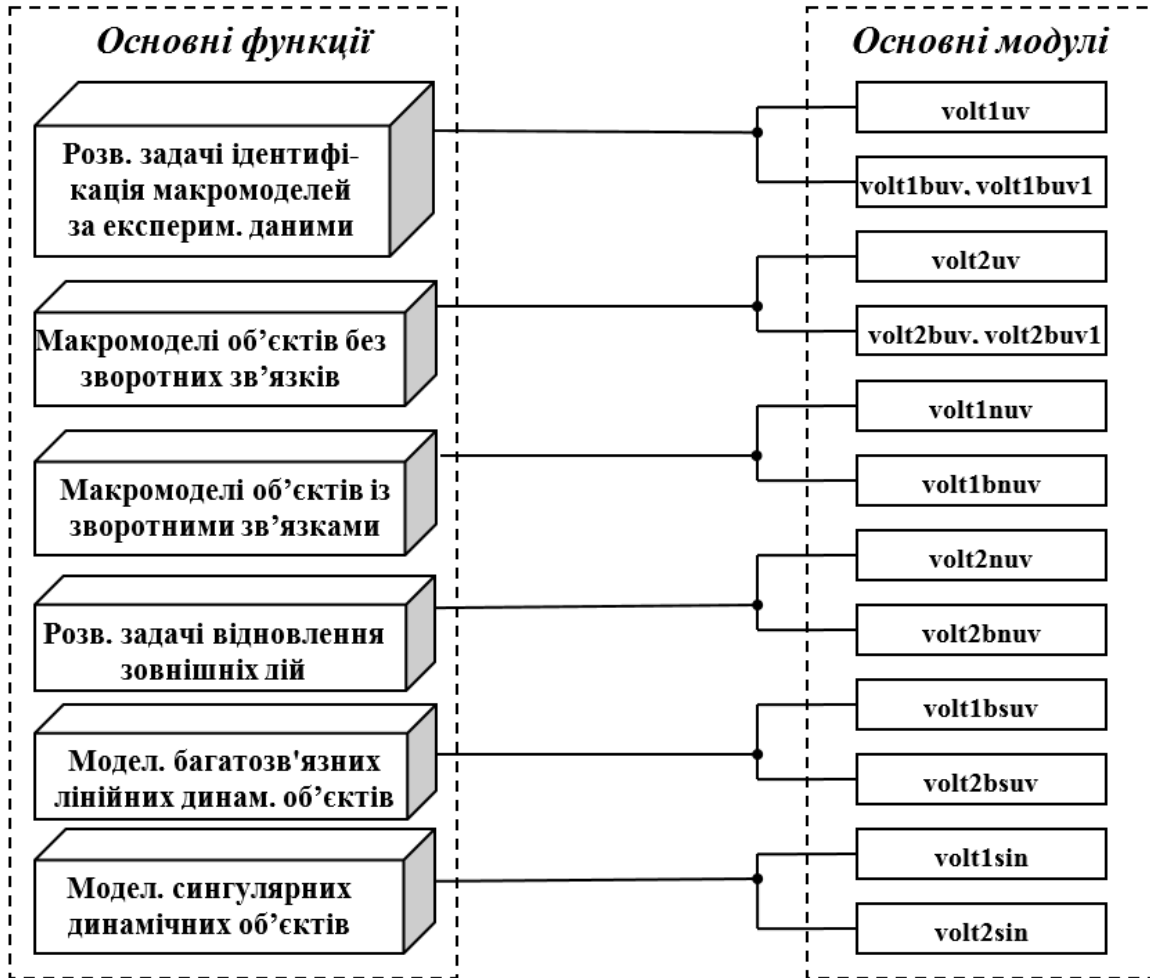


Рис. 8.4. Структура комплексу програм реалізації динамічних макромоделей

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема створення методів і засобів модельної підтримки процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем технічно-енергетичного призначення (в першу чергу стосовно до силових енергетичних установок) з урахуванням притаманних їм властивостей та ресурсних обмежень. В тому числі отримані наступні результати.

1. На основі аналізу найбільш суттєвих властивостей комп'ютерно-інтегрованих систем з ретельним розглядом найбільш розповсюджених прикладів силових енергетичних установок з характерним для цього класу систем призначенням і організацією обрані наступні підходи для розвитку і застосування досягнутих результатів в галузі математичного та комп'ютерного моделювання задач динаміки: використання принципу альтернативності різних форм динамічних моделей з ефективним застосуванням інтегральних динамічних моделей у вигляді операторів і рівнянь типу Вольтерра; застосування принципу та методів математичної редукції для отримання спрощених робочих динамічних моделей; адаптаційний вибір методів чисельної реалізації динамічних моделей та побудови відповідних алгоритмів зі зниженою обчислювальною складністю; структурна організація програмних засобів для проведення обчислювальних

експериментів і розв'язання прикладних задач, що забезпечує їх використання відповідно до існуючої інженерної практики.

2. При вирішенні задачі формування робочої динамічної моделі принцип альтернативності моделей надає можливість широкого вибору однієї із форм можливих математичних залежностей, які не дивлячись на аналітичну еквівалентність з іншими моделями, можуть суттєво розрізнятися за критерієм обчислювальної складності, оскільки реалізуються за допомогою різних за своєю якістю обчислювальних схем. При цьому вибір моделі здійснюється шляхом обчислювальних експериментів. Для застосування інтегральних динамічних моделей, які володіють згладжуючими властивостями при побудові моделей за експериментальними даними, запропоновані відповідні форми у вигляді явних моделей, тобто інтегральних операторів, які мають однакову структуру для об'єктів із зосередженими і розподіленими параметрами. Моделі цього виду відносяться також до класу економічних макромоделей. Крім того, запропонована загальна форма інтегральних моделей у вигляді системи інтегральних рівнянь Вольтерра II роду для опису багатозв'язних динамічних систем, що забезпечує безпосередню структурну реалізацію програмними засобами. Для отримання широкого кола моделюючих виразів запропонований узагальнений метод еквівалентного перетворення диференціальних рівнянь у інтегральні та інтегродиференціальні рівняння (метод опорних перерізів), що включає відомі методи послідовного інтегрування. Для побудови спрощених динамічних моделей сформульовано відповідний принцип спрощення і корегування моделюючих залежностей, що базується на введенні функції неузгодженості (критерію якості) математичної моделі та оптимізаційному пошуку необхідного результату.

