

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Верланя Андрія Анатолійовича «Адаптаційні методи та засоби математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем (стосовно до силових енергетичних установок)», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - «Математичне моделювання та обчислювальні методи»

На відгук подано дисертацію загальним обсягом 467 сторінок, автореферат і копії 93 наукових праць, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації, а також документи про впровадження.

1. Актуальність теми наукового дослідження та її зв'язок з науковими програмами, планами і темами

Важливою сучасною проблемою техніки є створення комп'ютерно-інтегрованих систем, прикладом яких є силові енергетичні установки (СЕУ).

Комп'ютерно-інтегровані системи з необхідними властивостями повинні задовольняти принципу «Full responsibility systems» (системи з повною відповідальністю). Створення таких систем з урахуванням властивих їм обмежень 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

УПМЕ вх. 358

29.11.2019

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.

Для розв'язування задач проектування, управління, контролю, діагностики виникає необхідність розвинення методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання таких систем і 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.

Відмінною рисою технічних комп'ютерно-інтегрованих систем є різноманітність елементів, що входять до складу фізичної частини. Це породжує неоднорідність у математичному описі системи і зумовлює певні особливості методів і засобів математичного моделювання, які необхідно створювати.

Таким чином, 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.

Для розв'язання вказаної проблеми доцільним є структурно-орієнтований підхід в моделюванні, на якому традиційно ґрунтуються дослідження та інженерні розробки при створенні зразків нової техніки, 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.

Дисертаційна робота Верляня А.А. виконувалась в рамках науково-дослідних робіт, назви та номери держреєстрації яких наведено у вступі.

2. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Структурно дисертаційна робота відповідає меті та задачам досліджень і містить вступ, вісім розділів, висновки, список використаних джерел з 234 найменувань та шість додатків.

У *вступі* приводиться загальна характеристика роботи, сформульовано актуальність дослідження, його мету та завдання, наводяться 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 дослідження.

У *першому розділі* охарактеризовано 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 й функціонального забезпечення об'єктів, що розглядаються.

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. Запропоновано узагальнений метод еквівалентного перетворення диференціальних рівнянь у інтегральні та інтегро-диференціальні рівняння, 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. Наведено шляхи реалізації процесів спрощення моделей.

Третій розділ присвячено принципам та методу точнісної параметричної редукції математичних моделей; запропоновано основи алгоритмізації точнісної параметричної редукції та підхід до програмної реалізації процесів редукції моделей динамічних систем. Задача корегування динамічної моделі ставиться як задача уточнення або визначення параметрів моделі. Згідно з принципом узгодження виду моделі з точністю вихідних даних сформульовано задачу «точнісної» редукції як задачу мінімізації функціоналу складності на класі моделей, які можна співставити за точністю зі спостереженнями. Запропоновано визначення коефіцієнта узгодженості α , як точнісної характеристики редукційованої моделі. Застосування міри складності моделі при цьому дозволило отримати практичний вираз для визначення оптимально спрощеної моделі. Отримано суттєвий теоретичний результат для методів редукції моделей, а саме: для будь-якої моделі з неточно заданими параметрами, за умови, що похибка змінних на виході є зростаючою та обмеженою функцією від похибки параметрів, існує спрощена α -узгоджена

модель, яка відрізняється від початкової значеннями деяких параметрів, що зменшують міру обчислювальної складності. Отримані результати забезпечують можливість алгоритмічної та програмної організації процесів математичної редукції.

