

## ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача відділу теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки Національної академії наук України, доктора технічних наук, професора *Мисловича Михайла Володимировича*, на дисертаційну роботу *Ситника Олександра Олексійовича* на тему “*Методи математичного та комп’ютерного моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь*”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Актуальність теми.** Вирішення загальної проблеми щодо підвищення ефективності експлуатації різного виду технічних об’єктів потребує створення і практичного застосування різноманітних систем, призначених для розв’язку задач моніторингу, управління та діагностики таких об’єктів. У цьому випадку основною сполучною ланкою між досліджуваними об’єктами і відповідними системами постають первинні сенсори, основне призначення яких вимірювання і перетворення різних фізичних процесів, що виникають при роботі досліджуваних об’єктів.

У зв’язку зі стрімким розвитком сучасних інформаційних технологій та все більш зростаючими вимогами до параметрів і характеристик первинних перетворювачів, постає ціле коло проблем, пов’язаних з їх практичним застосуванням. Крім того, підвищення швидкості передавання інформаційних потоків вимагає створення нових, швидкодійних та високоточних засобів, які б могли надійно функціонувати у таких умовах.

У значній мірі розв’язати ці проблеми вдається шляхом використання методів комп’ютерного моделювання. Саме для цього випадку і постає проблема побудови математичних моделей, які б із заданими точністю і вірогідністю могли б описати динаміку перетворення досліджуваних процесів, що надходять на вхід вимірювального перетворювача. Як відомо, у цьому випадку широко застосовується математичний апарат теорії диференціальних рівнянь. Разом з тим, використання цього математичного апарату має досить суттєві обмеження, які, в основному, зумовлені різними класами завад, що виникають при вирішенні задач моделювання об’єктів із зосередженими та розподіленими параметрами.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи О.О.Ситника, яка присвячена розробці теорії та методів підвищення ефективності методів і засобів математичного та комп’ютерного моделювання динамічних процесів даного класу технічних об’єктів при вирішенні задач аналізу, синтезу,

проектування, побудови, конструювання та функціонування в системах вимірювання, контролю, діагностики та управління, не викликає сумніву.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.** Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 234 найменувань та десяти додатків на 75 сторінках. Зміст роботи викладено на 431 сторінках, з яких 297 містять основний текст, 31 рисунків та 52 таблиці.

*У вступі* проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження і наукову новизну. Показаний зв'язок з науковими програмами і планами НДР, а також особистий внесок дисертанта.

*Перший розділ* присвячено огляду літературних джерел, а також проаналізовано основні задачі, методи і засоби, за допомогою яких досліджуються вимірювальні перетворювачі. Дисертантом переконливо показано, що у зв'язку зі створенням сучасних технічних засобів та інформаційних технологій виникла нагальна потреба у застосуванні нових підходів для математичного опису динаміки вимірювальних перетворювачів. В якості таких підходів автором запропоновано та досліджено інтегральний метод математичного моделювання процесів у вимірювальних перетворювачах, який полягає в застосуванні математичних моделей у вигляді інтегральних операторів Вольтерри та інтегральних рівнянь Вольтерри II роду, що дає змогу за узагальненою методикою формувати моделювальні залежності для перетворювачів з розподіленими і зосередженими параметрами.

*У другому розділі* розглянуто основи наближеного аналізу вимірювальних перетворювачів за динамічними моделями. Дисертантом застосовано одну із модифікацій методу послідовних наближень для аналізу моделей вимірювальних перетворювачів, що описуються звичайними диференціальними рівняннями  $n$ -го порядку зі змінними коефіцієнтами. Для заміни початкових умов вихідної задачі та переходу до однорідних граничних умов і до відповідної граничної задачі, автором запропоновано спосіб заміни змінних, що надає можливість перейти від диференціального рівняння до інтегрального рівняння Фредгольма II роду з сепарабельним ядром. Для наочності запропонованого способу, дисертантом наведено розв'язок задачі побудови диференціальної динамічної моделі за заданою імпульсною перехідною функцією, представленою в сепарабельному вигляді.