3. Необхідність забезпечення процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем у реальному часі, а також відповідні вимоги до апаратної частини підсистем керування і контролю, обсягу пам'яті, надійності та безпеки суттєво впливають на рівень складності математичних описів динамічних процесів у системах. Це потребує застосування замість складних математичних описів більш простих моделей. Задачу корегування динамічної моделі пропонується ставити як задачу уточнення або визначення параметрів моделі. Спираючись на ідею узгодження виду моделі з точністю вихідних даних, формулюється задача «точностної» редукції як задача мінімізації функціоналу складності на класі моделей, які можна співставити за точністю зі спостереженнями. Конструктивність процедури спрощення моделі за принципом «точностної» редукції забезпечується запропонованим визначенням коефіцієнта узгодженості  $\alpha$ , як точностної характеристики редукційованої моделі. Застосування міри складності моделі при цьому дозволяє отримати практичний вираз для визначення оптимально спрощеної моделі.

4. Технічна частина силових енергетичних установок представляє собою складний фізичний об'єкт з розподіленими параметрами, базовим математичним описом яких є диференціальні рівняння з частинними похідними. У зв'язку з принциповою складністю чисельних методів і програмної реалізації цих моделей запропонований та досліджений інтерполяційний метод (метод опорних перерізів)

отримання спрощених моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді скалярних диференціальних рівнянь на основі вихідних (базових) описів у формі диференціальних рівнянь з частинними похідними; отримані звичайні диференціальні рівняння визначаються залежностями для невеликої кількості перерізів об'єкта, що моделюється, а їх розв'язок дозволяє представити розв'язок вихідної задачі у вигляді простого полінома; метод практично інваріантний відносно форми базової моделі та ефективно алгоритмізується і забезпечує побудову економічних швидкодіючих програмних засобів, що підтверджуються обчислювальними експериментами.

5. Вирішено важливу науково-технічну задачу, яка полягає у синтезі математичних моделей визначеного класу об'єктів та засобів керування цими об'єктами на основі застосування і удосконалення безпошукових самоналагоджуваних систем з еталонною моделлю, що забезпечує оптимізацію зазначених систем у розумінні найкращого наближення характеристик об'єкта керування та еталонної моделі для ефективного розв'язання прикладних задач. Запропоновано узагальнену модель з метою уніфікації методів щодо синтезу стратегій адаптивного керування визначеним класом об'єктів. Виконано якісне дослідження узагальненої моделі, що показало можливість переходу до еквівалентних математичних формулювань у випадках апаратної або програмної реалізації законів керування. Виділено клас адаптивних систем з еталонною моделлю як такий, що забезпечує високу адекватність синтезованого управління (з точністю до відтворення моделлю динаміки реального об'єкта), високу швидкодію (управління формується в реальному масштабі часу) та просту апаратну реалізацію. Задачу синтезу розв'язано для систем з параметричним, сигнальним та комбінованим настроюванням. Виконано оптимізацію синтезованих систем керування з еталонною моделлю у розумінні найкращого наближення характеристик об'єкта керування та еталонної моделі (системи, оптимальні за швидкодією).

6. Запропонований модельно-ідентифікаційний метод діагностування динамічних систем, який забезпечує визначення відхилення параметрів в об'єкті, що діагностується, від номінальних значень. Суттєву та визначальну роль у ефективному розв'язанні задач відіграє метод мінімізації функціоналу в оптимізаційному процесі досягнення результату діагностування. Ретельне дослідження методів мінімізації, що застосовуються в практиці, виконане шляхом обчислювальних експериментів. Результати вказують на явну перевагу методу найменших квадратів. Алгоритми мінімізації, за винятком методу найменших квадратів, мають важливий недолік, що обмежує їхнє застосування – наявність статистичних даних і маніпулювання випадковими процесами. Процедури модельного діагностування динамічних систем розглядаються як основні положення реалізації модельного підходу до діагностування систем при обмеженому доступі до їхніх внутрішніх точок. Розглядаються параметричні і структурні несправності.

7. Запропоновані методи адаптації обчислювальних алгоритмів при реалізації диференціальних і інтегральних динамічних моделей. Зростання складності



досліджуваних динамічних об'єктів зумовила розвиток *неявних* методів чисельного аналізу динаміки, але проведені дослідження свідчать, що застосування неявних методів виправдано, коли можливий великий крок інтегрування вихідної системи або коли рівняння на кроці може бути розв'язане досить просто. Крім того, встановлено, що наявні результати по формалізації степеневих методів і адаптація їх при комп'ютерному використанні поки ще недостатні для вирішення питання про їх застосування при дослідженні складних динамічних об'єктів. Обмеження кроку інтегрування зверху свідчить про недоцільність використання методів Рунге-Кутта високого порядку для цілей моделювання динаміки досліджуваних систем в реальному часі. Відповідно до квадратурних методів у загальному вигляді задача формалізації побудови не вирішена. Оптимальним визначається чисельний метод інтегрування рівнянь динаміки об'єкта, для якого необхідна швидкодія управляючої системи мінімальна, а похибка розв'язання рівнянь динаміки не перевищує заданого значення. Проведений аналіз властивостей різних груп чисельних методів дає змогу зробити висновок про те, що при виборі найкращого методу вихідну множину необхідних методів слід формувати на основі однокрокових методів типу Рунге-Кутта і квадратурних методів не вище четвертого порядку. При використанні стаціонарних режимів модельованих об'єктів в вихідну групу методів слід включати також багатокрокові методи – явні і типу «прогноз – корекція». При розв'язанні інтегральних рівнянь запропонований як найбільш ефективний метод виродженої резольвенти. Порівняння з іншими методами показало, що при розв'язанні тестової задачі на отримання результату методом квадратур знадобилося  $0,2369 \cdot 10^{-2}$  с; резольвентним методом потрібно було 5 ітеративних ядер і  $0,2567 \cdot 10^{-2}$  с; методом вироджених ядер –  $0,1859 \cdot 10^{-2}$  с; методом виродженої резольвенти – 5 ітеративних ядер і  $0,1659 \cdot 10^{-2}$  с.