У четвертому розділі запропоновано і досліджено інтерполяційний метод для моделювання об'єктів з розподіленими параметрами. Запропонований метод опорних перерізів розглянуто на прикладі задачі моделювання нестационарних теплових процесів в об'єкті з симетричними та несиметричними граничними умовами, проведено дослідження ефективності запропонованого методу. Запропонований метод передбачає отримання спрощених моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді скалярних диференціальних рівнянь на основі вихідних 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. За допомогою методу опорних перерізів отримані спрощені моделі у вигляді звичайних диференціальних рівнянь для об'єктів з розподіленими параметрами параболічного типу з симетричними і несиметричними граничними умовами. Порівняння отриманих результатів спрощеного моделювання з результатами реалізації базових моделей за допомогою типових різницевих алгоритмів свідчить про значну перевагу запропонованого методу як по простоті обчислювальних процедур, так і по часу, витраченому на розв'язування. Завдяки особливості методу опорних перерізів, яка полягає в тому, що обчислення за просторовими змінними здійснюється за інтерполяційним поліномом, ефективність числової реалізації підвищується при зростанні кількості вузлів змінної за просторовою координатою, в яких відшукується

розв'язок. Розроблені способи застосування методу опорних перерізів для обмежених та напівобмежених просторових ОРП. Виведені готові для практичних розрахунків обчислювальні вирази для числової реалізації математичних моделей об'єктів даного класу, поданих у декартовій та циліндричній системах координат.

У п'ятому розділі одержав подальший розвиток метод синтезу стратегій і структур адаптивного керування математичною моделлю на основі вдосконалення безпошукових автоматичних систем із еталонною моделлю. В основу синтезу законів керування і структур автоматичних систем покладена властивість задоволення їх стійкості, обумовлене за другим методом Ляпунова, що дозволяє врахувати нестационарність основного контуру автоматичної системи 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. Використання в ході синтезу стратегій і структур АС функцій Ляпунова дозволило врахувати нестационарність основного контуру АС (тобто такого, що включає реальний модельований об'єкт), а також деякі нелінійності, наприклад, обмеження на керуючий вплив. Таким чином, вирішено важливу науково-технічну задачу, яка полягає у синтезі математичних моделей визначеного класу динамічних 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.

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, незалежним

керуванням та з незалежними спостереженням і керуванням одночасно. 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. Дослідження методів мінімізації, що найбільш застосовуються в практиці, виконане шляхом обчислювальних експериментів. Отримані результати порівняльного аналізу, що характеризують можливості обчислювальних алгоритмів ідентифікації вказують на перевагу методу найменших квадратів, а також на важливий недолік інших методів – наявність статистичних даних і випадкових процесів (за винятком методу найменших квадратів). Запропонована трьохрівнева структура системи діагностики об'єкта в умовах створення вбудованої інформаційно-керуючої системи з врахуванням зазначених алгоритмів.

У цьому розділі досліджено 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). Проведений аналіз властивостей різних груп чисельних методів для диференціальних рівнянь 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 у порівнянні з іншими методами - методом квадратур та методом вироджених ядер.

У розділі 8 обґрунтовано вибір середовища моделювання, наведено опис розробленого блоку програм для перетворення динамічних моделей та засобів формування й 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. Наведено структуру системи інструментальних засобів для виконання еквівалентного та апроксимаційного перетворення моделей динамічних об'єктів. Розроблено комплекс програм формування і реалізації моделей об'єктів із розподіленими параметрами. Наведені результати обчислювальних експериментів, у яких порівнювався затрачений на розв'язання задачі час методом опорних перерізів у порівнянні з традиційним широковживаним методом скінченних різниць та функцією `ode` ядра пакету моделювання Matlab. 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. Наведено структуру комплексу програм реалізації динамічних макромоделей.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

У додатку А вирішується задача побудови спрощених математичних моделей при дослідженні силової установки з газовим приводом і системою керування. Наведені результати дослідження керованості силової установки з газовим приводом та розв'язання практичної задачі аналізу, що має оціночний характер при використанні спрощених математичних моделей основних підсистем. Отримані результати дозволяють оцінити гранично досяжні характеристики замкнутої системи керування обраного типу, оцінити важливість прийнятих припущень відносно істотних факторів, що визначають характер перехідних процесів, намітити шляхи вдосконалення системи керування даного об'єкта. Отримані результати визначають напрямок робіт з поліпшення керованості даної силової установки як розширення динамічного діапазону можливих значень керуючих змінних.