*У третьому розділі* дисертантом подано алгоритмічні основи аналізу вимірювальних перетворювачів за інтегральними моделями. Для цього випадку використано інтегральні динамічні моделі, що реалізуються за допомогою рівняння Вольтерри II роду та інтегрального оператора Вольтерри. Такий підхід

призводить до необхідності розв'язання нової і самостійної щодо до диференціальних рівнянь задачі вибору і розробки чисельних методів і алгоритмів реалізації інтегральних динамічних моделей. У підсумку, використання властивостей сепарабельних ядер надає можливість досягти найкращої швидкодії квадратурних алгоритмів моделювання за рахунок незмінних обсягів обчислень на кроці. Автором переконливо доведено, що інтегральний метод розв'язання диференціальних рівнянь (у разі зведення до еквівалентного інтегрального рівняння з виродженим ядром) призводить до зниження кількості виконуваних операцій і поліпшення точнісних властивостей розв'язання. Дисертантом модифіковано метод Ньютона-Канторовича, застосування якого надало можливість значно прискорити збіжність порівняно з методом простої ітерації.

**Четвертий розділ** присвячений розв'язку питань ідентифікації вимірювальних перетворювачів на основі застосування інтегральних динамічних моделей. Дисертантом встановлено, що для багатьох вимірювальних перетворювачів застосування інтегральних динамічних моделей, зокрема моделей, еквівалентних диференціальним моделям, надає можливість отримати основу для побудови високостійких чисельних алгоритмів розрахунку параметрів динамічних моделей вимірювальних перетворювачів у завданні ідентифікації. На основі проведених досліджень, автором запропоновано спосіб ідентифікації вимірювальних перетворювачів на основі розв'язання алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора, що має потенційно високу швидкодію і завадостійкість.

Описання інтегрального методу та алгоритмів відновлення сигналів на вході вимірювального перетворювача розглядаються у **п'ятому розділі**. Дисертантом розроблено швидкодійні квадратурні алгоритми здатні забезпечити чисельну реалізацію інтегральних моделей та бути основою для побудови високопродуктивних спеціалізованих мікропроцесорних систем у режимі реального часу. Оригінальним практичним результатом слід вважати запропонований автором спосіб внутрішньої регуляризації (спосіб модельних прикладів) під час розв'язання сингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри I роду при разі побудові математичної моделі для розв'язку задачі відновлення значень температури на робочому кінці теплового датчика стрижневого типу.

У **шостому розділі** викладено результати, що стосуються методів організації моделювальної системи та розв'язання прикладних задач. До оригінального результату слід віднести розроблений вперше комплекс прикладних програм для моделювання широкого класу вимірювальних перетворювачів з реалізацією лінійних і нелінійних інтегральних моделей і їх

систем у середовищі MATLAB; програмні засоби організовані відповідно до прийнятої в системі MATLAB концепції пакетів прикладних програм. В якості прикладу застосування розроблених алгоритмів та програмних засобів, розглянуто низку прикладних задач, розв'язок яких повністю довело їх ефективність.

У *висновках* сформульовано основні наукові результати.

У *10 додатках до дисертаційної роботи* наведено інформацію про впровадження результатів роботи, а також описання розроблених алгоритмів та програмних засобів. У додатках також наведено список публікацій здобувача за темою дисертації.

### **Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.**

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

1) вперше запропоновано: прямий (неоптимізаційний) метод ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів на основі експериментальних даних; аналітичний метод «розщеплення з частковим оберненням» для отримання еквівалентних інтегральних рівнянь Вольтерри II роду для заданих диференціальних рівнянь вимірювальних перетворювачів з зосередженими параметрами; метод формування інтегральних динамічних моделей нестационарних вимірювальних перетворювачів із зосередженими та розподіленими параметрами на основі заданих імпульсних перехідних характеристик (функцій); метод «внутрішньої регуляризації» для розв'язання слабосингулярного інтегрального рівняння Вольтерри I роду в задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача;

2) розвинуто та вдосконалено: методи прямого чисельного розв'язання лінійних і нелінійних інтегральних рівнянь вимірювальних перетворювачів на основі сепарабельного представлення ядер, які забезпечують можливість суттєвого прискорення обчислювальних процесів; методи ітераційного чисельного розв'язання нелінійних інтегральних рівнянь, які, на відміну від існуючих, базуються на застосуванні модифікації методу Ньютона–Канторовича, що дозволяє підвищити збіжність ітераційного процесу;

3) набули подальшого розвитку: методи математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування апарату інтегральних рівнянь та операторів; структурні методи отримання явних (у вигляді інтегрального оператора типу Вольтерри) і неявних (у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду) інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів; принцип альтернативності математичних моделей у задачах динаміки вимірювальних перетворювачів, для

