

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИТНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 519.87:004.94:621.314](043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ**

01.05.02 — Математичне моделювання та обчислювальні методи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.О. Ситник

Науковий консультант Верлань Анатолій Федорович

член-кор. НАПН України, заслужений діяч науки і
техніки України, доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2018

Анотація

Ситник О.О. Методи математичного та комп'ютерного моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси. – Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2018.

Сучасні вимірювальні перетворювачі (ВП) і системи складають значну частину засобів нової техніки, для яких характерний стрімкий розвиток, що вимагає розв'язання нових задач на функціональному, схемотехнічному та інформаційному рівнях. Виникає необхідність розробки швидкодіючих і високоточних приладів, які повинні адаптуватися до мінливих у часі умов функціонування. Аналізуючи динамічні властивості вимірювальних перетворювачів, необхідно враховувати їх фізичну і структурну неоднорідність, що свідчить про принципову складність математичного опису відповідних фізичних процесів. Таким чином, сучасні вимірювальні перетворювачі відносять до класу складних динамічних об'єктів, для ефективного дослідження яких, доцільним є використання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Наявні наукові досягнення в галузі математичного моделювання динамічних об'єктів (систем) базуються в основному на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. Проте є певні обмеження під час розв'язання деяких класів задач моделювання. Зокрема це стосується забезпечення стійкості обчислювального процесу при наявності значних рівнів завад у вигляді шумів з високочастотними спектрами у вхідних даних, врахування досить поширеного ефекту Гіббса при моделюванні об'єктів як з зосередженими, так і з розподіленими параметрами, застосування ітераційних алгоритмів аналізу, формування математичних описів за

експериментальними даними тощо. Досвід показує, що для подолання зазначених труднощів доцільно як доповнення до наявних створювати нові способи побудови і чисельної реалізації математичних моделей. Ефективним переходом у цьому напрямку є застосування певних видів інтегральних рівнянь і операторів, які мають ряд таких позитивних властивостей, як висока універсальність (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об'єктів, властивості яких визначає одна функція – ядро інтегрального оператора), потенційно висока адекватність процесів моделювання, властивість згладжування під час виконання обчислень і обробки сигналів з високочастотними шумами, висока збіжність ітераційних процесів розв'язання обчислювальних задач, можливість ефективної побудови моделі за експериментальними даними і т.п.

У дисертаційній роботі визначена та розв'язана **актуальна науково-технічна проблема** 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.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше запропоновані: 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); прямиий (неоптимізаційний) метод ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів на основі експериментальних даних; метод «внутрішньої регуляризації» для розв'язання слабосингулярного інтегрального рівняння Вольтерри I роду в задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача;

вдосконалені: 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; структурно-алгоритмічний метод організації засобів комп'ютерного моделювання стосовно задач дослідження основних типів вимірювальних перетворювачів, який забезпечує візуальну побудову програм відповідно до принципу декомпозиції об'єкта, що моделюється, або його моделі;

набули подальшого розвитку: підхід до математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування апарату інтегральних рівнянь та операторів; принцип альтернативності (множинності різних форм) 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; структурні методи отримання явних (у вигляді інтегрального оператора типу Вольтерри) і неявних (у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду) інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів; метод формування одновимірних інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами на основі динамічних характеристик.

У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасного стану проблеми вдосконалення методів і засобів вимірювання, створення та дослідження вимірювальних перетворювачів. Показано, що з ускладненням техніки та впровадженням досягнень науки в усі сфери людської діяльності у зв'язку з вузькою спеціалізацією галузей науки та техніки необхідно

розрізняти математичні методи, що мають додатковий характер, та математичні методи, що забезпечують принципово нові рішення. Характерними і поширеними математичними описами завдань динаміки вимірювальних перетворювачів є звичайні диференціальні рівняння. Як удосконалення запропоновано, обґрунтовано 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 із забезпеченням високого рівня адекватності при використанні первинних аналітичних або експериментальних даних, а також створити передумови для їх ефективної числової реалізації з використанням згладжувальних і завадозахисних властивостей інтегральних динамічних моделей.

У другому розділі розглянуто способи наближеного аналізу вимірювальних перетворювачів за динамічними моделями. Прикладний інженерний аналіз процесів вимірювання за допомогою математичного опису повинен передбачати наявність аналітичних наближених залежностей, які дають можливість наочно як якісно, так і кількісно ілюструвати вплив фізичних параметрів. Наведено досить зручну модифікацію методу послідовних наближень для аналізу моделей вимірювальних перетворювачів, що описуються звичайними диференціальними рівняннями n -го порядку зі змінними коефіцієнтами (нестационарні вимірювальні перетворювачі з зосередженими параметрами). Для цих вимірювальних перетворювачів запропонований спосіб заміни змінних дає змогу замінити початкові умови вихідної задачі і перейти до однорідних граничних умов та до відповідної граничної задачі, що, у свою чергу, призводить диференціальне рівняння до інтегрального рівняння Фредгольма II роду з сепарабельним ядром. Розглянутий підхід з використанням послідовних наближень і отриманням

еквівалентних інтегральних рівнянь також можна застосувати для дослідження нестационарних вимірювальних перетворювачів, представлених у досить загальному випадку рівняннями в частинних похідних другого порядку. Розглянуто розв'язання задачі побудови диференціальної динамічної моделі за заданою імпульсною перехідною функцією, представленою в сепарабельному вигляді.

Третій розділ присвячений алгоритмічним основам аналізу вимірювальних перетворювачів за інтегральними моделями. Основними видами інтегральних динамічних моделей при цьому є рівняння Вольтерри II роду та інтегральний оператор 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. Розв'язуючи рівняння Вольтерри, потрібно також враховувати можливість обчислень з великим числом кроків. Використання властивостей сепарабельних ядер дає змогу домогтися найкращої швидкодії квадратурних алгоритмів моделювання за рахунок незмінних обсягів обчислень на кроці. Показано, 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. Запропонована модифікація методу Ньютона-Канторовича є однією з найбільш ефективних для розв'язання нелінійних рівнянь і дає змогу значно прискорити збіжність порівняно з методом простої ітерації або навіть порівняно з більш складними, у тому числі спеціалізованими методами.

Четвертий розділ спрямований на вирішення питання ідентифікації вимірювальних перетворювачів на основі застосування інтегральних динамічних моделей. Встановлено, що для досить широкого класу вимірювальних перетворювачів застосування інтегральних динамічних моделей, зокрема моделей, еквівалентних диференціальним моделям, дає

можливість отримати основу для побудови високостійких чисельних алгоритмів розрахунку параметрів динамічних моделей вимірювальних перетворювачів у завданні ідентифікації. Запропоновано спосіб ідентифікації вимірювальних перетворювачів на основі розв'язання алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора, що має потенційно високу швидкодію і завадостійкість. Застосування методів степеневих рядів в задачі ідентифікації вимірювальних перетворювачів є продуктивним підходом, оскільки дає змогу уніфікувати подання елементів математичної моделі і отримати на цій основі ефективні розрахункові вирази.

П'ятий розділ містить опис інтегрального методу та алгоритмів відновлення сигналів на вході вимірювального перетворювача. Ефективними методами опису задачі відновлення сигналів на вході вимірювального перетворювача є інтегральні рівняння Вольтерри. Запропоновані швидкодійні квадратурні алгоритми здатні забезпечити чисельну реалізацію інтегральних моделей та бути основою для побудови високопродуктивних спеціалізованих мікропроцесорних систем у режимі реального часу. Підвищення вимог до точності результатів забезпечує застосування методу колокацій, що дає можливість отримувати розв'язок на ділянках з вибором їх довжини і застосуванням на кожному із них апроксимувального виразу з невеликим числом координатних функцій. Запропоновано 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.

Шостий розділ присвячений організації моделювальної системи та розв'язанню прикладних задач. На основі запропонованих алгоритмів вперше розроблений 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. За допомогою запропонованих алгоритмів і розроблених програмних засобів вирішено ряд таких прикладних задач: формування інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів вологості газу, швидкості потоку, кута повороту, прискорення, витрат, тиску, температури, хемотронного вимірювального перетворювача; побудова моделей градієнтних приймачів теплових потоків; отримання за експериментальними даними інтегральних моделей газоаналізаторів, плівкового термоприймача, п'єзоелектричного датчика тиску тощо.

Практичне значення отриманих результатів. Створені 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. Розроблений 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. Результати дисертаційної роботи підтверджені актами використання та впровадження.

Ключові слова: інтегральні динамічні моделі, завадостійкі алгоритми чисельного моделювання, вимірювальні перетворювачі з зосередженими та розподіленими параметрами, інтегральні рівняння Вольтерри I та II роду, побудова моделей за експериментальними даними, слабосингулярні моделі у задачах відновлення сигналу, швидкодіючі алгоритми чисельного розв'язання систем інтегральних рівнянь, ідентифікація стаціонарних і нестаціонарних вимірювальних перетворювачів.

Abstract

Sytnyk O.O. Methods of mathematical and computer modeling of dynamics of measuring transducers based on integral equations. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences on speciality 01.05.02 “Mathematical modeling and computational methods”. – Cherkasy State Technological University, Cherkasy. – Vinnytsia National Technical University. Vinnytsia, 2018.

Modern measuring transducers (MT) and systems make up a significant proportion of the assets of the new technology, for which the rapid development is characteristic, that requires solving new problems on a functional, sheet-oriented and information levels. The need arises to develop high-speed and high-precision devices, which must adapt to time changing conditions of operation. During the analysis of dynamical properties of measuring transducers, it should be taken into account that they have physical and structural heterogeneity that testifies fundamental difficulty of the mathematical description of the relevant physical processes. Thus, modern measuring converters generally belong to the class of complex dynamic objects, an effective way to research which is the use of methods and means of mathematical and computer modeling.

Existing scientific achievements in the field of mathematical modeling of dynamic objects (systems) are based mainly on the use of the apparatus of the differential equations. However, there are certain limitations in the solution of some classes of problems. In particular, it refers to ensuring the sustainability of the computing process in the presence of significant levels of interferences in the form of noises with high-frequency spectra in the input data, considering the fairly common Gibbs effect for modeling objects both with concentrated and with the distributed parameters, the application of iterative algorithms of the analysis, the formation of mathematical descriptions by the experimental data, etc. Experience shows that in order to overcome these difficulties it is relevant to create as additions to existing ones new ways of building and numerical implementation of

mathematical models. Effective transition in this direction is the use of certain kinds of integral equations and operators that have a number of such positive properties as high versatility (the structure of the model is unchanged for different classes of dynamic objects and properties of which are defined by one function, which is the kernel of the integral operator), potentially high adequacy of modeling processes, property of smoothing during computations and signal processing with high-frequency noise, high convergence of iterative decision processes of the computing tasks, the ability to effectively build models by experimental data and etc.

In this work, defined and resolved is **the relevant scientific and technical problem** of raising the efficiency of methods and means of mathematical and computer modeling of dynamical processes of the given class of technical objects in the solution of problems of analysis, the synthesis, design, building, construction and operation of the systems of measurement, control, diagnosis and management.

The scientific novelty of the obtained results.

For the first time offered: analytical method of «splitting with partial converse» for getting the equivalent integral Volterra equations of II kind for specified differential equation of measuring transducers with focused and distributed parameters on the basis of preset pulse transition characteristics (functions); direct (non-optimization) method of identification of integral dynamic models of measuring transducers on the basis of experimental data; method of “internal regularization” for solving of the weakly singular integral Volterra equation of the I kind in the problem of restoring the input signal of measuring converter;

improved: methods of direct numerical solution of linear and nonlinear integral equations of measuring transducers on the basis of separable representation of cores that provide possibility of considerable acceleration of computational processes; methods of iterative numerical solution of nonlinear integral equations, which, unlike existing ones, are based on application of modification of Newton – Kantorowicz method, that allows to increase

convergence of iterative process; structurally-algorithmic method of organization of means of computer modelling concerning problems of investigation of basic types of measuring transducers, which provides visual construction of programs in accordance with the principle of decomposition of object being modelled, or its models.

received further development: an approach to mathematical and computer modeling of dynamic processes in measuring transducers based on application of the apparatus of integral equations and operators; optionality principle (plurality of different forms) of mathematical models in problems of dynamics of measuring transducers, for which it is proved that for a particular case of measurements there is some well-chosen model, which in certain requirements to accuracy measurements allows to consider features of a specific solved problem on a certain criterion of quality of modeling process; the structural methods of obtaining explicit (in the form of an integral operator of Volterra kind) and implicit (in the form of integral Volterra equations of the II kind) integrated dynamic models of measuring transducers; method of formation of onedimensional integral models of measuring c with distributed parameters on the basis of dynamic characteristics.