У Додатку Б розглядається питання побудови і комп'ютерної реалізації

математичної моделі бурильної колони бурової установки. Результати моделювання свідчать, що отримана структурна модель може використовуватись як на стадії проектування обладнання бурової установки, так і на стадії компонування бурильної колони. Крім того, модель може використовуватись в системі керування при проходці свердловини для підтримки оптимальних режимів буріння та для оптимізації спуско-підйомних робіт.

Додаток В присвячений вирішенню прикладних задач моделювання електромагнітних процесів та енергетично ефективних режимів роботи надпровідникових електротехнічних систем енергозабезпечення, моделювання електромагнітних процесів у надпровідникових перетворювальних системах, моделювання теплових процесів в перемикаючих елементах надпровідникових енергетичних систем. Зокрема, обчислювальні експерименти з моделями НП ЕТС показали, що для підвищення надійності та ефективності їх роботи необхідне виконання наступних умов: точного проведення комутації ЕРС, підтримки нульової напруги на первинній обмотці НПТ на інтервалах відновлення кріотронів. Використання оптимальних параметрів управління, розрахованих на основі запропонованої методики, дозволило знизити втрати енергії в "надпровідниковій" зоні на 40-50%, а також довести оптимальність алгоритму з постійною амплітудою зміни струму. На основі моделювання трифазної НП ЕТС розроблено алгоритм управління, що задовольняє умові оптимальності та дозволяє вводити струм на інтервалах комутації та охолодження кріотронів. Це дозволило значно скоротити час живлення НПС і зменшити шпаруватість живлячої напруги. На основі запропонованих методів моделювання електромагнітних процесів в надпровідникових перетворювальних системах, розроблено комп'ютерно-інформаційну систему, яка за рахунок нового підходу до моделювання, та використання новітніх комп'ютерних технологій, по швидкодії, зручності користування та вірогідності отриманих результатів перевершує існуючі аналоги. Розроблена комп'ютерна система надає можливість інженерам-електротехнікам

моделювати та досліджувати електромагнітні процеси в надпровідникових перетворювальних системах. Отримано оригінальні криві температурних полів по перерізу надпровідникових ключів в моменти зміни режимів протягом циклу роботи магнітного комплексу, а також криві зміни температури надпровідних ключів за час повного циклу. Розроблена система надає можливість інженерам-електротехнікам та керівництву промислового об'єкта моделювати та досліджувати теплові процеси в перемикаючих елементах надпровідникових енергетичних систем

У Додатку Г представлені результати точнісної параметричної редукції моделі динаміки літака. На основі оцінки області невизначеності вихідних координат внаслідок збурень параметрів розглянута методика точнісної редукції моделі, що забезпечує необхідну точність прогнозу руху системи по її моделі. Запропонований спосіб формування множини незначних параметрів забезпечує широкі можливості еквівалентування спрощених моделей і оптимальне спрощення моделей необхідної точності. Розроблено комплекс програм, який реалізує запропоновану методику точнісної редукції математичних моделей динамічних систем. Комплект дозволяє на основі оцінок чутливості координат до збурень параметрів обґрунтувати точнісні вимоги до елементів і визначити критичні режими досліджуваної системи. Проведена точнісна редукція еталонної моделі динаміки польоту літака. Визначено списки незначущих і істотних (необнуляємих) параметрів, що відповідають кільком варіантам допусків на вихідні координати літака, що моделюється. Отримано інформацію про чутливість координат до збурень параметрів в заданому критичному режимі польоту імітатора.

У Додатку Д представлені результати практичної задачі з розробки спрощеної математичної моделі газотурбінного двигуна за каналом подачі палива. Показано, що використання запропонованого алгоритму структурно-функціонального перетворення моделей дає змогу отримувати ефективні макромоделі лінійних динамічних системи стосовно складних simulink-моделей, які задані в структурному вигляді.

У Додатку Е містяться акти впровадження.