8. Системи інструментальних засобів для виконання перетворення моделей динамічних об'єктів на основі запропонованих алгоритмів складається з 12 основних функцій, призначених безпосередньо для виконання еквівалентного та апроксимаційного перетворення моделей динамічних об'єктів, а також з семи допоміжних функцій. Засоби формування і реалізації моделей об'єктів із розподіленими параметрами складаються із підпрограм і функцій та включають три основні модулі, які виконують структурне спрощення базових моделей та чисельно реалізують спрощені моделі. Програми для реалізації динамічних макромоделей організовані у вигляді комплексу за модульним принципом організації, у відповідності з яким програми розбиваються на декілька підпрограм і функцій, що допускають їх подальший розвиток та корекцію. Комплекс програм для розв'язання інтегральних динамічних моделей виконано за принципом побудови типового ToolBox з урахуванням вимог згідно з інформацією, що розміщена компанією. Комплекс складається з 23 програм, які охоплюють всі основні види інтегральних рівнянь та методи розв'язання їх на основі розщеплення ядер, що є, по суті, завершеним інструментарієм для апробації і порівняння у повному обсязі алгоритмів, запропонованих у роботі, для розв'язування тестових прикладів і складних прикладних задач.



## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації.

1. Верлань А. А. Интегральные динамические модели электромеханических объектов: Монография / А. А. Верлань, М. В. Сагатов, В. А. Федорчук.– Т.: IQTISOD-MOLYA ISBN 978-9943-13-581, 2015.– 328 с.
2. Верлань А.А. Об энергоэффективности сверхпроводящих устройств для запитки магнитных систем // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 3.– Львів, Світ, 1998.– С. 173–184.
3. Верлань А.А. Алгоритм моделирования нелинейных периодических процессов на основе решения уравнения Урысона / А.А. Верлань, Л.А. Митько., А.Б. Руденко // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 3. Київ, 1999.– С. 3–7.
4. Верлань А.А. Квадратурные алгоритмы моделирования измерительных преобразователей с распределенными параметрами / А.А. Верлань, М.В. Сагатов, А.А. Сітнік // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 6. Київ, 2000.– С. 131–136.
5. Верлань А.А. Интегральные модели однопараметрических первичных преобразователей / М.В. Сагатов, А.А. Верлань // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 8, 2001.– С. 38–43.
6. Верлань А.А. Интегральные модели многопараметрических первичных преобразователей / М.В. Сагатов, А.А. Верлань // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 9, 2001.– С. 30–34.
7. Верлань А.А. Способ упрощения динамической модели / А.А. Верлань, М.В. Сагатов, В.Ф. Юзвенко // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 10.– 2001.– С. 98–101.
8. Верлань А.А. Способы получения интегральных динамических моделей измерительных преобразователей с распределенными параметрами / М.В. Сагатов, А.А. Верлань // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 12.– 2001.– С. 138–145.
9. Верлань А.А. Розв'язання систем інтегро-диференціальних рівнянь у системі Матлаб / А.Б. Волощенко, А.А. Верлань, Д.Е. Контрерас // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 11.– Київ: 2001.– С. 78–82.
10. Верлань А.А. Вероятностно-физическое моделирование отказов радиоэлектронных устройств при воздействии мощных радиационных и электромагнитных излучений / А.А. Верлань, Т.П. Гушель, В.И. Борковец // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 11.– Київ: 2001.– С. 99–105.
11. Верлань А.А. Определение информативных признаков по сигналам акустической эмиссии при диагностике конструкций / В.И. Борковец, А.А. Верлань, Т.П. Гушель, В.Ф. Юзвенко. // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 13.– Київ: 2001.– С. 58–70.

12. Верлань А.А. Коллокационный алгоритм решения уравнения Вольтерры I рода / А.А. Верлань, А.Б. Волощенко, М.В. Сагатов // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 13.– Київ: 2001.– С. 97–100.
13. Верлань А.А. Модель системы защиты от емкостных токов утечки в шахтных электрических сетях / А.Ф. Верлань, А.А. Верлань, Т.П. Гушель // Электронное моделирование. ISSN 0204-3572. ИПМЭ НАНУ. Том 24. №6: ноябрь–декабрь 2002.– С. 11–16.
14. Верлань А.А. Математические модели моментов трения в уравнениях динамики управляемого движения / А.А. Верлань А.А. Сытник // Зб. Наук. Праць. ІПМЕ НАНУ Вип.. 15.–2002.– С. 71–75.
15. Верлань А.А. Алгоритм моделирования периодических режимов схем преобразовательной техники / А.А. Верлань // Зб. Наук. Праць, ІПМЕ НАНУ. Вип. 18.– 2002.– С. 77–87.
16. Верлань А.А. Моделирование динамики электропривода (линейные модели 1) / А.А. Сытник, А.А. Верлань, С.М. Первунинский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. №1.– Прилади і радіотехніка: 2002.– С. 36–40.
17. Верлань А.А. Моделирование динамики электропривода (линейные модели 2) / А.А. Сытник, А.А. Верлань, С.М. Первунинский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. №2.– Прилади і радіотехніка: 2002.– С. 74–79.
18. Верлань А.А. Некоторые варианты математических описаний электропривода (нелинейные модели 3) / А.А. Сытник, А.А. Верлань, С.М. Первунинский // Вісник Черкаського державного технологічного університету. №3.– Прилади і радіотехніка: 2002.– С. 39–42.
19. Verlan Andrey. Model support of technical diagnostics systems design / Alexey Oletsky, Ivan Goroshko, Andrey Verlan // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 20.– Київ: 2003.– С. 108–112.
20. Верлань А.А. Подход к моделированию систем энергообеспечения сверхпроводниковых магнитных комплексов // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 19.– Київ: 2003.– С. 149–160.
21. Верлань А. А. Сравнение методов упрощения динамических моделей посредством модельных экспериментов / Т.П. Гушель, А.А. Верлань, В.Ф. Юзвенко // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 20.– Київ: 2003.– С. 108–112.
22. Верлань А.А., Гази А. Интегральные динамические модели нестационарных непрерывных объектов // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 22.– Київ: 2003.– С. 82–91.
23. Верлань А. А. Алгоритм идентификации непрерывных объектов на основе интегральных динамических моделей / А. А. Верлань, А. Гази // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАНУ. Вип. 25.– 2003.– С. 105–112.
24. Верлань А. А. Построение математических моделей технологических процессов для решения задач оптимизации управления / А. А. Сытник., А. А. Верлань, Амид Гази // Вісник Черкаського державного технологічного