The first chapter completes an analytical overview of the current state of the problem of improvement of measurements methods, developing and research of measuring transducers. It is shown that to the extent of complication of machinery and the introduction of the achievements of science in all spheres of human activity, to the extent of the narrow specialization of science sections and technology it is necessary to distinguish between the mathematical methods that have an additional character, and mathematical methods that open up ways to fundamentally new solutions. Characteristic and common mathematical descriptions of tasks of dynamics of measuring transducers are the ordinary differential equations. As improvements suggested, grounded and examined is the cumulative method of mathematical modeling of processes in the measuring transducers, which consists in the application of mathematical models in the form of integral Volterra operators and integral Volterra equations of II kind, that allows

by a generalized technique to form modeling dependencies for transducers with distributed and concentrated parameters ensuring high level of adequacy by using primary analytical or experimental data, as well as to create conditions for their efficient numerical realization using the plane and protective properties of integral dynamic models.

The second chapter of the paper considers ways to approximate analysis of measuring transducers according to dynamic models. Applied engineering analysis of the measurement processes using the mathematical description should include the availability of analytical approximate dependencies that allow visually, qualitatively as well as quantitatively, illustrate the influence of physical parameters. Quite convenient modification of the method of successive approximations is demonstrated for the analysis of models of measuring transducers, which are described by the ordinary differential equations of n -th order with variable coefficients (nonstationary measuring transducers with concentrated parameters). For the same measuring transducers there is a proposed way of replacement of variables allows to replace the original conditions of the initial problem and switch to homogeneous boundary conditions and to the corresponding boundary problem, which in turn leads differential equation to Fredholm integral equation of II kind with separable kernel. Considered approach along with using successive approximations and obtaining equivalent integral equations can also be applied to the study of non-stationary measuring transducers, presented in a fairly general occasion by equations in the partial derivatives of the second order. The problem of constructing of a differential dynamic model on the set impulsive transition function is considered that is presented in the separable form.

The third chapter is dedicated to algorithmic basics of analysis of measuring transducers for integrated models. The main types of integral dynamic models are the equation of Volterra of II kind and integral Volterra operator. Such approach leads to the necessity of solving new and independent, with respect to differential equations, problem of selection and development of numerical methods

and algorithms of realization of integral dynamic models. When solving the Volterra equations it should also be taken into account the possibility of computations with large number of steps. Use of the properties of the separable kernels allows achieving the optimal speed work of quadrature algorithms for modeling due to constant volume of calculations in step. It is shown that the integral method of solution of differential equations (in the case of converting to the equivalent integral equation with degenerate kernel) leads to a decrease in the number of performed operations and improvement of accuracy properties of the solution. The proposed modification of the Newton –Kantorovich method is one of the most effective at solving of nonlinear equations and allows to significantly speed up convergence as compared to the method of simple iteration or even compared to the more complex, including specialized methods.

The fourth chapter directs to solving the issue of identification of measuring transducers based on the application of integral dynamic models. It is defined that for a fairly wide class of measuring transducers applying integrated dynamic models, especially models of equivalent to differential models, allows to obtain a basis for constructing of highly-resistant numerical algorithms of calculation of parameters of dynamic models of measuring transducers in the task of identification. Method of identification of measuring transducers based on the solutions of algebraic system is proposed, obtained by approximation of the integral operator that has a potentially high speed work and resistance to interference. Application of power series methods in problem of identification of measuring transducers is a high-performance approach, because it allows to unify the representation of the elements of the mathematical model and get on this basis the effective calculating expressions.

The fifth chapter contains the description of integral method and recovery algorithms of signals at the input of measuring transducer. Effective methods of describing the problem of restoration of signals at the input of the measuring transducer are the integral Volterra equations. The proposed fast acting quadrature algorithms are able to provide a numerical implementation of integrated models

and be the basis when building high-performance specialized microprocessor systems in real time. Increasing requirements for the accuracy of the results provides the application of the collocation method, which gives an opportunity to receive a decision in the sections by choosing their length, applying on each of them approximal expression of a small number of coordinate functions. A method of internal regularization is suggested (method of model examples) for solving singular integral Volterra equations of the I kind in the case of construction of mathematical model for solving the problem of recovery of the values of the temperature at the working end the of thermal sensor of the rod type.

The sixth section is devoted to the organization of the modeling system and to the solving applied problems. On the basis of the proposed algorithms for the first time the complex of applied programs is developed for modeling wide class of measuring transducers with the realization of linear and nonlinear integrated models and their systems in the MATLAB environment; software tools are organized according to the adopted in the system of MATLAB concept of application programs packet. With the help of using the proposed algorithms and developed software a number of the following application problems are resolved: the formation of integrated dynamic models of measuring transducers of gas humidity, airflow rate, the angle of rotation, acceleration, costs, pressure, temperature, chemotronic measuring transducer; construction of models of gradient receivers of heat flows; modeling and dynamic correction of measurement transducers, flow of thermal radiation; getting on the basis of the experimental data integrated models of gas analyzers, film thermal detector, piezoelectric pressure sensor etc.

Practical value of the obtained results. Means of algorithmic and software processes of dynamics modeling of measuring transducers are developed by using structurally-oriented approach, provide an efficient computer implementation of integrated dynamic models, with possibility of expedient choice of algorithms applied according to the properties of a specific task, the ability to perform fast stable recurrent and high-precision iterative procedures with the numerical solution

of used kinds of integral equations. Developed package of application programs realized in the modeling MATLAB environment and intended for study of the dynamics of measuring transducers both in laboratory research and in the conditions of use in real-world systems of measuring, monitoring and management. The results of the dissertation are confirmed by acts of use and implementation.

Keywords: integrated dynamic models, noiseproof numerical simulation algorithms, measuring transducers with concentrated and distributed parameters, the integral Volterra equation of the of I and II kind, modelling by experimental data, weakly singular models in problems of signal, time-optimal algorithms of numerical solving of systems of integral equations, identification of stationary and non-stationary measuring transducers.

Список публікацій здобувача

- [1] A. Sytnik, S. Protasov, and K. Klyuchka, "Development of the method for creating explicit integral dynamic models of measuring transducers", *Східно-Європейський журнал передових технологій*, № 5/4 (89), с.40 – 48, 2017 (**Входить до Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI, Sherpa/Romeo**). *Здобувач запропонував метод формування явних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів як з розподіленими, так і з зосередженими параметрами.*
- [2] В. А. Іванюк, О. О. Ситник, та Ю. Стертен, "Дослідження еквівалентних форм представлення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів методом обчислювальних експериментів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, Серія: Технічні науки*, № 1, с. 27–34, 2018. (**Входить до бази даних Index Copernicus**). *Здобувач запропонував алгоритми чисельної реалізації інтегральних рівнянь для проведення обчислювальних експериментів.*
- [3] A. A. Sytnik, "Algorithms for identifications of stationary transducers", *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, Vol. 3, Issue 7, July, pp. 1922–1925, 2017. (**Входить до баз даних Google Scholar**,

GetCited, BASE, WorldCat, Scirus, ResearchGate, UR, Research Bible, Cornell University Library).

- [4] А. А. Сытник, "Идентификация моделей динамических объектов на основе степенных рядов", *Danish scientific journal*, № 3, p. 77–81, 2017.
- [5] А. А. Сытник, "Построение моделей градиентных приемников тепловых потоков", *Scientific discussion*, Т. 1, № 9, с. 30–33, 2017.
- [6] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Методы и средства моделирования динамических процессов на основе интегральных моделей", *British Journal of Educational and Scientific Studies*, Т. II, № 2(22), с. 108–114, 2015. *Автор запропонував інтегральний метод у задачі моделювання динаміки ВП.*
- [7] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей", *Известия Томского политехнического университета*, Т. 322, № 4, с. 103–106, 2013. *Здобувач запропонував метод ідентифікації параметрів електричних ланцюгів із застосуванням інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.*
- [8] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и К. Н. Ключка, "Приближенные операционные способы анализа линейных динамических систем с переменными параметрами", *Известия ЮФУ. Технические науки*, № 1 (138), с. 105–110, 2013. *Автором запропоновано метод наближеного аналізу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами з використанням операторного методу.*
- [9] А. А. Сытник, Н. В. Раевский, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Сопоставление методов фильтрации в задачах статистической регуляризации при оценивании параметров радиолокационных систем", *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, № 1, с. 10–16, 2013. *Автор провів аналіз двох алгоритмів калмановського типу, що застосовуються для оцінювання параметрів систем.*
- [10] А. А. Сытник, и М. В. Сагатов, "Математическая модель теплового измерительного преобразователя стержневого типа", *Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление»*, № 6, с. 27–29, 2007. *Дисертантом запропоновано метод розв'язання оберненої динамічної задачі отримання «істинного» вхідного сигналу теплового датчика стержневого типу.*

- [11] Б. П. Бездетный, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Способ регуляризации слабосингулярных динамических моделей Вольтерра", *Моделювання та інформаційні технології*, Київ, Україна: ІПМЕ НАН України, Вип. 9, с. 34–40, 2001. *Здобувач запропонував метод оцінки похибки одержуваного розв'язання інтегрального рівняння Вольтерри II роду з слабосингулярним ядром.*
- [12] А. А. Верлань, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Квадратурные алгоритмы моделирования измерительных преобразователей с распределёнными параметрами", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 6, с.131–136, 2000. *Дисертант розробив швидкодійний алгоритм моделювання вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами.*
- [13] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Інтегральні рівняння аналізу нестационарних електричних систем", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*, № 637, с. 12–17, 2009. *Дисертант запропонував метод інтегральних рівнянь для дослідження електричних ланцюгів, включаючи ланцюги, що містять елементи зі змінними параметрами.*
- [14] И. О. Горошко, С. Ю. Протасов, и А. А. Сытник, "Формирование непараметрических интегральных динамических моделей датчиков в системах измерения испытательного оборудования", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.6, с. 49–57, 2012. *Дисертант запропонував методи отримання інтегральних динамічних моделей ВП за даними фізичних експериментів.*
- [15] Т. П. Гушель, Б. Б. Абдусатаров, и А. А. Сытник, "Об одном алгоритме реализации интегрального метода решения линейных дифференциальных уравнений", *Моделювання та інформаційні технології*, Київ, Україна: ІПМЕ НАН України, Вип. 13, с. 101–105, 2001. *Автор розробив алгоритм реалізації інтегрального методу розв'язання лінійних диференціальних рівнянь.*
- [16] Ю. Л. Коротецкий, Д. Э. Контрерас, и А. А. Сытник, "Применение квадратурно-разностных методов для численной реализации интегродифференциальной модели устройства регулирования питания", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 9, с.53–59, 2001. *Дисертантом використані квадратурно-різницеві методи для чисельної реалізації інтегродиференціальної моделі пристрою регулювання живлення.*

- [17] Л. А. Митько, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, "Квадратурные алгоритмы моделирования процессов деформации упруго-вязких материалов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 6, с. 137–142, 2000. Дисертантом запропоновано спосіб реалізації слабосингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри II роду.
- [18] С. М. Первунинский, и А. А. Сытник, "Свойства оценок скалярного параметра методом максимизации стационарного степенного функционального полинома", *Вісник Технологічного університету Поділля*, Т.1, №3, с.181–184, 2002. Автором розроблений алгоритм визначення оцінки скалярного параметра методом максимізації середнього значення степеневого функціонального полінома.
- [19] М. В. Раєвський, О. О. Ситник, та В. Б. Кисельов, "Використання лінійних фільтрів Калмана для калібрування акселерометрів за допомогою даних глобальних навігаційних супутникових систем", *Відбір і обробка інформації*, № 35(111), 2011. Автором запропоновано спосіб калібрування трикомпонентного акселерометра з використанням фільтра Калмана.
- [20] О. О. Ситник, "Деякі алгоритми розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри I-го роду у задачі відновлення сигналів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 13, с. 139–149, 2016.
- [21] О. О. Ситник, А. А. Верлань, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральних рівнянь нелінійних електричних кіл", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 47, с. 59–70, 2008. Автор запропонував спосіб отримання інтегральних рівнянь Вольтерри для нелінійних електричних ланцюгів.
- [22] О. О. Ситник, О. А. Дячук, С. Н. Одокієнко, та В. О. Тихоход, "Математичне моделювання і динамічна корекція системи вимірювання потоків теплового випромінювання", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, Серія: Технічні науки, Спецвипуск*, с.72–75, 2006. Дисертант запропонував інтегральний метод відновлення сигналів для розв'язання задач корекції динамічних помилок системи вимірювання потоків теплового випромінювання.
- [23] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування методу квадратур для чисельних розрахунків лінійних диференціальних рівнянь", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, Серія: Технічні науки*, №2, с. 90–95, 2013. Здобувач запропонував модифікацію методу квадратур для

чисельного розв'язання лінійних диференціальних рівнянь.

