

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Верляня А.А. «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.

**Актуальність наукового дослідження.** Розвиток і широкомасштабне розповсюдження комп'ютерно-інтегрованих систем породжують необхідність наукової підтримки цього процесу як в техніці, так і в медицині, побуті та інших напрямках діяльності людини. Безумовно, що серед цих напрямків дуже важливим є енергетичний, зокрема силові енергетичні установки (СЕУ).

Суттєвою особливістю комп'ютерно-інтегрованих систем є обмеженість ресурсів комп'ютерної частини, тим паче при її вбудованому виконанні, яке, по суті, стає обов'язковим. Обмеження ресурсів при науковій постановці задач побудови відповідних засобів комп'ютерного забезпечення процесів функціонування системи в цілому вимагає застосування методів адаптації та оптимізації, що дозволяє отримати необхідні якісні та економічні показники, а також показники безпеки.

Тому слід визнати актуальність теми дисертаційної роботи як в практичному, так і в теоретичному плані.

Вирішення вказаної проблеми пропонується виконати 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.

Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України: «Структурно-алгоритмические 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

УПМЕ. вх. 359

29.11.2019

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

**Наукова новизна положень дисертації.** Перш за все слід відмітити наступні обрані підходи для виконання завдань дисертаційної роботи: 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.

В рамках запропонованих підходів вперше отримані наступні нові результати:

розроблено 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;

розроблено 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;

запропоновано 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.

При цьому 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.

**Ступінь обґрунтованості сформульованих наукових положень, висновків і рекомендацій.** Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації цілком обґрунтовані, про що свідчить ефективно і коректно застосування математичних методів, зокрема методів апроксимації функцій, елементів теорії матриць та методів чисельного аналізу, елементів теорії інтегральних рівнянь; ретельний порівняльний аналіз сучасних пакетів програм математичних обчислень при створенні моделюючого програмного комплексу з метою вибору необхідної програмної платформи; порівняльний аналіз запропонованого підходу з відомими; численні експериментальні дослідження, що підтверджують працездатність запропонованих методів та ефективність отриманих результатів; практична реалізація результатів шляхом розв'язання низки прикладних задач.

**Практичне значення результатів роботи.** 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.

**Повнота викладу отриманих результатів в опублікованих працях.** Отримані результати повністю викладені у наукових публікаціях автора. Опубліковано 93 праці автора, з них 1 монографія, 65 статей у наукових фахових виданнях (з них 10 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 21 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 6 статей в інших виданнях, одноосібних публікацій 16.

**Рекомендації щодо використання отриманих результатів.** Результати дисертаційної роботи можуть бути рекомендовані для використання при розв'язанні практичних задач математичного моделювання динамічних процесів функціонування СЕУ. При цьому мається на увазі, що можливі різні постановки задач: моделювання різних режимів при експлуатації установки, задачі проектування, задачі синтезу систем керування або діагностування, побудова комп'ютерної частини установки та ін. Крім того, результати роботи можуть бути ефективно використані для учбових цілей у вузах при викладанні курсів, пов'язаних з математичним моделюванням, системами керування та ін.

**Оформлення дисертації та автореферату** повністю відповідає існуючим вимогам та рекомендаціям відповідних положень.

#### **Зауваження по дисертації та автореферату**

1. Моделювання в реальному часі процесів комп'ютерно-інтегрованих систем спричиняє заміну складних математичних моделей більш простими з втратою точності математичного моделювання. Як альтернативу в майбутньому можна розглянути використання паралельних, гібридних обчислень для зменшення обчислювальної складності моделей.
2. При пошуку компромісу між складністю математичної моделі і точністю вихідних даних слід враховувати також і похибку внаслідок накопичення похибок заокруглення при реалізації моделі чисельним методом.
3. В роботі розглядається низка математичних моделей: інтегральні рівняння, диференціальні рівняння в частинних і звичайних похідних (задачі Коші), алгебраїчні задачі, в тому числі некоректні. Бажано було б надати умови існування і єдиності (де можливо) розв'язків цих задач.
4. Було б доцільним скористатись стандартними програмами з відомих бібліотек для отримання розв'язку математичних задач з наперед заданою точністю розв'язку, зокрема для задач Коші.
5. У розділі 2 розглядається інтерполяційний підхід отримання спрощених моделей ОРП і в висновках до розділу зазначено, що такий підхід є ефективним, при цьому в даному розділі це твердження нічим не підтверджується, а має підтвердження тільки в 4 розділі, де реалізується цей підхід.
6. У розділі 6 (підрозділ 6.2) вказується, що для реалізації модельного методу діагностики динамічних об'єктів необхідна наявність певної таблиці несправностей

(таблиці альтернативних станів). Разом з тим, у підрозділі 6.3. цього ж розділу, присвяченому процедурі пошуку несправностей, про таблиці несправностей не згадується.

7. В дисертації (розділи 3, 4) використовується термін «структурна корекція», але суть цього терміну не пояснюється.

Разом з тим, наведені зауваження не є принциповими і не впливають на позитивний загальний висновок по дисертації.

**Висновок.** Дисертаційна робота Верланя А.А. є завершеним дослідженням з актуальної тематики, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати. В роботі вирішена важлива науково-технічна проблема в галузі математичного моделювання процесів функціонування комп'ютерно-інтегрованих систем, що орієнтована на суттєве практичне застосування. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій та паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а її автор Верлань А.А. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

### Офіційний опонент

заступник директора Інституту кібернетики  
імені В.М. Глушкова НАН України член-кор. НАН України,  
доктор фіз.-мат. наук, професор



О.М. Хіміч