- університету №3.– Комп'ютеризовані інформаційні технології та системию.– 2003.– С. 31–37.
25. Верлань А.А. Моделирование электромагнитных процессов в сверхпроводниковых системах энергообеспечения // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 26.– Київ: 2004.– С. 111–119.
26. Верлань А.А. Анализ методов и алгоритмов моделирования сверхпроводниковых систем энергообеспечения с изменяющейся структурой // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 28.– Київ: 2004.– С. 89–94.
27. Верлань А.А. Модели нестационарных процессов в силовых криотронах систем энергообеспечения сверхпроводниковых магнитных комплексов // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 27.– 2004.– С. 101–107.
28. Верлань А.А., Контрерас Д.Э., Гази А. Интегральный алгоритм идентификации динамических объектов // Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 27.– Київ: 2004.– с. 114–120.
29. Верлань А.А. Регуляризация линеаризованных систем уравнений при идентификации нелинейных объектов / А.А. Сытник., А.А. Верлань, А.Гази // Вісник Черкаського державного технологічного університету, Математичне моделювання та обчислювальні методи, №1, 2004.– С. 25–27.
30. Верлань А.А. Специализированные алгоритмы и устройства для интегрированных систем защиты информации /А.А. Верлань, Ю. Бойко // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України.– К., 2005.– В.31.– С.51–57.
31. Верлань А.А., Бойко Ю.Д. Метод декомпозиции структуры корпоративной сети // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України – К., 2006.– В.32. – С.34–41.
32. Верлань А.А., Одокиенко С.Н., Тихоход В.А. Квадратурные алгоритмы численного моделирования нелинейных динамических объектов с обратными связями // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. Вип. 38.– К., 2006.– С. 89–95.
33. Верлань А.А. Интегро-дифференциальные модели многосвязных динамических объектов / А.А. Верлань, В.А. Тихоход // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації. Зб. наук праць.– Київ–Кам'янець-Подільський, 2006.– С. 120–125.
34. Верлань А.А. Декомпозиционный метод локализации неисправных электронных подсхем / А.А. Верлань, С.А. Положаєнко, И.Х. Осман // Електромашинобудування та електрообладнання. Вип. 69.– К.: Техніка, 2007.– С. 72–76.
35. Верлань А.А., Ключка К.М., Осман И.Х. Локализация неисправных подсхем в электронных устройствах в условиях разброса значений параметров шумов измерений // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. Вип. 38.– К.: 2007.– С. 94–101.

36. Верлань А.А., Осман И.Х. Метод идентификационных экспериментов для диагностирования электронных устройств // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. Вип. 42.– К., 2007.– С. 98–105.
37. Верлань А.А., Митько Л.А., Дячук А.А., Федорчук В.А. О выборе численных методов решения дифференциальных уравнений для систем моделирования и управления // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України. Вип. 44.– К., 2007.– С. 90 –95.
38. Верлань А.А. Об одном способе синтеза нелинейных регуляторов управляемых динамических систем / А.А. Верлань, В.А. Федорчук, Ю.Д. Бойко // Електромашинобудування та електрообладнання.– К.: Техніка, 2008.– Вип. 70 – С. 132–137.
39. Верлань А.А. Локализация неисправных электронных подсхем методом обучающих и проверочных характеристик / А.А. Верлань, С.А. Положаенко, И.Х. Осман // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки: зб. наук. праць.– Кам'янець-Подільський, 2008.– Вип. 1.– С. 140–144.
40. Верлань А.А. Анализ диагностируемости объектов с перестраиваемой структурой / А.А. Верлань // Моделювання та інформаційні технології: збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України.– К., 2008.– Вип. 45.– С. 3 –9.
41. Верлань А.А. Метод формування інтегральних рівнянь нелінійних електричних кіл / О.О. Ситник, А.А. Верлань, К.Н. Ключка // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 47.– 2008.– С. 59–70.
42. Верлань А.А. Достаточные условия сходимости рядов Вольтерра для определенных классов нелинейных цепей / А.А. Верлань, К.Н. Ключка // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України.– К., 2008.– Вип. 45.– С. 8 –16.
43. Верлань А.А. Семантична інформація та лінгвістичні змінні в інформаційних технологіях / О.В. Нечипоренко, А.А. Верлань, Ю.О. Фуртат // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць.– Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2009.– Вип. 2.– С. 128–136.
44. Верлань А.А. Об одном подходе к расчету переходных процессов в сложных полупроводниковых и сверхпроводниковых преобразователях / А.А. Верлань // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки. Зб. наук. праць. Вип. 3.– Кам'янець-Подільський.– 2010.– С. 26 – 37.
45. Верлань А.А. Численное решение двумерного уравнения теплопроводности с использованием технологии OPENMP / А.А. Верлань, Д.С. Смаковский., И.Ю. Михайлова // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки. Зб. наук. праць. Вип. 4.– Кам'янець-Подільський.– 2010.– С. 56–64.
46. Верлань А.А. Способ параметрического контроля численного моделирования динамических объектов // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки. Зб. наук. праць. Вип. 5.– Кам'янець-Подільський.– 2011.– С. 21–26.
47. Верлань А.А. Способы локализации и идентификации элементов электрических устройств в задачах диагностики // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Техн. науки. Зб. наук. праць. Вип. 7.– Кам'янець-Подільський.– 2012.– С. 20–27.