- [24] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов "Універсальний алгоритм розрахунку інтегрального рівняння Вольтерри II роду із застосуванням формул Ньютона-Котеса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 36–42, 2010. *Дисертант розробив алгоритм чисельного розв'язку інтегрального рівняння Вольтерри другого роду з використанням формул Ньютона-Котеса різної точності.*
- [25] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Застосування інтегроапроксимаційного алгоритму для аналізу динаміки електричних кіл", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 69–73, 2008. *Здобувачем розроблений інтегроапроксимаційний алгоритм для аналізу перехідних процесів у лінійних і нелінійних електричних ланцюгах (максимально можлива точність одержуваних поліноміальних рішень).*
- [26] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів застосування інтегральних рівнянь до аналізу лінійних стаціонарних електричних кіл із зосередженими параметрами", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 43, с. 109–118, 2007. *Здобувачем використаний спосіб аналізу за допомогою інтегральних рівнянь для методу контурних струмів у складних лінійних стаціонарних електричних ланцюгах з зосередженими параметрами.*
- [27] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод визначення імпульсної реакції динамічної ланки з періодично змінними параметрами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, 2013, с. 63–66. *Дисертант описав метод визначення імпульсної перехідної функції ВП з використанням функції взаємної кореляції між вхідними та вихідними сигналами.*
- [28] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та В. А. Федорчук, "Інтегральні макромоделі динамічних об'єктів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип.8, с. 98–109, 2013. *Автор запропонував метод моделювання динамічних об'єктів на основі інтегральних макромоделей.*
- [29] О. О. Ситник, М. В. Раєвський, та Г. О. Кисельова, "Аналіз алгоритмів оптимальної фільтрації за показниками точності при скалярних вимірюваннях", *Відбір і обробка інформації*, № 34(110), с.78–85, 2011. *Дисертант розробив алгоритм оптимальної*

фільтрації за показниками точності під час скалярних вимірювань.

- [30] А. А. Сытник, "Аппроксимация многопараметрических первичных измерительных преобразователей на основе метода наименьших квадратов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №4, с. 86–89, 2003.
- [31] А. А. Сытник, "Декомпозиционный метод регуляризации измерительных преобразователей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №4, с. 102–105, 2006.
- [32] А. А. Сытник, "Математическое описание многопараметрических измерительных преобразователей посредством интегральных моделей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 34, с. 75–80, 2005.
- [33] А. А. Сытник, "Программные средства компьютерного исследования динамики измерительных преобразователей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 33, с. 37–44, 2006.
- [34] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Построение математических моделей технологических процессов для решения задач оптимизации управления", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №3, с. 31–36, 2003. *Автор провів аналіз двох варіантів алгоритму автоматичної побудови математичної моделі технологічних процесів із застосуванням лінійних функцій, кусково-лінійних функцій і дробово-раціональних функцій.*
- [35] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Регуляризация линеаризованных систем уравнений при идентификации нелинейных объектов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №1, с. 25–27, 2004. *Автор запропонував метод регуляризації через введення додаткового множника за запропонованим правилом, яке дає змогу обмежитися недостатністю інформації для отримання стійкого достовірного розв'язку.*
- [36] А. А. Сытник, Амид Гази, И. О. Горошко, и И. В. Страшнов, "Некоторые способы статистической идентификации динамических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 23, с. 87–96, 2003. *Дисертант проаналізував способи ідентифікації лінійних і нелінійних динамічних об'єктів.*

- [37] А. А. Сытник, И. О. Горошко, и А. Б. Руденко, "Алгоритмы линеаризации динамических моделей энергетических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 22, с. 99–110, 2003. *Здобувач розробив алгоритм для обчислення коефіцієнтів лінеаризованих рівнянь, що описують динамічні моделі енергетичних об'єктів.*
- [38] А. А. Сытник, Т. П. Гушель, и Амид Гази, "Исследование двухкоординатного тактильного матричного сенсора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2, с. 34–37, 2003. *Автор використав спосіб визначення динамічних характеристик двокоординатного тактильного матричного сенсора.*
- [39] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и Н. Л. Костьян, "Метод идентификации динамического объекта посредством интегральной модели", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т.38, № 2, с. 3–10.2016. **Входит до Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec**). *Дисертант запропонував метод ідентифікації ВП, що описується інтегральним рівнянням Вольтерри II роду.*
- [40] А. А. Сытник, и А. В. Козак, "Алгоритм формирования дифференциального уравнения измерительного преобразователя", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №3, с. 84–87, 2006. *Дисертант розробив алгоритм визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією.*
- [41] А. А. Сытник, А. В. Козак, В. Б. Киселев, и А. А. Киселева, "Определение дифференциального уравнения измерительного преобразователя по импульсной переходной функции", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 45, с. 16–22, 2008. *Автор запропонував метод визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією (застосовуваний як для ВП із зосередженими параметрами, так і для ВП з розподіленими параметрами).*
- [42] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Интегральная динамическая модель датчика сигналов акустической эмиссии", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 47–49, 2009. *Дисертант запропонував математичну модель для автоматизованої обробки інформації від акустичних датчиків механічної деформації, яка має можливість параметричного*

налаштування під різні види вихідних сигналів.

- [43] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Определение временных характеристик сигналов акустической эмиссии", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.5, с. 185–196, 2011. Автор розробив алгоритм чисельного визначення основних часових характеристик вихідних сигналів акустичної емісії алгоритм чисельного визначення основних часових характеристик вихідних сигналів акустичної емісії.
- [44] А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О динамической точности линейной регистрирующей системы", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 74–78, 2008. Дисертантом запропоновано спосіб реєстрації фізичних процесів, який істотно полегшує використання виданих реєструвальною системою відомостей про досліджуваний процес, і яким властива також висока роздільна здатність стосовно відношенню до флуктуацій досліджуваного фізичного процесу.
- [45] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и В. А. Тихоход, "Применение измерительных преобразователей неселективного действия в многосвязных системах управления", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т.36, №2, с. 113–119, 2014. Здобувачем запропоновано спосіб математичної реалізації ВП неселективної дії в багатозв'язних системах.
- [46] O. A. Diachuk, N. L. Kostyan, A. A. Sytnik, and F. A. Halmuhametova, "The method and algorithms for identification of dynamic objects on basis of integral equations", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 9, с. 52–66, 2014. Дисертант розробив алгоритм ідентифікації динамічних об'єктів на основі інтегральних рівнянь Вольтерри.
- [47] O. O. Sytnyk, "Analytical method of forming integrated dynamic models and their software implementation", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.7, с. 191–196, 2012.
- [48] В. М. Шарапов, Іван Сарвар (BD), М. П. Мусієнко, О. В. Бикова, Ю. Г. Лега, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний акселерометр", пат. 32821А Україна, МКИ G01P 15/09 / №98052279, заяв. 05.05.98, опубл.15.02.01, Бюл. №1. Дисертант запропонував змінити топографію розташування електродів (нанесених на поверхню в поляризованих зонах чутливого елемента), завдяки чому зменшується бічна чутливість.

- [49] В. М. Шарапов, І. Б. Чудаєва, М. П. Мусієнко, Іван Сарвар (BD), О. В. Бикова, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний датчик тиску", пат. 35762А Україна, МКИ G01L 11/00, 9/08 / №98052281, заяв. 05.05.98, опубл. 16.04.01, Бюл. №3. *Здобувач запропонував використовувати приймальний резонатор, виконаний у вигляді біморфного елемента, завдяки чому збільшилася чутливість датчика.*
- [50] Ю. Г. Лега, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, О. В. Подгорный, *Моделирование процессов в технических системах*, Черкассы, Украина: ЧДТУ, 2004. *Дисертант розглянув питання математичного моделювання лінійних і нелінійних систем з зосередженими та розподіленими параметрами; запропонував метод імітаційного моделювання з використанням пакету прикладних програм TUTSIM.*
- [51] А. Ф. Верлань, К. Н. Ключка, А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О некоторых особенностях применения интегральных уравнений в вопросе анализа динамики электрических цепей", на *V междунар. конф. Моделирование – 2016*, Киев: ИПМЭ НАН Украины, 2016, с. 81–84. *Автор запропонував спосіб застосування інтегральних рівнянь під час аналізу нестационарних ланцюгів та ланцюгів з розподіленими параметрами.*
- [52] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Метод ідентифікації електричних кіл на основі інтегральних динамічних моделей", на *III міжнар. наук.-техн. конф. Моделирование в электротехнике, электронике и светотехнике*, Київ: ИПМЕ НАН України, 2010, С. 24–26. *Здобувачем запропоновано метод параметричної ідентифікації електричних ланцюгів на основі інтегральних операторів з можливістю врахування помилок у вихідних (початкових) даних.*
- [53] К. М. Ключка, О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Особенности использования интегральных динамических моделей при расчёте переходных процессов в электрических колах", на *The International Scientific Association «Science & Genesis» Global scientific unity 2014*, Прага, Чеська Республіка, 2014, с. 167–170. *Здобувач запропонував метод ефективного розв'язання задачі параметричної ідентифікації електричних ланцюгів, що характеризується наявністю похибок у вихідних даних.*
- [54] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Обґрунтування та перспективи застосування інтегральних рівнянь в задачі моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2015. с. 59–60.

Дисертантом запропонована методика отримання інтегральних динамічних моделей ВП за заданим диференціальним рівнянням.

- [55] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології системи", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негауссовських процесів*, Черкаси, 2009, с. 261–262. *Дисертант запропонував метод отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології систем.*
- [56] О. О. Ситник, К. М. Ключка, та С. Ю. Протасов, "Математичне моделювання вимірювальних перетворювачів з використанням інтегральних рівнянь", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2017, с. 137–139. *Автор розробив методику алгоритмічного та програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу.*
- [57] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Інтерполяційний метод отримання передатної функції по перехідній характеристиці при формуванні ядер інтегральних макромоделей", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2014, с. 149–152. *Автором запропоновано метод отримання передавальної функції по перехідній характеристиці у процесі формування ядер інтегральних макромоделей.*
- [58] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод числової реалізації інтегральних макромоделей динамічних об'єктів із зворотнім зв'язком", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті професора Ю.П. Кунченка, Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2013, с. 31–32. *Здобувач розробив алгоритм комп'ютерної реалізації нелінійних інтегральних макромоделей динамічних об'єктів зі зворотним зв'язком.*
- [59] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Багатокрокові алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь у задачі відновлення сигналів", на *VII міжнар. наук. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець- Подільський, 2016, с. 206–207. *Автором запропонована загальна схема побудови лінійних багатокрокових методів, яка ґрунтується на використанні формул типу Адамса.*

- [60] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Інтегральний метод побудови моделей градієнтних давачів теплових потоків", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Київ, 2017, с. 307–308. Дисертант запропонував спосіб розрахунку параметрів інтегральної моделі, еквівалентної диференціальному рівнянню.
- [61] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральної макромоделі п'єзоелектричного датчика змінного тиску", на *IV міжнар. наук.-практ. конф. Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки*, Чернівці, 2014, с. 100–101. Здобувач запропонував метод отримання інтегральної макромоделі п'єзоелектричного датчика тиску через застосування наближених імпульсних перехідних функцій, які є ядрами інтегральних операторів.
- [62] А. А. Сытник, "Компьютерная поддержка проектирования приборов контроля автоматизированных систем управления", на *міжнар. наук. конф. Сучасний менеджмент у виробництві та гуманітарній діяльності*, Черкаси, 2005, с. 45–46.
- [63] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, "Особенности применения интегральных уравнений в задаче идентификации измерительных преобразователей", на *III міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Київ-Черкаси, 2015, с. 329–330. Дисертант розробив алгоритм ідентифікації ВП на основі розв'язання алгебраїчної системи, отриманої «прямою» апроксимацією інтегрального оператора в інтегральному рівнянні Вольтерри II-го роду.
- [64] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "О реализации интегральных моделей в задаче динамической коррекции измерительного преобразователя", на *конф. Интегральные уравнения-2009*, Киев, 2009, с. 131–133. Автором описано реалізацію інтегральних моделей у задачі динамічної корекції ВП.
- [65] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Метод реализации процесса диагностирования технических изделий по сигналам акустической эмиссии", на *II міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2013, с. 433–434. Здобувачем розроблено методіку обчислень складних діагностичних ознак на основі інтегрального методу ідентифікації, згідно з яким як діагностичні ознаки вибираються коефіцієнти диференціальних

рівнянь, що описують динаміку об'єкта.