Автореферат дисертації ідентичний її основним положенням.

3. Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій

В дисертаційній роботі отримано ряд наукових результатів, які у сукупності є значущими для вирішення сформульованої науково-технічної проблеми. На основі аналізу результатів дисертаційного дослідження А.А. Верлани доцільно відзначити наступні:

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 й низку 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;

- підхід до вибору або створення 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;
- 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.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення роботи, висновки та рекомендації достатньою мірою обґрунтовані, оскільки базуються на аналізі сучасних та загально визнаних літературних джерел в області моделювання динамічних об'єктів та систем.

Обґрунтованість отриманих теоретичних результатів дисертації також базується на коректному застосуванні обчислювальних методів, елементів теорії інтегральних рівнянь, методів еквівалентних і апроксимуючих перетворень рівнянь динаміки, методів апроксимації функцій, елементів теорії матриць та методів чисельного аналізу.

При створенні інструментальних програмних засобів використовувався об'єктно-орієнтований підхід до проектування програмної системи, застосовано численні комп'ютерні експерименти для підтвердження висунутих наукових положень.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися в достатній мірі на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

5. Практична значимість результатів роботи

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 реалізовано в моделюючому середовищі Матлаб. Він 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); «Точностна 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.

6. Повнота викладу отриманих результатів у наукових виданнях

За результатами досліджень опубліковано 94 наукових праці, 1 монографія, 65 статей у наукових фахових виданнях (з них 10 статей у

виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних (Google Scholar, Norwegian NSD, Ulrich's Web, BASE, Citefactor, Cosmos Impact Factor, GIF, InfoBase Index, International Citation Index of Journal Impact Factor & Indexing, OpenAIRE, PKP, ResearchBib, SIS, WorldCat), 21 теза доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 7 статей в іншому виданні (4 публікації проіндексовані в IEEE, 2 публікації проіндексовані в Scopus, одноосібних публікацій 17, що вказує на достатньо високий рівень апробації результатів дисертаційної роботи.

7. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Запропоновані та отримані автором результати доцільно використовувати для підвищення ефективності функціонування сучасних комп'ютерно-інтегрованих силових енергетичних систем.

Нові та удосконалені методи та засоби математичного і комп'ютерного моделювання на основі методу еквівалентного перетворення диференціальних динамічних моделей до інтегральних (методу розділення з аналітичним розв'язком), методу апроксимаційного перетворення за інтерполяційним принципом моделей об'єктів з розподіленими параметрами, ідентифікаційного (модельного) методу діагностування неперервних систем, модельного підходу до організації систем керування технічними об'єктами із застосуванням еталонної динамічної моделі, інтегрального підходу до математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем на основі застосування одновимірних непараметричних інтегральних динамічних моделей у вигляді операторів і рівнянь типу Вольєрра, методу адаптаційного визначення алгоритмів чисельної реалізації диференціальних динамічних моделей, швидкодіючих квадратурних алгоритмів чисельної реалізації інтегральних динамічних моделей у вигляді рівнянь Вольєрра II роду на основі застосування резольвенти, що приводяться в роботі, можуть бути використані для ефективного проектування, дослідження та вдосконалення широкого класу комп'ютерно-інтегрованих систем, зокрема силових

енергетичних установок.

8. Оформлення дисертації та автореферату

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Автореферат містить основні положення, висновки і рекомендації, приведені в дисертації, а також всю іншу необхідну для оцінки роботи інформацію.

Дисертація та автореферат викладені логічно, послідовно та коректно. Оформлення автореферату повністю відповідає діючим вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника».