48. Верлань А.А. Об одном способе построения системы контроля вторичных источников электропитания / А.А. Верлань // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2013.– Вип. 8.– С. 22–31.
49. Верлань А.А. Об организации структуры источников электропитания с защитой и автоматизированной системой контроля / А.А. Верлань // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2013.– Вип. 9.– С. 14–23.
50. Верлань А.А. Аппроксимационные модели нестационарных тепловых процессов в неограниченной пластине с несимметричными граничными условиями / А.А. Верлань, А.И. Махович // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2014.– Вип. 10.– С. 42–55.
51. Verlan A.A. On the Representation of Non-Linear Functions by Fractional-Power Series / A. A. Verlan, Jo Sterten // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.– Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2014.– Вип. 11.– С. 194–199.
52. Верлань А.А. Диагностирование сложных электронных схем на основе метода обучающих и проверочных характеристик / А.А.Верлань, Ю Стертен // ISSN 2221-3805 International Scientific and Technical Conference Electrotechnic and Computer Systems: Theory and Practice, Odesa National Polytechnic university, July 20–24, 2015.– Scientific and Technical Journal Electrotechnic and Computer Systems.– No. 19 (95).– P.272–276.
53. А.А. Верлань, Ю. Стертен, С.А. Положаенко. Формализация представления последовательности тестовых гипотез при диагностировании электронных схем // Информатика та математичні методи в моделюванні. Одеський національний політехнічний університет, 2016. Т. 6. № 4. С. 315–321.
54. Верлань А. А. Алгоритмизация методов точностной параметрической редукции математических моделей / А.Ф. Верлань, А.А. Верлань, С.А. Положаенко // Информатика та математичні методи в моделюванні.– Одеський національний політехнічний університет.– 2017.– Т. 7, № 1-2.– С. 7–18.
55. Верлань А. А. Алгоритм реализации интегральных макромоделей явного вида / А. А. Верлань, Ю Стертен, С. А. Положаенко // ISSN 2221-3805 Scientific and Technical Journal Electrotechnic and Computer Systems.– Odesa “Astroprint”.– 2017.– Vol. 24 (100).– P.143–150.
56. Верлань А. А. Спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі методу розщеплення / А.А. Верлань, В.А. Іванюк // Информатика та математичні методи в моделюванні.– Одеський національний політехнічний університет.– 2017.– Т. 7, № 4.– С. 285–291.

57. Verlan A.A. Mathematical modeling of mixing micro jets of gas applied to the flaw detection problems / A. A. Verlan, Jo Sterten // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2015.– Вип. 12.– С. 5–14 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
58. Verlan A.A. Principles of Precision Parametric Reduction for Mathematical Models / A. A. Verlan, Jo Sterten, O. Ogorodnyk // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2015.– Вип. 12.– С. 15–23 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
59. Верлань А. А. Підходи до побудови скалярних динамічних моделей розподілених ланок керованих електромеханічних систем / А. А. Верлань, В. А. Федорчук // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2016.– Вип. 13.– С. 49–61 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
60. Verlan A.A. An approach to the precision parametric reduction of mathematical models / A.A. Verlan // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.–Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, – Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський : К-ПНУ, 2016.– Вип. 14.– С. 26–36(*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
61. Verlan A.A. Algorithms for Dynamic Correction of the Thermal Flows' Measuring Systems / A.A. Verlan, Jo Sterten, Yu.O. Furtat Yu.O. // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України.– Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ, 2016.– Вип. 14.– С. 36–48 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
62. Verlan A.A. On the choice of numerical methods for solving dynamic equations for control systems with embedded calculating tools / А. А. Верлань, В. А. Федорчук // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.–Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2017.– Вип. 15.– С. 37–43 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).
63. Verlan A.A. Method of construction of specialized algorithms for solving differential equations / А. А. Верлань // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія:

Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.– Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2017.– Вип. 16.– С.30–35 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).

64. Verlan Andriy. Method of Regularizing the problem of recovery of input signals of dynamic objects / Andriy Verlan, Jo Sterten, Yurii Furtat // *Computational Problems of Electrical Engineering*.– Lviv Polytechnic National University.– 2016.– Vol.6, N 2.– P.113–116 (*Google Scholar, Ulrich's Web ma Index Copernicus*).

65. Verlan Andrey, Sterten Jo. Implementation of Integral Explicit Macromodels by Means of Quick-Acting Algorithms / Andriy Verlan, Jo Sterten // *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.– Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2018.– Вип. 18, С.26–33 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).*

66. Верлань А.А. Параметрическая редукция математических моделей динамических систем / А.А. Верлань, А.А. Дячук, Е.А. Палагина, В.В. Палагин // *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки : зб. наук. праць.– Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ.– Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.– Кам'янець-Подільський: К-ПНУ.– 2018.– Вип. 18.– С.39–55 (*Google Scholar, Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers database NSD*).*

#### **Праці апробаційного характеру.**

67. Verlan Andrey. Power Circuits Dynamic Analysis using Generalized State-Space Model / Anatoliy Verlan, Andrey Verlan, Ivan Goroshko, Tatyana Gushel // *NEU-CEE-2004, Second International Symposium on Electrical, Electronic & Computer Engineering. IEEE. TRNC. Lefkosa: 2004.– P. 323–327 (IEEE)*.