- [66] А. А. Сытник, С. Н. Одокиенко, и О. А. Наконечная, "Организация интеллектуальной моделирующей системы", на *міжнар. наук.-метод. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2006, с. 42–49. *Здобувач запропонував структуру інтелектуального середовища моделювання для розв'язання інтегральних рівнянь та оцінки її ефективності.*
- [67] А. А. Сытник, В. В. Палагин, С. Ю. Протасов, и К. М. Ключка, "Применение итерационных алгоритмов в задачах исследования динамики измерительных преобразователей на основе интегральных моделей", in *The International Scientific Association «Science & Genesis» Scientific achievements 2015*, Vienna, Austria, Vol. II, 2015, pp. 163–171. *Автор розробив ітераційні алгоритми під час розв'язання вирішенні задач динаміки ВП на основі інтегральних моделей.*
- [68] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Моделирование и оценка параметров сложных технических систем", на *VII міжнар. наук.-практ. конф. Наука і освіта—2004*, 2004, Т. 64, с. 77–79. *Здобувачем запропонована методика вибору структури моделі та оцінки її параметрів.*
- [69] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Применение метода интегральных уравнений при решении электротехнических задач", на *міжнар. наук.-практ. конф. Наукові дослідження – теорія та експеримент 2005*, Полтава, 2005, Т. 9, с. 54–58. *Здобувачем запропоновано спосіб використання інтегральних рівнянь у задачах моделювання динаміки ланцюгів.*
- [70] А. А. Сытник, и В. А. Тихоход "Интерпретация результатов измерения энергетических параметров на основании решения обратных задач математического моделирования", на *международ. конф. Информационные технологии в управлении энергетическими системами*, Киев, 2005, с. 83–84. *Здобувач запропонував спосіб інтерпретації результатів вимірювання енергетичних параметрів на основі розв'язання обернених задач математичного моделювання.*
- [71] M. V. Sagatov, Sh. M. Guiyamov, and A. A. Sytnyk, "Mathematical modeling the multipleparameter measuring converters and optimization their metrological characteristics", in *6th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS '04*, Štrbské Pleso High Tatras, Slovak Republic, 2004, pp.1–5. *Автор розробив спосіб математичного моделювання багатопараметричних вимірювальних перетворювачів.*

- [72] A. A. Sytnyk, S. U. Protasov, K. N. Klyuchka, "Methods of receipt of integral form of description of nonstationary measurings transformers with the distributed parameters", in *of the IV International Research and Practice Conference European Science and Technology*, Munich, Germany, 2013, Vol.I, pp. 342–348. *Здобувач запропонував метод перетворення диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують нестационарні ВП, до інтегральних рівнянь Вольтерри та їх систем.*
- [73] A. F. Verlan, M. V. Sagatov, A. A. Sytnyk, and A. A. Djachuk, "The method of identification of controlled dynamic objects on the basis of integral models", in *Fourth World Conference Intelligent Systems for industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 28–40. *Автором проаналізовані алгоритми ідентифікації ВП на основі інтегральних рівнянь.*
- [74] A. A. Verlan, B. B. Abdusatarov, M. Sagatov, and A. A. Sytnyk, "Analysis of power circuits' dynamics using generalized state–space model", in *of Fourth World Conference Intelligent Systems for industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 168–176. *Здобувач запропонував способи моделювання динаміки силових ланцюгів, що використовують узагальнену модель стану і простору, способи моделювання динаміки силових ланцюгів, що використовують узагальнену модель стану і простору.*
- [75] A. Verlan, A. Verlan, and A. Sytnyk, "Simulation of electrical systems for supplying superconducting magnetic energy storage", in *of 3rd International Symposium on Electrical Electronic and Computer Engineering. ISEECE–2006*, Nicosia, TRNC, 2006, pp. 214–220. *Дисертант запропонував метод поліпшення енергетичних і динамічних параметрів для електричних систем забезпечення.*

ЗМІСТ

	Арк.
ВСТУП.....	32
РОЗДІЛ 1 МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ У ЗАДАЧАХ ДИНАМІКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ.....	48
1.1 Математичні методи в проблемі дослідження і вдосконалення вимірювальних процесів	48
1.2 Моделі динаміки вимірювальних перетворювачів (традиційний підхід).....	58
1.3 Альтернативність математичних описів вимірювальних перетворювачів та інтегральний підхід.....	60
1.4 Формування явних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів	77
1.5 Метод експериментального визначення імпульсної реакції динамічної ланки із періодично змінними параметрами.....	96
1.6 Обґрунтування і вибір напрямку досліджень, висновки по розділу 1.....	100
РОЗДІЛ 2 СПОСОБИ НАБЛИЖЕНОГО АНАЛІЗУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА ДИНАМІЧНИМИ МОДЕЛЯМИ.....	104
2.1 Наближені методи аналізу та врахування параметрів	104
2.2 Перетворення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами	113
2.3 Побудова диференціальної динамічної моделі вимірювального перетворювача за імпульсною перехідною функцією.....	122

2.4 Апроксимація багатопараметричних первинних вимірювальних перетворювачів на основі методу найменших квадратів.....	130
2.5 Висновки	135
РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМІЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМИ МОДЕЛЯМИ (ПРЯМІ ЗАДАЧІ).....	
3.1 Особливості інтегральних динамічних моделей у формі рівнянь Вольтерри II роду.....	138
3.2 Квадратурні алгоритми аналізу процесів у вимірювальних перетворювачах на основі інтегральних моделей	155
3.3 Застосування сплайнів і ітераційні алгоритми.....	171
3.4 Дослідження еквівалентних форм представлення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів методом обчислювальних експериментів.....	184
3.5 Висновки.....	198
РОЗДІЛ 4 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	
4.1 Задачі ідентифікації вимірювальних перетворювачів.....	201
4.2 Інтегральний метод і квадратурні алгоритми ідентифікації нестационарних вимірювальних перетворювачів.....	205
4.3 Алгоритми ідентифікації стаціонарних вимірювальних перетворювачів.....	211
4.4 Ідентифікація динамічних моделей вимірювальних перетворювачів на основі степеневих рядів.....	217

4.5 Висновки	232
РОЗДІЛ 5 ІНТЕГРАЛЬНИЙ МЕТОД І АЛГОРИТМИ	
ВІДНОВЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА ВХОДІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО	
ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	
	234
5.1 Інтегральні моделі задач відновлення вхідного сигналу і динамічної корекції вимірювального перетворювача.....	234
5.2 Чисельна реалізація інтегральних моделей у задачах відновлення і динамічної корекції сигналів вимірювальних перетворювачів.....	247
5.3 Реалізація слабосингулярних моделей у задачі відновлення.....	269
5.4 Декомпозиційний метод регуляризації вимірювальних перетворювачів.....	277
5.5 Висновки.....	284
РОЗДІЛ 6 ОРГАНІЗАЦІЯ МОДЕЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА	
РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ.....	
	286
6.1 Структура інтелектуалізованої системи моделювання.....	286
6.2 Побудова моделей градієнтних приймачів теплових потоків.....	291
6.3 Дослідження динаміки тактильного матричного сенсора.....	299
6.4 Формування непараметричних інтегральних динамічних моделей датчиків у системах вимірювання випробувального устаткування.....	304
6.5 Інформація про використання та впровадження результатів дисертаційної роботи.....	319

6.6 Висновки	323
ВИСНОВКИ.....	326
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	330
Додаток А Математичний опис багатопараметричних вимірювальних перетворювачів за допомогою інтегральних моделей.....	357
Додаток Б. Алгоритми завдання «розгінних» значень шуканої функції.....	363
Додаток В. Метод розв'язання системи нелінійних рівнянь.....	367
Додаток Г. Приклад отримання розв'язку рівняння методом простої ітерації.....	371
Додаток Д. Похибки для моделей першого та другого порядків.....	373
Додаток Е. Приклад застосування швидкодіючого алгоритму чисельного розв'язання системи інтегральних рівнянь Вольтерри I роду.....	376
Додаток Ж Багатокрокові алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь Вольтерри I роду у задачі відновлення сигналів.....	382
Додаток К. Комплекс програм для реалізації інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів.....	389
Додаток Л. Інформація про впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	411
Додаток М. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	419

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вимірювальні перетворювачі (ВП) є невід'ємною складовою частиною сучасних систем контролю, управління, моніторингу, діагностики, проектування технічних засобів. Ефективні методи і засоби прямих і непрямих вимірювань у поєднанні з комп'ютерними технологіями проектування та інтерпретації результатів вимірювань (спостережень) забезпечують інформаційну основу для досягнення високої якості функціонування технологічних об'єктів промислових виробництв, сучасних технічних систем і об'єктів у цілому. Завдяки широкомасштабному виробництву та використанню вимірювальних перетворювачів у різних галузях науки і техніки протягом багатьох років інтенсивно проводять роботи по їх вдосконаленню. Йде безперервна зміна поколінь вимірювальних перетворювачів, постійно з'являються зразки з поліпшеними функціональними та експлуатаційними характеристиками, розширюється сфера їх застосування, виникають все нові потреби в поліпшенні техніко-економічних показників. Суттєвого вдосконалення набувають конструктивні елементи перетворювачів завдяки появі нових технологій (зокрема нанотехнологій) і матеріалів з унікальними характеристиками. Таким чином, сучасні вимірювальні перетворювачі і системи складають значну частку засобів нової техніки, для яких характерний стрімкий розвиток і поширення в різних сферах застосування, що вимагає розв'язання нових задач на функціональному, схематичному, елементному і інформаційному рівнях. Виникає необхідність розробки швидкодійних і високоточних приладів, які повинні адаптуватися до мінливих у часі умов функціонування, допускати роботу при значних рівнях завад, працювати в умовах віддаленого доступу тощо. Проектування зазначених пристроїв супроводжується вирішенням таких практичних проблем, як всебічний аналіз динамічних режимів роботи, проведення різних випробувань, розв'язання складних обчислювальних задач синтезу і оптимізації характеристик ВП.

На особливу увагу при цьому заслуговує той факт, що вимірювальні перетворювачі є об'єктами і компонентами активної інформатизації та комп'ютеризації. Розвиток комп'ютерних засобів, вимірювальних приладів і систем спряження започаткував створення інформаційних систем, які об'єднують технології вимірювання, обробки та передачі інформації, формування сигналів управління, контролю і діагностики.

Аналізуючи динамічні властивості вимірювальних перетворювачів, необхідно враховувати їх фізичну і структурну неоднорідність і, найчастіше, шаруватий характер чутливого матеріалу, що свідчить про принципову складність математичного опису відповідних фізичних процесів.

Таким чином, сучасні вимірювальні перетворювачі в загальному випадку відносять до класу складних динамічних об'єктів (ДО), ефективним шляхом дослідження яких є використання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Існуючі наукові досягнення в галузі математичного моделювання динамічних об'єктів (систем) базуються в основному на застосуванні апарату диференціальних рівнянь. Створені на основі цього підходу програмні засоби набули поширення і увійшли до більшості серійних пакетів комп'ютерного моделювання. Проте є певні обмеження під час розв'язання деяких класів задач моделювання. Зокрема це стосується забезпечення стійкості обчислювального процесу за наявності значних рівнів завад у вигляді шумів з високочастотними спектрами у вихідних даних, врахування досить поширеного ефекту Гіббса під час моделювання об'єктів як з зосередженими, так і з розподіленими параметрами, застосування ітераційних алгоритмів аналізу, формування математичних описів за експериментальними даними тощо. Досвід показує [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], що для подолання зазначених труднощів доцільно як доповнення до існуючих створювати нові способи побудови і чисельної реалізації математичних моделей. Ефективним переходом у цьому напрямку є застосування певних видів інтегральних рівнянь і операторів, які мають декілька таких позитивних властивостей, як

висока універсальність (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об'єктів, властивості яких задаються однією функцією – ядром інтегрального оператора), потенційно висока адекватність процесів моделювання, властивість згладжування при виконанні обчислень і обробки сигналів з високочастотними шумами, висока збіжність ітераційних процесів розв'язання обчислювальних задач, можливість ефективної побудови моделі за експериментальними даними і т.п. Підхід до моделювання динамічних об'єктів (в даному випадку ВП) на основі інтегральних рівнянь представляється перспективним у межах розроблюваної теми.