9. Зауваження по дисертації та автореферату

1. В роботі не дано формального визначення комп'ютерно-інтегрованої динамічної системи. Було б доцільно також пояснити можливі структурно-функціональні аналогії з поняттями вбудованих комп'ютерних систем та кібер-фізичних систем індустрії -4.0.
2. Метою дисертаційної роботи є створення методів і засобів математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих технічних систем, а предметом досліджень автор називає методи й засоби математичного та чисельного моделювання. Серед методів дослідження фігурують методи організації засобів комп'ютерного моделювання. Для розробок і досліджень систем даного класу є актуальними методи напівнатурного моделювання, що можуть бути реалізованими в відповідних підсистемах САПР силових енергетичних установок та інших технічних і технологічних систем. Цьому аспекту проблеми автор не приділив уваги.
3. У розділі 2 розглянуто різні форми динамічних моделей, але не висвітлено вибір форми динамічної моделі і конкретного її виду.
4. У розділі 2 не досить чітко формулюється поняття динамічної макромоделі.
5. У розділі 3 запропонований спосіб узгодження моделі з вихідними даними розв'язуваної задачі містить поняття складності моделі - що мається на увазі?
6. У третьому розділі, підрозділ 3.3, при розгляді питань алгоритмічної реалізації методів математичної редукції (с. 121) використовується термін режим, зміст якого не пояснюється.

7. У ряді розділів дисертації (наприклад, в 3 розділі, с. 127) використовується застарілий термін «машинний» («машинне рішення» або «машинна методика»), який вже не використовується в публікаціях, а використовується більш зрозумілий термін «комп'ютерний».
8. Із тексту розділу 5 складно зрозуміти, для яких цілей призначений метод побудови системи управління з еталонною моделлю в контурі управління - для застосування в процесі функціонування (в режимі реального часу) або для інших цілей.
9. Підрозділ 7.2 розділу 7 дисертації має назву «Вибір оптимального найкращого алгоритму». Ця назва викликає подив, тому що слова «оптимальний» і «найкращий» майже повторюють одне одного. Треба залишити щось одне. В тексті підрозділу 7.2 використовуються обидва терміни.
10. Для подолання обчислювальної складності та прискорення моделювання автор визначає як пріоритетні методи спрощення моделей об'єктів з розподіленими параметрами і не звертає уваги на методи розпаралелювання обчислювальних процесів.
11. Автору не вдалося уникнути деяких стилістичних та граматичних «огріхів» на кшталт «виконуючи аналітичний розв'язок рівняння, отримуємо розв'язок...», «...достатня кількість чисельних методів» (розділ 2).

10. Висновок про відповідність дисертації паспорту спеціальності і встановленим вимогам

Зазначені зауваження не знижують цінності роботи та не впливають на її загальну позитивну оцінку. Дисертація Верлани А.А. є закінченою науково-дослідницькою роботою, в якій містяться нові теоретичні положення і результати в області створення сучасних комп'ютерно-інтегрованих силових енергетичних установок, які застосовуються як автономні енергогенеруючі та рухомабезпечуючі системи різного призначення, в тому числі у виробництві та на транспорті. У роботі подано нові науково обґрунтовані рішення актуальної науково-технічної проблеми 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.

Реалізація виконаних у дослідженні розробок дала змогу підвищити ефективність методів і засобів математичного моделювання при розв'язуванні

наступних задач: 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. Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи. Дисертаційну роботу оформлено у відповідності до вимог ДСТУ.

В цілому вважаю, що дисертаційна робота «Адаптаційні методи та засоби математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем (стосовно до силових енергетичних установок)» є завершеним науковим дослідженням, яке відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів...», затвердженого Постановою КМУ №567 від 24.07.2013 зі змінами, внесеними згідно з постановами КМУ №656 від 19.08.2015, №1159 від 30.12.2015 та №567 від 27.07.2016, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, Верлань Андрій Анатолійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - «Математичне моделювання та обчислювальні методи».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

завідувач кафедри комп'ютерної інженерії
Державного вищого навчального закладу
"Донецький національний технічний університет"
Міністерства освіти і науки України,
доктор технічних наук, професор

Підпис *В.А. Святний*
засвідчую
Вчений секретар *Домінік*
"25" 11 2019 р.



В.А. Святний

В.А. Святний

Г.С. Костюкова