68. Verlan A.A. Singular systems theory application in power systems dynamics simulation / A.F. Verlan, A.A. Verlan, T.P. Gushel // *6<sup>th</sup> International Conference Control of Power System.– Slovakia, 2004.– P.1–4*.

69. Верлань А.А., Одокиенко С.Н. Быстродействующие алгоритмы численной реализации неявных интегральных динамических моделей // *Тр. междунар. конф. "Информационные технологии в управлении энергетическими системами" ИТУЭС-2005, 18–19 окт. 2005г.– Киев, Украина.– С. 82*.

70. Verlan A.A. Analysis of power circuits' dynamics using generalized state-space model / A.A. Verlan, B.B. Abdusatarov, Miraziz Sagatov, A.A. Sytnik // *Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2006, Tashkent, Uzbekistan. November 21–22, 2006.– P. 168–176*.

71. Verlan A.A. Application of singular systems theory in power systems dynamics simulation / A.A. Verlan, B.B. Abdusatarov, D.E Kontreras // *Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2006, Tashkent, Uzbekistan. November 21–22, 2006.– P. 163–167*.

72. Verlan Andriy. Simulation of electrical systems for supplying superconducting magnetic energy storage / Andriy Verlan, Anatoliy Verlan, Aleksand Sytnik // *ISEECE*

- 2006, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Electrical, Electronic and Engineering. IEEE.– November 23–25, 2006.– Nicosia, North Cyprus.– P.214–220 (*IEEE*).
73. Верлань А.А. Approach to mathematical simulation of electrical systems for supplying superconducting magnetic energy storage / А.А. Верлань // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Доклады республиканской научно-технической конференции. Институт математики и информационных технологий АН РУз.– Ташкент, 2011.– Т.2.– С.8–18.
74. Верлань А.А. Идентификация динамического объекта с переменными параметрами на основе метода «формирующего фильтра» / А.А. Верлань, В.В. Палагин, Т.А. Носик. // IV міжнародна наукова конференція “Моделювання-2012 / Simulation-2012” : Зб. наук. праць.– Київ: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України.– 2012.– С.318–321.
75. Верлань А.А. Интегральный метод моделирования и анализа автономных систем энергообеспечения на основе полупроводниковых и сверхпроводниковых преобразователей / А.А. Верлань // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: тези доповідей V міжнар. наук. конф. / [редкол.: І. В. Бейко та ін.]– Кам’янець-Подільський: Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2012.– С. 20–21.
76. Верлань А.А., Махович А.И. Интегральные модели переходных процессов в электрических цепях, содержащих звенья с распределенными параметрами / А.А. Верлань, В.А., Федорчук А.И. Махович // Проблемы энерго и ресурсосбережения. Доклады республиканской научно-технической конференции АНРУз.– Ташкент, 22–23 декабря.– 2014.
77. A.A.Verlan, J. Sterten, O. Ogorodnyk. Mathematical Modelling of Complex Singular Power Systems’ Dynamics // The 11th International Conference on Multimedia Information Technology and Applications, June 30–July 2 2015. Tashkent. Uzbekistan. Organized by the Korea Multimedia Society (KMMS), the Republic of Korea. IEEE.– P. 43–46 (*IEEE*).
78. Verlan A.A. Power energy units dynamic models development and program implementation / A. A. Verlan, Jo Sterten. // 5th International Scientific Conference «Signal and non-Gaussian noise processing».– Cherkasy State Technological University, May 20 – 22, 2015.– P. 140 – 142.
79. Verlan Andriy. Inverse method of restoring distributed signals in surveillance systems / Jo Sterten, Andriy Verlan , Dmitriy Verlan. // XX International Scientific Practical Conference “Innovation-2015”, October 23–24, 2015.– Tashkent. Uzbekistan. – P.32–39.
80. A.A.Verlan’, Jo Sterten. Algorithm for Modelling a Dynamic Object by Means of the Convolution Operation // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: тези доповідей 7-ї Міжнародної наукової конференції ОПТІМА. Кам’янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 21–22 квітня 2016.– С. 32–33.
81. Verlan’ A.A. Adaptation and Implementation of Modern Learning Techniques in Master of Sustainable Manufacturing: Cultural Challenges, Effects and Potential for Improvement / Jo Sterten, Kari Nordskogenb, A.A.Verlan’ // The 6th Conference on



Learning Factories. Norwegian University of Science and Technology.– published by Elsevier, – 2016.– Procedia CIRP.– Volume 54.– P. 170–174. (*Published by Elsevier, ScienceDirect® and Scopus® are registered trademarks of Elsevier, Web of Science*).

82. Verlan' A.A. Moving Objects' Full-Scale Simulators' Composition / A.A.Verlan', A.F.Verlan' // Ninth World Conference "Intelligent systems for industrial automation".– WCIS-2016.–Abu Rayhan Beruni Tashkent State Technical University.– Oct. 25–27, 2016.– Tashkent.– P. 144–146.

83. Verlan A.A. On the choice of numerical methods for solving dynamic equations for control systems with embedded calculating tools / A. A. Верлань, В. А. Федорчук // Міжнародна наукова конференція. Питання оптимізації обчислень ISCOPT-2017. Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАНУ. Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка.– 26–28 вересня 2017 р. Київ: 2017.– С. 8.

84. Verlan A.A. Models of Dynamic Objects with Distributed Parameters / A.A. Verlan, Jo. Sterten // Proceeding of the XXII International Scientific and Practical Conference "Innovation-2017". Tashkent State Technical University. Center for Strategic Innovation and Informatization. Uzbekistan: Navruz, Oct.26–27.– 2017, P. 252–254.

85. Andriy Verlan, Jo Sterten. Advanced Structural Organization of the Signal Recovery Processes in Measuring Systems // 7TH International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE 2017). University of National and World Economy (UNWE). Sofia, Bulgaria. November 3–4.– 2017.