Необхідно також враховувати, що нині постачання ВП замовнику у вигляді готових виробів супроводжується зазначенням не тільки основних параметрів і характеристик, але і математичних описів, вимоги до яких неухильно підвищуються у зв'язку з обмеженням ресурсів для їх реалізації в реальному часі.

Таким чином, у зв'язку з інтенсивним технологічним розвитком, ускладненням структур і суттєвим розширенням сфери застосування вимірювальних перетворювачів має місце актуальна **науково-технічна проблема** 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.

У розвиток методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання процесів в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС), в тому числі на основі інтегрального підходу, вагомий внесок було зроблено завдяки роботам Б.Б. Абдусатарова, А.С. Апарцина, Г.І. Василенко, В.В. Васильєва, Г. Ван-Тріса, Е. Вашни, А.Ф. Верланя., Б.І. Волкова, Є.Т. Володарського, В.А. Грановського, В.М. Дубового, Б.Г. Кадука, Р.Н. Кветного, А.В. Кириленка, С.В. Ленькова, П.С. Малачівського, М.А. Максимовича, Б.Г. Марченка, В.Ф. Миргорода, Б.І. Мокіна,

М.В. Мисловича, З.Т. Назарчука, В.Д. Павленка, Ю.П. Питьєва, В.В. Рогози, В.А. Романова, М.В. Сагатова, В.С. Сизикова, Б.С. Стогнія, П.М. Таланчука, Ю.М. Туза, С. Baker, А.К. Miller, P.I. Van der Houwen, F. Aburdene Maurice, H. Brunner, D. Greenspan, V. O'Neil Peter, T. Sandefur James, C. Viola, Wikan Arild, F.J. Sayas, J. Ramsay, G. Hooker, R. Kress, B. Despres, M. D. Chekroun, H. Liu, S. Wang та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Черкаському державному технологічному університеті. Дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт:

«Синтез та аналіз надширокополосних багатопозиційних систем зв'язку з використанням неперервних шумових сигналів» (номер державної реєстрації 0109U001881), (виконавець);

«Створення високоефективного інтелектуального комплексу для розробки та дослідження п'єзоелектричних компонентів для приладобудування, медицини та робототехніки» (номер державної реєстрації 0117U000936), (виконавець);

«Моделювання процесу технічної експлуатації силових трансформаторів з урахуванням закону дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов» (номер державної реєстрації 0117U003070), (керівник роботи).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності методів і засобів математичного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь і операторів Вольтерри, створення алгоритмічних основ і програмних засобів їх комп'ютерної реалізації.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі науково-технічні задачі:

– аналіз сучасного стану проблеми дослідження і вдосконалення вимірювальних перетворювачів на основі математичних методів і комп'ютерних засобів;

– розвиток методів математичного опису динамічних процесів в стаціонарних вимірювальних перетворювачах на основі динамічних моделей у вигляді інтегральних рівнянь та операторів, одержуваних за допомогою апріорних даних, представлених динамічними характеристиками;

– розробка способів формування інтегральних математичних моделей динаміки вимірювальних перетворювачів як з зосередженими, так і з розподіленими параметрами, що застосовуються до рішення задач аналізу динамічних процесів;

– розробка алгоритмічних основ аналізу динаміки вимірювальних перетворювачів за інтегральними моделями (прямі задачі) на основі чисельної реалізації базового квадратурного методу розв’язання інтегральних рівнянь Вольтерри II роду;

– розробка та дослідження методів і алгоритмів ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів за експериментальними даними;

– розробка методу і алгоритмів відновлення сигналу на вході вимірювального перетворювача за допомогою обробки вихідного сигналу на основі розв’язання оберненої задачі для рівняння Вольтерри I роду з орієнтацією на задачу динамічної корекції вимірювального перетворювача;

– розробка комплексу програм розв’язання прямих і обернених задач моделювання вимірювальних перетворювачів на основі інтегральних рівнянь, рішення модельних і прикладних задач.

Об’єктом дослідження є динамічні процеси у вимірювальних перетворювачах.

Предметом дослідження є методи і засоби математичного та комп’ютерного моделювання процесів у вимірювальних перетворювачах на основі інтегральних динамічних моделей.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач використані:

– аналітичні та чисельні методи математичного моделювання динамічних систем, які необхідні для отримання характеристик вимірювальних перетворювачів;

– елементи теорії інтегральних рівнянь, а саме:

методи розщеплення та еквівалентних перетворень дозволяють отримати інтегральні рівняння динамічних моделей ВП за заданими диференціальними рівняннями;

метод інтегральних перетворень для отримання інтегральних динамічних моделей (ІДМ) вимірювальних перетворювачів на підставі застосування перетворення Лапласа;

структурний метод отримання ІДМ при заданій структурі об'єкта, динамічних характеристиках та нелінійних залежностях;

– методи чисельного розв'язання інтегральних рівнянь Вольтерри II і I роду:

метод сплайнів для розв'язання задач аналізу ВП при необхідності дослідження їх моделей, побудованих за експериментальними даними, і реалізації моделей в реальному часі;

ітераційні методи для аналізу процесів як в лінійних, так і в нелінійних ВП;

метод квадратур для розрахунку параметрів (задачі ідентифікації) та у задачах відновлення сигналів ВП;

метод колокації, заснований на застосуванні кусково-гладких поліномів для розв'язання рівнянь Вольтерри I роду, що дає можливість отримати розв'язок на ділянках, вибираючи їх довжину і застосовуючи на кожному з них апроксимуючий вираз із невеликою кількістю координатних функцій;

– методи розв'язання обернених задач динаміки на основі інтегральних рівнянь:

метод обернених матриць для розв'язання системи інтегральних рівнянь Вольтерри I роду у задачах відновлення і динамічної корекції сигналів ВП;

метод регуляризації при розв'язанні сингулярних інтегральних рівнянь; квадратурний багатокроковий метод високої точності, заснований на використанні формул типу Адамса, для розв'язання інтегральних рівнянь Вольтерри I роду;

декомпозиційний метод регуляризації ВП, що дозволяє більш ефективно зменшити шумові перешкоди при розв'язанні задачі відновлення сигналу;

– методи програмної інженерії при комп'ютерній реалізації ІДМ:

об'єктно-орієнтований метод для організації моделювальної системи та розв'язання прикладних задач ВП;

структурний метод для створення загальної структури інтелектуального середовища моделювання динамічних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше запропоновані:

– аналітичний метод «розщеплення з частковим оберненням» для заданих диференціальних рівнянь, що описують вимірювальні перетворювачі з зосередженими параметрами, який, на відміну від відомих способів побудови інтегральних динамічних моделей, дозволяє отримати не одну, а ряд еквівалентних інтегральних моделей, що розширює можливість побудови високостійких чисельних алгоритмів аналізу вимірювальних перетворювачів;

– метод формування інтегральних динамічних моделей нестационарних вимірювальних перетворювачів із зосередженими та розподіленими параметрами, який, на відміну від існуючих, базується на використанні заданої імпульсної перехідної функції, представленій у сепарабельному вигляді, що надає можливість переходу до еквівалентної інтегральної моделі;

– прямий (неоптимізаційний) метод ідентифікації інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів на основі

експериментальних даних, який, на відміну від відомих, передбачає формування розрахункових виразів на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом апроксимації інтегрального оператора;

- метод «внутрішньої регуляризації» для розв'язання слабосингулярного інтегрального рівняння Вольтерри I роду в задачі відновлення вхідного сигналу вимірювального перетворювача, що, на відміну від існуючих, передбачає введення малого регуляризуючого параметра β у знаменник функції ядра, що забезпечує стійкість обчислювального процесу;

вдосконалені:

- 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;

- структурно-алгоритмічний метод організації засобів комп'ютерного моделювання стосовно задач дослідження основних типів вимірювальних перетворювачів, який забезпечує візуальну побудову програм відповідно до принципу декомпозиції об'єкта, що моделюється, або його моделі;

набули подальшого розвитку:

- підхід до математичного і комп'ютерного моделювання динамічних процесів у вимірювальних перетворювачах на основі застосування апарату інтегральних рівнянь та операторів;

- принцип альтернативності (множинності різних форм) математичних моделей у задачах динаміки вимірювальних перетворювачів, для якого доведено, що для конкретного випадку вимірювань існує деяка вдало обрана модель, яка за певних вимог до точності вимірювань дозволяє врахувати

особливості конкретної розв'язуваної задачі стосовно певного критерію якості процесу моделювання;

– структурні методи отримання явних (у вигляді інтегрального оператора типу Вольтерри) і неявних (у вигляді інтегральних рівнянь Вольтерри II роду) інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів;

– метод формування одновимірних інтегральних моделей вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами на основі динамічних характеристик.

Практичне значення отриманих результатів

1. Створені 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.

2. Запропоновані методи моделювання та комп'ютерні засоби дозволяють забезпечити якісне відтворення властивостей, характеристик і параметрів широкого класу вимірювальних перетворювачів. Розроблений пакет прикладних програм реалізований в моделюючому 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.

3. Істотне прикладне значення має розроблений набір комп'ютерних моделей ряду найбільш широко застосовуваних на практиці видів вимірювальних перетворювачів: тиску, швидкості потоку, кута повороту, вологості газу, температури, витрат, прискорення та ін.

4. Розроблені моделі, алгоритми і програми, методики розрахунку і моделювання можуть знайти застосування в навчальному процесі технічних вузів.

5. В роботі вирішені наступні прикладні задачі: побудови моделей градієнтних приймачів теплових потоків; дослідження динаміки тактильного матричного сенсору; формування непараметричних інтегральних динамічних моделей датчиків у системах вимірювання випробувального устаткування; побудови інтегральної динамічної моделі датчика сигналів акустичної емісії.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблені методи знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України: Черкаський міський РЕМ ПАТ «Черкасиобленерго» (м. Черкаси), ДП «Черкасистандартметрологія» (м. Черкаси), ПАТ «АЗОТ» (м. Черкаси), ПАТ «Тернопільський радіозавод «Оріон» (м. Тернопіль), ТОВ «Навіс-Україна» (м. Сміла), ТОВ «СІКАМ Україна» (м. Київ), а також впроваджені у навчальний процес Черкаського державного технологічного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримані автором самостійно. Роботи [3], [4], [5], [20], [30], [31], [32], [33], [47], [62] написані самостійно. В опублікованих роботах у співавторстві особисто дисертанту належать: монографія [50] – розділи 1, 3 і підрозділи 2.1, 2.2, 2.2.1, 4.1, 4.2; [1] – метод формування явних інтегральних динамічних моделей вимірювальних перетворювачів як з розподіленими, так і з зосередженими параметрами; [2] – запропоновано алгоритми чисельної реалізації інтегральних рівнянь для проведення обчислювальних експериментів; [6] – інтегральний метод в задачі моделювання динаміки ВП; [7] – метод ідентифікації параметрів електричних ланцюгів із застосуванням інтегральних рівнянь Вольтерри II роду; [8] – метод наближеного аналізу лінійних динамічних систем зі змінними параметрами з використанням операторного методу; [9] – аналіз двох алгоритмів калмановського типу, що застосовуються для оцінювання

параметрів систем; [10] – метод розв’язання оберненої динамічної задачі отримання «істинного» вхідного сигналу теплового датчика стрижневого типу; [11] – метод оцінки похибки одержуваного рішення інтегрального рівняння Вольтерри II роду з слабосингулярним ядром; [12] – швидкодіючий алгоритм моделювання вимірювальних перетворювачів з розподіленими параметрами; [13] – метод інтегральних рівнянь для дослідження електричних ланцюгів, включаючи ланцюги, що містять елементи зі змінними параметрами; [14] – методи отримання інтегральних динамічних моделей ВП за даними фізичних експериментів; [15] – алгоритм реалізації інтегрального методу вирішення лінійних диференціальних рівнянь; [16] – квадратурно-різницеві методи для чисельної реалізації інтегродиференціальної моделі пристрою регулювання живлення; [17] – спосіб реалізації слабосингулярних інтегральних рівнянь Вольтерри II роду; [18] – алгоритм визначення оцінки скалярного параметра методом максимізації середнього значення степеневого функціонального полінома; [19] – спосіб калібрування трикомпонентного акселерометра з використанням фільтра Калмана; [21] – спосіб отримання інтегральних рівнянь Вольтерри для нелінійних електричних ланцюгів; [22] – інтегральний метод відновлення сигналів для вирішення задач корекції динамічних помилок системи вимірювання потоків теплового випромінювання; [23] – модифікація методу квадратур для чисельного розв’язання лінійних диференціальних рівнянь; [24] – алгоритм чисельного розв’язання інтегрального рівняння Вольтерри другого роду з використанням формул Ньютона–Котеса різної точності; [25] – інтегроапроксимаційний алгоритм для аналізу перехідних процесів у лінійних і нелінійних електричних ланцюгах (максимально можлива точність одержуваних поліноміальних рішень); [26] – спосіб аналізу за допомогою інтегральних рівнянь для методу контурних струмів у складних лінійних стаціонарних електричних ланцюгах із зосередженими параметрами; [27] – метод визначення імпульсної перехідної функції ВП з використанням функції взаємної кореляції між