якого доведено, що для конкретного випадку вимірювань існує деяка вдало підібрана модель, яка за певних вимог до точності вимірювань дозволяє врахувати особливості конкретної розв'язуваної задачі стосовно певного критерію якості процесу моделювання; метод формування одновимірних інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами на основі динамічних характеристик.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи** полягає в наступному:

- розроблені при виконанні дисертаційної роботи засоби алгоритмічного і програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу забезпечують ефективну комп'ютерну реалізацію інтегральних динамічних моделей з можливістю доцільного вибору алгоритмів відповідно властивостей конкретного завдання, можливість виконання швидких стійких рекурентних і високоточних ітераційних процедур чисельного розв'язання використовуваних видів інтегральних рівнянь;

- створений пакет прикладних програм реалізований у моделювальному середовищі MATLAB і призначений для дослідження динаміки вимірювальних перетворювачів як у лабораторних дослідженнях, так і в умовах застосування в реальних системах вимірювання, контролю та управління;

- практичну корисність розроблених методів доведено розв'язком низки прикладних задач, а саме, побудови моделей градієнтних приймачів теплових потоків; дослідження динаміки тактильного матричного сенсора; формування непараметричних інтегральних динамічних моделей датчиків у системах вимірювання випробувального устаткування; побудова інтегральної динамічної моделі датчика сигналів акустичної емісії.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень отриманих дисертантом, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якісній та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

**Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 75 наукових публікаціях, серед яких 1 монографія, 8 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз, 37 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, а також 25 публікаціях у збірниках матеріалів і праць конференцій, 1 статті у науковому періодичному виданні, що проіндексований у міжнародній наукометричній базі Scopus. Дисертантом отримано 2 патенти України на винаходи.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на більш ніж 20 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

**Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.** Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

#### **Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату**

1. В представленій роботі, при моделюванні вимірювальних перетворювачів, достатньо мало уваги приділяється оцінці їх динамічних похибок. Було б доцільним, більш докладно висвітлити це питання.
2. В дисертації, на мій погляд, в неповній мірі досліджується питання подальшого підвищення ефективності інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів. Крім того недостатньо приділяється уваги доказам того, що запропоновані методи дійсно більш ефективні за існуючі.
3. В розділі 1 інформація про необхідність дослідження та використання  $\delta$ -функції подана занадто детально, що в певній мірі інформаційно перевантажує розділ.
4. Було б доцільним дати розширене, та більш детальне визначення поняття «нестационарні вимірювальні перетворювачі».
5. В роботі не наголошено про те, що на сьогоднішній день практично всі вимірювальні перетворювачі мають на своєму виході аналогово-цифрові перетворювачі для введення інформації в комп'ютер для її обробки, тому майже всі вихідні сигнали сучасних вимірювальних перетворювачів є дискретними і цей факт необхідно враховувати.
6. Перший параграф шостої глави присвячений фактично синтезу оператора коригуючого пристрою, включенням якого між вимірюваним сигналом і виходом ВП домагаються рівності одиниці передавальної функції скоригованого ВП. Але в існуючій на сьогоднішній день літературі

розвинений інший підхід до вирішення завдання відновлення «істинного» значення вхідного сигналу вимірювального перетворювача. Чому не було зроблено спроби порівняти ці підходи щодо їх ефективності.

7. Деякі аналітичні вирази досить сильно переобтяжені перетвореннями. Достатньо було б навести первинний та кінцевий результат (наприклад, стор. 219 – 220).

### **Загальні висновки**

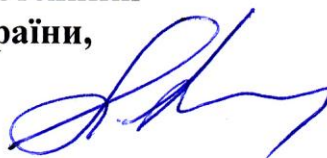
Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота О.О.Ситника “*Методи математичного та комп’ютерного моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь*”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову науково-прикладну проблему – підвищення ефективності методів і засобів математичного та комп’ютерного моделювання динамічних процесів даного класу технічних об’єктів при вирішенні задач аналізу, синтезу, проектування, побудови, конструювання та функціонування в системах вимірювання, контролю, діагностики та управління. Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а також вимогам пунктів 9, 10, 12 щодо “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., а її автор, **Олександр Олексійович Ситник**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

**Офіційний опонент,  
завідувач відділу теоретичної електротехніки  
Інституту електродинаміки НАН України,  
доктор технічних наук, професор**

**Мислович М. В.**

03.12.2018р.



Мисловича М. В.  
Ситник  
Мислович М. В.