86. Верлань А.А. Методи редукції математических моделей динаміческих систем / А.А. Верлань, В.В. Палагін // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації : тези доповідей 8-ї Міжнародної наукової конференції.– Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка.– 18–20 квітня 2018 р.–С. 18–19.

87. Verlan, Andriy; Fedorchuk, V.A. Computer modelling of drill string of an oilwell drilling rig. *IEEE Proceedings of 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. February 20 – 24, 2018, Lviv, Ukraine. IEEE 2018 ISBN 978-1-5386-2556-9.– P. 346–350 (*IEEE, видання включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS*).

#### **Статті в іншому виданні.**

88. Верлань А. А. Моделювання електромагнітних і теплофізичних процесів в надпровідникових системах енергозабезпечення із структурою, що змінюється / А.Ф Верлань, В.М. Владимиров, А.А. Верлань, И.О. Горошко та ін. // Структурно-алгоритмические методы и средства компьютерного моделирования сложных энергетических объектов с распределенными и переменными параметрами. Заключит. отчет. № г/р 0101U000024.– Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова НАН Украины.– К., 2004.– Разд. 8.– С. 285–306.

89. Верлань А.А Алгоритмические основы реализации интегрального метода идентификации динамических объектов. Интегральные методы и компьютерные средства решения задач моделирования сложных динамических систем / А.Ф. Верлань, А.А., Верлань, И.О., Горошко, В.М. Бондаренко та ін. // Математические

методы и компьютерные средства повышения разрешающей способности систем технологического контроля и управления энергогенерирующего оборудования: Заключит. отчет. № г/р 0103U000218.– Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова НАН Украины.– К., 2006.– Разд. 3, 5.– С. 120–146, 200–231.

90. Верлань А.А. Математические и компьютерные методы исследования нелинейных и многосвязных динамических систем, описываемых интегральными и интегро–дифференциальными моделями / А.А.Верлань, И.М. Гвоздева, Л.А. Митько, А.А. Дячук, В.А. Тихоход, В.Ф. Миргород // Математическое и компьютерное моделирование неоднородных динамических систем с сингулярными свойствами применительно к задачам управления и экологической безопасности в энергетике: Отчет о НИР (заключительный).– ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины.– № ГР 0106U000622.– К., 2009.– С. 64–91.

91. Верлань А.А. Моделирование процессов в сложных полупроводниковых и сверхпроводниковых преобразователях / Uzbek Journal of the problems of Informatics and Energetics. «Издательство «Фан», Институт математики и информационных технологий АН РУз.– Ташкент, 2011.– Т.5.– С.15–23.

92. Верлань А.А. Моделирование техногенного риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий с использованием ГИС технологий / Верченев А.Д, Верлань А.А., Михайленко А.Г, Янчук А.В, Волкодав С.В., Марков А.С. // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Географія.– 2012.– Т. 61, № 1.– С. 38–47.

93. Верлань А.А. Вибір та адаптація чисельних методів при створенні алгоритмічних основ реалізації задіяних математичних моделей / А.Ф. Верлань В.А. Федорчук, Ю. Стертен // Створення методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання динамічних процесів в автономних енергетичних силових установках при побудові сучасних систем керування, діагностики і випробування.– Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.– № Держреєстрації 0111U007792.– К., 2017.– С. 114–155.

## АНОТАЦІЯ

**Верлань А.А. Адаптаційні методи та засоби математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем (стосовно до силових енергетичних установок).** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2019.

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема створення, розвитку та підвищення ефективності методів і засобів математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих технічних систем з адаптаційним забезпеченням можливостей дослідження і побудови засобів керування та діагностики. Розроблені адаптаційні методи формування динамічних моделей комп'ютерно-інтегрованих систем з урахуванням

альтернативностей їх можливих форм, що забезпечує побудову необхідної моделі за принципом мінімальної складності при заданих вимогах до показників якості (точності). Запропоновано новий метод еквівалентного перетворення диференціальних динамічних моделей до інтегральних (метод розділення з аналітичним розв'язком). Розроблено інтерполяційний метод апроксимаційного перетворення моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді диференціальних рівнянь з частинними похідними до скалярних моделей у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь. Запропоновано метод побудови адаптивних систем керування з використанням еталонної моделі об'єкта керування. Запропоновані нові модельно-орієнтовані методи і відповідні структури систем діагностування на основі ідентифікаційного підходу. Розвинуто інтегральний підхід до математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем на основі застосування одновимірних непараметричних інтегральних динамічних моделей у вигляді операторів і рівнянь Вольтерра. Набув подальшого розвитку підхід до вибору та адаптації чисельних методів при створенні алгоритмів моделювання процесів в комп'ютерно-інтегрованих системах. Запропоновані методи моделювання та комп'ютерні засоби дозволяють забезпечити якісне відтворення властивостей, характеристик і параметрів широкого класу комп'ютерно-інтегрованих систем. Розроблений пакет прикладних програм, реалізований в моделюючому середовищі Матлаб і призначений для дослідження за забезпечення процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем як лабораторних дослідженнях, так і в умовах застосування в реальних системах із забезпеченням умов керування та діагностики.

**Ключові слова:** комп'ютерно-інтегровані системи, еквівалентне перетворення моделей, апроксимаційне перетворення моделей, параметрична редукція моделей, інтерполяційний метод моделювання об'єктів з розподіленими параметрами, адаптивні системи, еталонна модель, алгоритми моделювання, програмний комплекс.

## АННОТАЦІЯ

**Верлань А.А. Адаптационные методы и средства математического моделирования процессов функционирования компьютерно-интегрированных систем (применительно к силовым энергетическим установкам).** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев, 2019.

В диссертационной работе решена важная научно-техническая проблема создания, развития и повышения эффективности методов и средств математического моделирования процессов функционирования компьютерно-интегрированных технических систем с адаптационным обеспечением возможностей исследования и построения средств управления и диагностики.