вихідними та вихідними сигналами; [28] – метод моделювання динамічних об'єктів на основі інтегральних макромоделей; [29] – алгоритм оптимальної фільтрації за показниками точності під час скалярних вимірювань; [34] – аналіз двох варіантів алгоритму автоматичної побудови математичної моделі технологічних процесів із застосуванням лінійних функцій, кусково-лінійних функцій і дробово-раціональних функцій; [35] – метод регуляризації шляхом введення додаткового множника за запропонованим правилом, яке дозволяє обмежитися недостатністю інформації для отримання стійкого достовірного рішення; [36] – способи ідентифікації лінійних і нелінійних динамічних об'єктів; [37] – алгоритм для обчислення коефіцієнтів лінеаризованих рівнянь, що описують динамічні моделі енергетичних об'єктів; [38] – спосіб визначення динамічних характеристик двокоординатного тактильного матричного сенсора; [39] – метод ідентифікації ВП, що описується інтегральним рівнянням Вольтерри II роду; [40] – алгоритм визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією; [41] – метод визначення диференціального рівняння ВП за імпульсною перехідною функцією (застосовуваний як для ВП із зосередженими параметрами, так і для ВП з розподіленими параметрами); [42] – математична модель для автоматизованої обробки інформації від акустичних датчиків механічної деформації, яка має можливість параметричного налаштування під різні види вихідних сигналів; [43] – алгоритм чисельного визначення основних часових характеристик вихідних сигналів акустичної емісії; [44] – спосіб реєстрації фізичних процесів, який істотно полегшує використання виданих реєструючою системою відомостей про досліджуваний процес, і якому властива висока роздільна здатність стосовно флуктуацій досліджуваного фізичного процесу; [45] – спосіб математичної реалізації ВП неселективної дії в багатозв'язних системах; [46] – алгоритм ідентифікації динамічних об'єктів на основі інтегральних рівнянь Вольтерри; [48] – запропонував змінити топографію розташування електродів (нанесених на поверхню в поляризованих зонах чутливого елемента), завдяки чому зменшується бічна

чутливість; [49] – запропонував використовувати приймальний резонатор, виконаний у вигляді біморфного елемента, завдяки чому збільшилася чутливість датчика; [51] – спосіб застосування інтегральних рівнянь під час аналізу нестационарних ланцюгів та ланцюгів із розподіленими параметрами; [52] – метод параметричної ідентифікації електричних ланцюгів на основі інтегральних операторів з можливістю врахування помилок у вихідних (початкових) даних; [53] – метод ефективного вирішення задачі параметричної ідентифікації електричних ланцюгів, що характеризується наявністю похибок у вихідних даних; [54] – методика отримання інтегральних динамічних моделей ВП за заданим диференціальним рівнянням; [55] – метод отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології систем; [56] – методика алгоритмічного та програмного забезпечення процесів моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів з використанням структурно-орієнтованого підходу; [57] – метод отримання передавальної функції по перехідній характеристиці при формуванні ядер інтегральних макромоделей; [58] – алгоритм комп'ютерної реалізації нелінійних інтегральних макромоделей динамічних об'єктів зі зворотним зв'язком; [59] – запропонована загальна схема побудови лінійних багатокрокових методів, яка ґрунтується на використанні формул типу Адамса; [60] – спосіб розрахунку параметрів інтегральної моделі, яка еквівалентна диференціальному рівнянню; [61] – метод отримання інтегральної макромоделі п'єзоелектричного датчика тиску шляхом застосування наближених імпульсних перехідних функцій, які є ядрами інтегральних операторів; [63] – алгоритм ідентифікації ВП на основі рішення алгебраїчної системи, отриманої шляхом «прямої» апроксимації інтегрального оператора в інтегральному рівнянні Вольтерри II роду; [64] – реалізація інтегральних моделей в задачі динамічної корекції ВП; [65] – методика обчислень складних діагностичних ознак на основі інтегрального методу ідентифікації, згідно з яким як діагностичні ознаки вибираються коефіцієнти диференціальних рівнянь, що описують динаміку об'єкта; [66] –

структура інтелектуального середовища моделювання для розв'язання інтегральних рівнянь та оцінка її ефективності; [67] – ітераційні алгоритми для розв'язання задач динаміки ВП на основі інтегральних моделей; [68] – методика вибору структури моделі та оцінки її параметрів; [69] – спосіб використання інтегральних рівнянь в задачах моделювання динаміки ланцюгів; [70] – спосіб інтерпретації результатів вимірювання енергетичних параметрів на основі розв'язання обернених задач математичного моделювання; [71] – спосіб математичного моделювання багатопараметричних вимірювальних перетворювачів; [72] – метод перетворення диференціальних рівнянь в частинних похідних, що описують нестационарні ВП, до інтегральних рівнянь Вольтерри та їх систем; [73] – аналіз алгоритмів ідентифікації ВП на основі інтегральних рівнянь; [74] – способи моделювання динаміки силових ланцюгів, що використовують узагальнену модель стану і простору; [75] – метод поліпшення енергетичних і динамічних параметрів для електричних систем забезпечення. (Додатк М).

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертації було оприлюднено і обговорено на конференціях: VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наука і освіта'2004», 10-25 лютого 2004 р., Дніпропетровськ; 6th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS 04, June 16-18, 2004 Štrbské Pleso High Tatras, Slovak Republic; Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2005», 16-20 травня 2005 р., Полтава; Міжнародній конференції «Інформаційні технології в управлінні енергетичними системами», 18-19 жовтня 2005 р., Київ; Міжнародній науковій конференції «Сучасний менеджмент у виробництві та гуманітарній діяльності», 2005 р., Черкаси; Fourth World Conference on Intelligent Systems for industrial Automation, November 21-22, 2006, Tashkent, Uzbekistan; 3rd International Symposium on Electrical, Electronic and Computer Engineering. ISEECE, November 23-25, 2006, Nicosia, North Cyprus; конференції «Інтегральні рівняння — 2009 — Integral equations — 2009», 26-29 січня 2009 р., Київ;

Третій міжнародній науково-технічній конференції «Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці», МЕЕС'10, 15-17 вересня 2010 р., Київ; I, VI, VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», (квітень 2006 р., 2014 р., 2016 р.), Кам'янець-Подільський; European Science and Technology IV International Research and Practice Conference. April 10th—11th, 2013, Munich, Germany; Global scientific unity 2014: The International Scientific Association «Science & Genesis» 26-27 September, 2014, Prague, Czech Republic; IV Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», 23-25 жовтня 2014 р, Чернівці; Scientific achievements 2015: The International Scientific Association «Science & Genesis», 20 February 2015, Vienna, Austria; Міжнародній конференції «Моделювання – 2016», 25-26 травня 2016 р., м. Київ; II, IV, V, VI Міжнародній науково-практичній конференції «Обробка сигналів і негауссовських процесів» (травень 2009 р., 2013 р., 2015 р., 2017 р.), Черкаси; II, III, IV Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)», (травень 2013 р., 2015 р., 2017 р.), Київ – Черкаси.

Публікації. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 75 наукових робіт, з них 1 монографія [50], 8 статей у наукових періодичних виданнях інших держав [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], 2 патенти України [48], [49], 37 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України, [2], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], 25 публікацій у збірниках міжнародних та вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], 1 стаття у науковому

періодичному виданні [1], проіндексованому у міжнародній наукометричній базі даних Scopus. Одноосібні публікації складають 10 наукових робіт [3], [4], [5], [20], [30], [31], [32], [33], [47], [62]. Англійською мовою – 9 публікацій [1], [3], [46], [47], [71], [72], [73], [74], [75].

Детальний список публікацій здобувача за темою дисертації наведено у додатку М.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, посилання та десяти додатків. Загальний обсяг роботи становить 431 сторінку, із них основного тексту дисертації – 297 сторінок, 31 рисунок, 52 таблиці, посилання включає 234 найменування та займає 26 сторінок, а також 10 додатків на 75 сторінках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. Ф. Верлань, К. Н. Ключка, А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О некоторых особенностях применения интегральных уравнений в вопросе анализа динамики электрических цепей", на *V междунар. конф. Моделирование – 2016*, Киев: ИПМЭ НАН Украины, 2016, с. 81–84.
- [2] А. Ф. Верлань, и В. С. Сизиков, *Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы*, Киев, Украина: Наукова думка, 1986.
- [3] И. О. Горошко, С. Ю. Протасов, и А. А. Сытник, "Формирование непараметрических интегральных динамических моделей датчиков в системах измерения испытательного оборудования", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.6, с. 49–57, 2012.
- [4] Ю. Г. Лега, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, и О. В. Подгорный, *Моделирование процессов в технических системах*, Черкассы, Украина: ЧДТУ, 2004.
- [5] О. О. Ситник, А. А. Верлань, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральних рівнянь нелінійних електричних кіл", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 47, с. 59–70, 2008.
- [6] А. А. Сытник, Амид Гази, И. О. Горошко, и И. В. Страшнов, "Некоторые способы статистической идентификации динамических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 23, с. 87–96, 2003.
- [7] А. А. Сытник, В. В. Палагин, С. Ю. Протасов, и К. М. Ключка, "Применение итерационных алгоритмов в задачах исследования динамики измерительных преобразователей на основе интегральных моделей", of *The International Scientific Association «Science & Genesis» Scientific achievements 2015*, Vienna, Austria, Vol. II, 2015, pp. 163–171.

- [8] А. А. Сытник, "Аппроксимация многопараметрических первичных измерительных преобразователей на основе метода наименьших квадратов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №4, с. 86–89, 2003.
- [9] А. А. Сытник, "Декомпозиционный метод регуляризации измерительных преобразователей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №4, с. 102–105, 2006.
- [10] А. А. Сытник, "Компьютерная поддержка проектирования приборов контроля автоматизированных систем управления", на *міжнар. наук. конф. Сучасний менеджмент у виробництві та гуманітарній діяльності*, Черкаси, 2005, с. 45–46.
- [11] А. А. Сытник, "Математическое описание многопараметрических измерительных преобразователей посредством интегральных моделей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 34, с. 75–80, 2005.
- [12] А. А. Сытник, "Программные средства компьютерного исследования динамики измерительных преобразователей", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 33, с. 37–44, 2006.
- [13] О. О. Sytnyk, "Analytical method of forming integrated dynamic models and their software implementation", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.7, с. 191–196, 2012.
- [14] О. О. Ситник, "Деякі алгоритми розв'язування інтегральних рівнянь Вольтерри I-го роду у задачі відновлення сигналів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 13, с. 139–149, 2016.
- [15] А. А. Сытник, "Идентификация моделей динамических объектов на основе степенных рядов", *Danish scientific journal*, № 3, р. 77–81, 2017.

- [16] A. A. Sytnik, "Algorithms for identifications of stationary transducers", *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, Vol. 3, Issue 7, July, pp. 1922–1925, 2017.
(Входит до баз даних Google Scholar, GetCited, BASE, WorldCat, Scirus, ResearchGate, UR, Research Bible, Cornell University Library).
- [17] А. А. Сытник, "Построение моделей градиентных приемников тепловых потоков", *Scientific discussion*, Т. 1, № 9, с. 30–33, 2017.
- [18] Б. П. Бездетный, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Способ регуляризации слабосингулярных динамических моделей Вольтерра", *Моделювання та інформаційні технології*, Київ, Україна: ІПМЕ НАН України, Вип. 9, с. 34–40, 2001.
- [19] А. А. Верлань, М. В. Сагатов, и А. А. Сытник, "Квадратурные алгоритмы моделирования измерительных преобразователей с распределёнными параметрами", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 6, с.131–136, 2000.
- [20] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Інтегральні рівняння аналізу нестационарних електричних систем", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Електроенергетичні та електромеханічні системи"*, № 637, с. 12–17, 2009.
- [21] А. Ф. Верлань, О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Метод ідентифікації електричних кіл на основі інтегральних динамічних моделей", на *III міжнар. наук.-техн. конф. Моделювання в електротехніці, електроніці і світотехніці*, Київ: ІПМЕ НАН України, 2010, С. 24–26.
- [22] Т. П. Гушель, Б. Б. Абдусатаров, и А. А. Сытник, "Об одном алгоритме реализации интегрального метода решения линейных дифференциальных уравнений", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 13, с. 101–105, 2001.
- [23] К. М. Ключка, О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Особенности використання інтегральних динамічних моделей при розрахунку

- перехідних процесів в електричних колах", на *The International Scientific Association «Science & Genesis» Global scientific unity 2014*, Прага, Чеська Республіка, 2014, с. 167–170.
- [24] Ю. Л. Коротецкий, Д. Э. Контрерас, и А. А. Сытник, "Применение квадратурно-разностных методов для численной реализации интегродифференциальной модели устройства регулирования питания", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 9, с.53–59, 2001.
- [25] Л. А. Митько, А. А. Сытник, В. Ф. Юзвенко, "Квадратурные алгоритмы моделирования процессов деформации упруго-вязких материалов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 6, с. 137–142, 2000.
- [26] С. М. Первунинский, и А. А. Сытник, "Свойства оценок скалярного параметра методом максимизации стационарного степенного функционального полинома", *Вісник Технологічного університету Поділля*, Т.1, №3, с.181–184, 2002.
- [27] В. М. Шарапов, Іван Сарвар (BD), М. П. Мусієнко, О. В. Бикова, Ю. Г. Лега, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний акселерометр", пат. 32821А Україна, МКИ G01P 15/09 / №98052279, заяв. 05.05.98, опубл.15.02.01, Бюл. №1.
- [28] В. М. Шарапов, І. Б. Чудаєва, М. П. Мусієнко, Іван Сарвар (BD), О. В. Бикова, та О. О. Ситник, "П'єзоелектричний датчик тиску", пат. 35762А Україна, МКИ G01L 11/00, 9/08 / №98052281, заяв. 05.05.98, опубл. 16.04.01, Бюл. №3.
- [29] М. В. Раєвський, О. О. Ситник, та В. Б. Кисельов, "Використання лінійних фільтрів Калмана для калібрування акселерометрів за допомогою даних глобальних навігаційних супутникових систем", *Відбір і обробка інформації*, № 35(111), 2011.
- [30] О. О. Ситник, О. А. Дячук, С. Н. Одокієнко, та В. О. Тихоход, "Математичне моделювання і динамічна корекція системи

- вимірювання потоків теплового випромінювання", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки, Спецвипуск*, с.72–75, 2006.
- [31] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов, "Застосування методу квадратур для чисельних розрахунків лінійних диференціальних рівнянь", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2, с. 90–95, 2013.
- [32] О. О. Ситник, Г. О. Кисельова, та В. Б. Кисельов "Універсальний алгоритм розрахунку інтегрального рівняння Вольтерри II роду із застосуванням формул Ньютона-Котеса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 36–42, 2010.
- [33] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Застосування інтегроапроксимаційного алгоритму для аналізу динаміки електричних кіл", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 69–73, 2008.
- [34] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Обґрунтування та перспективи застосування інтегральних рівнянь в задачі моделювання динаміки вимірювальних перетворювачів", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2015. с. 59–60.
- [35] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів застосування інтегральних рівнянь до аналізу лінійних стаціонарних електричних кіл із зосередженими параметрами", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 43, с. 109–118, 2007.
- [36] О. О. Ситник, та К. М. Ключка, "Один з методів отримання нелінійних інтегральних рівнянь Вольтерри на основі топології системи", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Обробка сигналів і негауссовських процесів*, Черкаси, 2009, с. 261–262.

- [37] О. О. Ситник, К. М. Ключка, та С. Ю. Протасов, "Математичне моделювання вимірювальних перетворювачів з використанням інтегральних рівнянь", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2017, с. 137–139.
- [38] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Інтерполяційний метод отримання передатної функції по перехідній характеристиці при формуванні ядер інтегральних макромоделей", на *VI Міжнар. наук.-практ. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2014, с. 149–152.
- [39] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод визначення імпульсної реакції динамічної ланки з періодично змінними параметрами", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 4, 2013, с. 63–66.
- [40] О. О. Ситник, та С. Ю. Протасов, "Метод числової реалізації інтегральних макромоделей динамічних об'єктів із зворотнім зв'язком", на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. присв. пам'яті професора Ю.П. Кунченка Обробка сигналів і негаусівських процесів*, Черкаси, 2013, с. 31–32.
- [41] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Багатокрокові алгоритми розв'язання інтегральних рівнянь у задачі відновлення сигналів", на *VII міжнар. наук. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2016, с. 206–207.
- [42] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Інтегральний метод побудови моделей градієнтних давачів теплових потоків", на *IV міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Київ, 2017, с. 307–308.

- [43] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та К. М. Ключка, "Метод формування інтегральної макромоделі п'єзоелектричного датчика змінного тиску", на *IV міжнар. наук.-практ. конф. Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки*, Чернівці, 2014, с. 100–101.
- [44] О. О. Ситник, С. Ю. Протасов, та В. А. Федорчук, "Інтегральні макромоделі динамічних об'єктів", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Кам'янець-Подільський, Вип.8, с. 98–109, 2013.
- [45] О. О. Ситник, М. В. Раєвський, та Г. О. Кисельова, "Аналіз алгоритмів оптимальної фільтрації за показниками точності при скалярних вимірюваннях", *Відбір і обробка інформації*, № 34(110), с.78–85, 2011.
- [46] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Построение математических моделей технологических процессов для решения задач оптимизации управления", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №3, с. 31–36, 2003.
- [47] А. А. Сытник, А. Ф. Верлань, и Амид Гази, "Регуляризация линеаризованных систем уравнений при идентификации нелинейных объектов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №1, с. 25–27, 2004.
- [48] А. А. Сытник, И. О. Горошко, и А. Б. Руденко, "Алгоритмы линеаризации динамических моделей энергетических объектов", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 22, с. 99–110, 2003.
- [49] А. А. Сытник, Т. П. Гушель, и Амид Гази, "Исследование двухкоординатного тактильного матричного сенсора", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2, с. 34–37, 2003.
- [50] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, "Особенности применения интегральных уравнений в задаче идентификации измерительных

- преобразователей", на *III міжнар. наук.-практ. конф. Обчислювальний інтелект (результат, проблеми, перспективи)*, Київ-Черкаси, 2015, с. 329–330.
- [51] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и Н. Л. Костьян, "Метод идентификации динамического объекта посредством интегральной модели", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т.38, № 2, с. 3–10.2016. (Входит до Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec).
- [52] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Методы и средства моделирования динамических процессов на основе интегральных моделей", *British Journal of Educational and Scientific Studies*, Т. II, № 2(22), с. 108–114, 2015.
- [53] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "О реализации интегральных моделей в задаче динамической коррекции измерительного преобразователя", на *конф. Интегральные уравнения-2009*, Киев, 2009, с. 131–133.
- [54] А. А. Сытник, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Применение интегральных динамических моделей при решении задачи идентификации параметров электрических цепей", *Известия Томского политехнического университета*, Т. 322, № 4, с. 103–106, 2013.
- [55] А. А. Сытник, и А. В. Козак, "Алгоритм формирования дифференциального уравнения измерительного преобразователя", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №3, с. 84–87, 2006.
- [56] А. А. Сытник, А. В. Козак, В. Б. Киселев, и А. А. Киселева, "Определение дифференциального уравнения измерительного преобразователя по импульсной переходной функции", *Моделювання та інформаційні технології*, Вип. 45, с. 16–22, 2008.

- [57] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Интегральная динамическая модель датчика сигналов акустической эмиссии", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 47–49, 2009.
- [58] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Метод реализации процесса диагностирования технических изделий по сигналам акустической эмиссии", на *II міжнар. наук.-техн. конф. Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)*, Черкаси, 2013, с. 433–434.
- [59] А. А. Сытник, и О. А. Наконечная, "Определение временных характеристик сигналов акустической эмиссии", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип.5, с. 185–196, 2011.
- [60] А. А. Сытник, С. Н. Одокиенко, и О. А. Наконечная, "Организация интеллектуальной моделирующей системы", на *міжнар. наук.-метод. конф. Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*, Кам'янець-Подільський, 2006, с. 42–49.
- [61] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Моделирование и оценка параметров сложных технических систем", на *VII міжнар. наук.-практ. конф. Наука і освіта—2004*, 2004, Т. 64, с. 77–79.
- [62] А. А. Сытник, и О. В. Подгорный, "Применение метода интегральных уравнений при решении электротехнических задач", на *міжнар. наук.-практ. конф. Наукові дослідження – теорія та експеримент 2005*, Полтава, 2005, Т. 9, с. 54–58.
- [63] А. А. Сытник, и С. Ю. Протасов, "О динамической точности линейной регистрирующей системы", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 3, с. 74–78, 2008.
- [64] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и К. Н. Ключка, "Приближенные операционные способы анализа линейных динамических систем с

- переменными параметрами", *Известия ЮФУ. Технические науки*, № 1 (138), с. 105–110, 2013.
- [65] А. А. Сытник, С. Ю. Протасов, и В. А. Тихоход, "Применение измерительных преобразователей неселективного действия в многосвязных системах управления", *Электронное моделирование: международный научно-практический журнал*, Т.36, №2, с. 113–119, 2014.
- [66] А. А. Сытник, Н. В. Раевский, К. Н. Ключка, и С. Ю. Протасов, "Сопоставление методов фильтрации в задачах статистической регуляризации при оценивании параметров радиолокационных систем", *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, № 1, с. 10–16, 2013.
- [67] А. А. Сытник, и М. В. Сагатов, "Математическая модель теплового измерительного преобразователя стержневого типа", *Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление»*, № 6, с. 27–29, 2007.
- [68] А. А. Сытник, и В. А. Тихоход "Интерпретация результатов измерения энергетических параметров на основании решения обратных задач математического моделирования", на *международ. конф. Информационные технологии в управлении энергетическими системами*, Киев, 2005, с. 83–84.
- [69] O. A. Diachuk, N. L. Kostyan, A. A. Sytnik, and F. A. Halmuhametova, "The method and algorithms for identification of dynamic objects on basis of integral equations", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 9, с. 52–66, 2014.
- [70] M. V. Sagatov, Sh. M. Guiyamov, and A. A. Sytnyk, "Mathematical modeling the multipleparameter measuring converters and optimization their metrological characteristics", in *6th International Conference CONTROL OF POWER SYSTEMS '04*, Štrbské Pleso High Tatras, Slovak Republic, 2004, pp.1–5.