Разработаны адаптационные методы формирования динамических моделей компьютерно-интегрированных систем с учетом альтернативности их возможных форм, что обеспечивает возможности построения необходимой модели по принципу минимальной сложности при заданных требованиях к показателям качества (точности). Предложен новый метод эквивалентного преобразования дифференциальных динамических моделей к интегральным (метод разделения с аналитическим решением), который обобщает известные методы и позволяет получать не только эквивалентные интегральные уравнения, но ряд эквивалентных моделей в виде интегро-дифференциальных уравнений, значительно повышающий возможности выбора модели.

Разработаны и исследованы методы редукции основных математических моделей объектов с распределенными параметрами в виде дифференциальных уравнений с частными производными. Разработан новый интерполяционный метод аппроксимационного преобразования (опорных сечений) моделей объектов с распределенными параметрами в виде дифференциальных уравнений в частных производных к скалярным моделям в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет получить приближенную модель со значительно меньшей сложностью и обеспечить существенное уменьшение требований к быстродействию компьютерных средств при реализации моделей.

Предложен принцип построения и проведено моделирование процессов функционирования адаптивных систем управления с использованием эталонной модели объекта управления, что развивает модельный подход к организации систем управления на основе эталонной динамической модели. Предложены параметрический, сигнальный и комбинированный способы настройки управляющего блока в обратной связи системы, а также новый метод построения управляющего канала обратной связи с использованием эталонной модели, который формирует управляющее воздействие по принципу непрерывного отслеживания поведения модели без применения оптимизационных вычислений.

Предложены новые модельно-ориентированные методы и соответствующие структуры систем диагностирования на основе идентификационного подхода. Разработан новый (модельный) метод диагностирования непрерывных систем по принципу обнаружения неисправности путем построения модели текущего состояния неисправного фрагмента системы и сравнения значений ее параметров с их номинальными значениями, который обеспечивает обнаружение широкого класса возможных неисправностей при ограниченном доступе к внутренним элементам системы. Разработаны основные теоретические положения метода и основы алгоритмической реализации.

Развит интегральный подход к математическому моделированию процессов функционирования компьютерно-интегрированных систем на основе применения одномерных непараметрических интегральных динамических моделей в виде операторов и уравнений Вольтерра, которые могут быть построены как путем аналитических преобразований, так и по экспериментальным данным и обеспечивают возможность моделирования объектов с сосредоточенными и распределенными параметрами и численную реализацию средствами структурно-

алгоритмического программирования. Разработаны эффективные и быстродействующие квадратурные алгоритмы численной реализации интегральных динамических моделей в виде уравнений Вольтерра второго рода на основе резольвенты, обеспечивающие возможность реализации явных интегральных динамических макромоделей.

Получил дальнейшее развитие подход к выбору и адаптации численных методов при создании алгоритмов моделирования процессов в компьютерно-интегрированных системах. Разработанный метод адаптационного определения алгоритмов численной реализации дифференциальных динамических моделей в виде обыкновенных дифференциальных уравнений на основе предложенных критериев оптимальности вычислительных схем.

Предложены методы моделирования и компьютерные средства позволяют обеспечить качественное воспроизведение свойств, характеристик и параметров широкого класса компьютерно-интегрированных систем. Разработанный пакет прикладных программ, реализованный в моделирующей среде Матлаб предназначен для исследования и обеспечения процессов функционирования компьютерно-интегрированных систем как в лабораторных исследованиях, так и в условиях применения в реальных системах с обеспечением условий управления и диагностики.

**Ключевые слова:** компьютерно-интегрированные системы, эквивалентное преобразование моделей, аппроксимационные преобразования моделей, параметрическая редукция моделей, интерполяционный метод моделирования объектов с распределенными параметрами, адаптивные системы, эталонная модель, алгоритмы моделирования, программный комплекс.

## ANNOTATION

***Verlan' A.A. Adaptive methods and means of mathematical modeling of the computer-integrated systems' functioning processes (in relation to power plants).*** – As the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and calculation methods. – Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation deals with the important scientific and technical problem of creation, development and improvement of methods and means of mathematical modeling of processes of functioning of computer-integrated technical systems with adaptive provision of research and construction facilities of control and diagnostics. Adaptation methods for the formation of dynamic models of computer-integrated systems are developed, taking into account alternatives of their possible forms, which provides the construction of the necessary model on the principle of minimal complexity with the set requirements for quality indicators (accuracy). A new method for the equivalent transformation of differential dynamic models to integral ones is proposed (separation method with analytical solution). An interpolation method for the approximation of models of objects with distributed parameters in the form of differential equations with partial derivatives to scalar models in the form of systems of ordinary

differential equations is developed. A method for constructing adaptive control systems using a reference model of a control object is proposed. New model-oriented methods and corresponding structures of diagnosis systems based on identification approach are proposed. An integrated approach to mathematical modeling of the processes of computer-integrated systems functioning based on the use of one-dimensional non-parametric integral dynamic models in the form of Volterra operators and equations is developed. The approach to the selection and adaptation of numerical methods for creating process modeling algorithms in computer integrated systems has been further developed. The proposed modeling techniques and computer aids provide a quality reproduction of the properties, characteristics and parameters of a wide range of computer integrated systems. A suite of applications has been developed, implemented in Matlab's modeling environment, and designed for research to support the processes of computer-integrated systems functioning both in the laboratory and in real-world applications with control and diagnostic conditions.

**Keywords:** computer-integrated systems, equivalent model transformation, model approximation, parametric model reduction, interpolation method of modeling objects with distributed parameters, adaptive systems, reference model, modeling algorithms, software.

Підписано до друку.....2019. Формат 60x90/16.  
Папір офісний. Друк різнографічний. Гарнітура Times New Roman.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № .....

---

Надруковано в .....  
національному університеті .....,  
вул. ....  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
суб'єктів видавничої справи серії .....