- [71] A. Sytnik, S. Protasov, and K. Klyuchka, "Development of the method for creating explicit integral dynamic models of measuring transducers", *Східно-Європейський журнал передових технологій*, № 5/4 (89), с.40 – 48, 2017. (Входить до Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI, Sherpa/Romeo).
- [72] A. A. Sytnyk, S. U. Protasov, K. N. Klyuchka, "Methods of receipt of integral form of description of nonstationary measurements transformers with the distributed parameters", in *of the IV International Research and Practice Conference European Science and Technology*, Munich, Germany, 2013, Vol.I, pp. 342–348.
- [73] A. F. Verlan, M. V. Sagatov, A. A. Sytnyk, and A. A. Djachuk, "The method of identification of controlled dynamic objects on the basis of integral models", in *Fourth World Conference Intelligent Systems for industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 28–40.
- [74] A. A. Verlan, B. B. Abdusatarov, M. Sagatov, and A. A. Sytnyk, "Analysis of power circuits' dynamics using generalized state–space model", in *of Fourth World Conference Intelligent Systems for industrial Automation*, Tashkent, Uzbekistan, 2006, pp. 168–176.
- [75] A. Verlan, A. Verlan, and A. Sytnyk, "Simulation of electrical systems for supplying superconducting magnetic energy storage", in *of 3rd International Symposium on Electrical Electronic and Computer Engineering. ISEECE–2006*, Nicosia, TRNC, 2006, pp. 214–220.
- [76] В. А. Грановский, *Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения*. Ленинград, Россия: Энергоатомиздат, 1984.
- [77] Е. Вашны, *Динамика измерительных цепей*, Москва, Россия: Энергия. 1969.
- [78] В. П. Бабак, С. В. Бабак, и В. С. Еременко, *Теоретические основы*

- информационно-измерительных систем*, Киев, Украина, 2014.
- [79] В. И. Губарь, Ю. М. Туз, та Е. Т. Володарский, *Аналого-цифровые измерительные преобразователи переменного тока*. Киев, Украина: Техніка, 1979.
- [80] В. Т. Маликов, В. М. Дубовой, Р. Н. Кветный, и П. Ф. Истатупаев, *Анализ измерительных информационных систем*. Ташкент, Узбекистан: Фан, 1984.
- [81] Б. И. Мокин, и Н. Р. Кондратенко, *Методические указания по применению и программированию алгоритмов Фурье – интегрального метода для восстановления сигнала идентификации систем в задачах УИРС и дипломного проектирования*. Винница, Україна, 1986.
- [82] Е. А. Новиков, *Адекватность численных экспериментов при имитационном моделировании динамических систем средствами ИСМА*, 2005, [Электронный ресурс] Доступно: <http://www.gpss.ru/immod05/s2/novikova/>
- [83] П. П. Орнатский, *Автоматические измерения и приборы: аналоговые и цифровые*, Киев, Украина: Вища шк., 1986.
- [84] В. Д. Павленко, и В. В. Череватый, "Детерминированная идентификация нелинейных объектов в виде модели Вольтерра с учетом погрешностей измерений", на *V Міжнар. наук. конф. ПОЛІТ-2005*, Київ, 2005. с. 89.
- [85] Г. В. Шувалов, В. Г. Селятицкий, В. М. Байкалов, и др., "Разработка рабочих средств измерений", *Измерительная техника*, №8, 2003.
- [86] М. В. Сагатов, и Б. С. Аскарходжаев, "Построение цифровых фильтров для коррекции динамических погрешностей измерительных преобразователей", *Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук*, Вып. 1, с. 64–67, 2003.
- [87] П. М. Таланчук, и В. Т. Рущенко, *Основы теории и проектирования измерительных приборов*, Киев, Украина: Вища школа, 1989.

- [88] П. Н. Цибизов, П. Г. Михайлов, и А. П. Михайлов, "Обратные преобразователи микроэлектронных датчиков", *Датчики и системы*, № 1, с. 48–51, 2006.
- [89] O. Palagin, V. Romanov, K. Markov and other, "Developing of distributed virtual laboratories for smart sensor system design based on multi-dimensional access method", *Classification, forecasting, data mining: International book series "Information Science and Computing. Number 8: Supplement to International Journal "Information Technologies and Knowledge.*, № 3, pp. 155–161, 2009.
- [90] M. Fallahpour, M. Khodabin, and K. Maleknejad, "Approximation solution of two-dimensional linear stochastic Volterra-Fredholm integral equation via two-dimensional Block-pulse functions", *International Journal of Industrial Mathematics*, Vol. 8, № 4, pp. 423–430, 2016.
- [91] Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 5th ed, Springer, 2016.
- [92] Z. Gong, L. Zhang, and X. Zhu, "The statistical convergence for sequences of fuzzy-number-valued functions", *Information Science*, Vol. 295, pp. 182–195, 2015.
- [93] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, та Я. В. Хом'юк, "Умови еквівалентування нелінійних динамічних систем зі степеневиминелійнностями в частотній області", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 5, с. 40–44, 2016.
- [94] П. М. Таланчук, и М. Н. Фомин, "Математические модели первичных измерительных преобразователей для измерения парциальных давлений", *Химическая технология*, № 6, с. 35–39, 1983.
- [95] Г. Ван-Трис, *Синтез оптимальных нелинейных систем управления*, Москва, Россия: Мир, 1964.
- [96] Ю. П. Пытьев, *Математические методы интерпретации эксперимента*, Москва, Россия: Высшая школа, 1989.

- [97] В. М. Дубовой, *Моделювання систем контролю та керування*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2005.
- [98] Б. С. Стогний, *Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения*, Киев, Украина: Наукова думка, 1984.
- [99] Md. Zachurul Haq, *Applied measurement system*, USA: In Tech, 2012.
- [100] Charles M. Close, Dean K. Frederick, and Jonathan C. Newell, *Modeling and analysis of dynamic systems*, 3th ed, Wiley, 2001.
- [101] E. Hering, und G. Schönfelder (Hrsg.), *Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete*, Wiesbaden, Germany: Vieweg, 2012.
- [102] K. Ogata, *System dynamics*, 4th ed., Prentice Hall, 2003.
- [103] Б. И. Мокин, Ю. С. Корбич, "Математические модели контроля и управления в энергетике". Киев, Украина: Тэхніка, 1990.
- [104] В. О. Яцук, та П. С. Малачівський, *Методи підвищення точності вимірювань: підручник*. Львів, Україна: Бескид Біт, 2008.
- [105] Р. Н. Кветный, та О. Р. Бойко, *Інтервальні моделі перетворень сигналів в інформаційно-вимірювальних системах*, Вінниця, Украина: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009.
- [106] М. И. Цема, *Измерение и обработка параметров затухающих сигналов*. Киев, Украина: Наук. думка, 1988.
- [107] R. Kvyetnyy et al., "Improving the quality perception of digital images using modified method of the eye aberration correction", *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2016, DOI: 10.1117/12.2249164 .
- [108] E. Layer, and K. Tomczyk, *Measurements, modelling and simulation of dynamic systems*, Springer, 2009.
- [109] S. Lin, and D. J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and applications*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 2003.

- [110] W. L. Pritchard, and J. A. Sciulli, *Satellite communication system engineering*, Prentice-Hall, N.J., 2006.
- [111] P. Ripka, and A. Tipek, *Modern sensors: handbook*, Chichester: Jon Wiley&Sons, 2010.
- [112] F. J. Sayas, *Retarded potentials and time domain boundary integral equations*, 1 st ed., XV, 2016.
- [113] B. Stackpole, and E. Oksendahl, *Security strategy: from requirements to reality*, Washington, USA, 2010.
- [114] N. Tran Thuana, N. Van Quanga, and P. Tri Nguyen, "Complete convergence for arrays of rowwise independent random variables and fuzzy random variables in convex combination spaces", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 2015, pp. 52–68, 2014.
- [115] C. Viola, *An Introduction to special functions*, Softcover, VIII, 2016.
- [116] Sh. Yonghong, "On the Ulam stability of first order linear fuzzy differential equations under generalized differentiability", *Fuzzy Sets and Systems* (in press), Vol. 280, pp. 27–57, 2015.
- [117] G. Meijer, *Smart sensor system*. Chichester: Jon Wiley&Sons, 2008.
- [118] H. Brunner, and J. P. van der Houwen, *The numerical solution of Volterra equations*. Amsterdam etc.: North–Holland, 1986.
- [119] Г. И. Василенко, *Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике*, Москва, Россия: Сов. радио, 1979.
- [120] А. Ф. Верлань, И. О. Горошко, Е. Ю. Коропов и др., *Методы и алгоритмы восстановления сигналов и изображений*, Киев, Украина: ИПМЭ НАН Украины, 2011.
- [121] В. С. Сизиков, *Обратные прикладные задачи и MatLab*, СПб.: Лань, 2011.
- [122] В. С. Сизиков, *Устойчивые методы обработки результатов измерений*, СПб.: ГИТМО(ТУ), 1999. [Электронный ресурс] URL:

<http://dsp—book.narod.ru/SIZIKOV.pdf>.

- [123] Ю. Т. Костенко, и Л. М. Любчик, *Методы решения обратных задач автоматического управления*, Киев, Украина: УМК ВО, 1988.
- [124] Ю. Т. Костенко, и Л. М. Любчик, *Системы управления с динамическими моделями*, Харьков, Украина: Основа, 1996.
- [125] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації динамічних систем*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [126] Н. Р. Кондратенко, "Математическая модель и алгоритмы тепловизионного контроля кабельных линий", автореф. дис. канд. техн. наук., фак-т информ., Винницкий политехн. ин-т. Винница. 1992.
- [127] В. М. Дубовой, *Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування*, Вінниця Україна: ВНТУ, 2012.
- [128] О. В. Поркуян, "Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна", дис. д-ра техн. наук, 05.13.07, фак-т інформ., Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля, Технол. ін-т, Криворіз. техн. ун-т, Сєверодонецьк, 2008.
- [129] В. А. Стоян, *Моделювання та ідентифікація динаміки систем із розподіленими параметрами*, Київ: Київський ун-т, 2003.
- [130] В. В. Грабко, та М. П. Боцула, *Методи та інформаційно-вимірювальні системи для технічної діагностики силових косинусних конденсаторів*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2003.
- [131] Ю. В. Димов, *Метрология, стандартизация и сертификация*, СПб.: Питер, 2005.
- [132] ДСТУ 2838-94 (ГОСТ 30232-94). *Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом. Загальні технічні вимоги*. Київ, 1995.
- [133] ДСТУ 7223:2011. *Датчики силовимірювальні тензорезисторні*.

- Загальні технічні вимоги та методи випробувань*. Замість ГОСТ 28836-90. Київ, 2011.
- [134] А. Ф. Котюк, *Датчики в современных измерениях*, Москва, Россия: Радио и связь, 2007.
- [135] РТМ 25.144-74, "Измерительные информационные системы для автоматизации и исследования технологических процессов. Нормируемые метрологические характеристики. Методы и средства экспериментального определения".
- [136] РТМ 25.191-75, "Средства измерений и автоматизации ГСП. Определение динамических характеристик".
- [137] РТМ 25.192-75, "Методика контроля динамических характеристик изделий ГСП".
- [138] А. А. Харкевич, *Линейные и нелинейные системы*. Москва: Наука, Т. 2, 1973.
- [139] Steven C. Chapra, *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists*, 4th ed, McGraw-Hill Education, 2017.
- [140] E. Kreyszig, *Advanced engineering mathematics*, 10th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [141] A. Mihai Bica, and C. Popescu, "Fuzzytrapezoidal cubature rule and application to two-dimensional fuzzy Fredholm integral equations", *Soft Computing Methodologies and Applications*, Vol. 14, pp. 1–15, 2015.
- [142] J. Ramsay, and G. Hooker, *Dynamic data analysis*, 1 st ed., XVII, 2017.
- [143] Maurice F. Aburdene, *Computer simulation of dynamic systems*. Dubuque, Ia.: Wm. C.Brown, 1988.
- [144] В. Андруник, та П. Малачівський. "Неперервна апроксимація характеристики термодіодного сенсора та його чутливості сумою полінома й степеневого виразу", *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*, Вип. 12, с. 38-48, 2010.
- [145] В. О. Романов, В. М. Груша, Д. М. Артеменко та ін., "Інтелектуальні

- сенсори: особливості та проблеми проектування", *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*, № 7, с. 146–152, 2008.
- [146] Х. З. Игамбердиев, и А. Н. Юсуфбеков, "Регулярные алгоритмы синтеза приспособляющихся регуляторов в задачах управления динамическими объектами", *Молодой ученый*, № 1, с. 13–16, 2012.
- [147] П. Р. Исмагуллаев, и Р. К. Азимов, *Первичные преобразователи информации*, Ташкент, Узбекистан: ТашПИ, 1986.
- [148] Э. Л. Ицкович, "Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства", *Датчики и системы*, № 2, с. 42–47, 2002.
- [149] С. В. Леньков, "Восстановление скачкообразных процессов по результатам их воздействия на измерительный преобразователи", *Магнитные явления*,. Вып. 2, с. 104–111, 2005.
- [150] В. А. Лужецкий, *Високондійні математичні Фібоначчі-процесори*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000.
- [151] С. М. Мандельштам, "Интеллектуальные измерительные регистраторы", *Приборы и системы управления*, № 2, с. 11–12, 1987.
- [152] Б. Г. Марченко, та Л. М. Щербак, "Сучасна концепція побудови теорії вимірювань", *Доповіді НАН України*, 3 10, с. 85–88, 1999.
- [153] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарский, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [154] В. Н. Романов, *Прогнозирование развития метрологии*, Москва, Россия: Изд-во стандартов, 1989.
- [155] R. S. Saha, and P. K. Sahu, "Numerical methods for solving fredholm integral equations of second kind", *Abstract and Applied Analysis*, 2013. DOI: 10.1155/2013/426916
- [156] С. Г. Рабинович, *Погрешности измерений*, Ленинград, Россия: Энергия, 1978.

- [157] В. Я. Розенберг, *Введение в теорию точности измерительных систем*, Москва, Россия: Советское радио, 1975.
- [158] S. Dahlke, F. de Mari, P. Grohs, and D. Labate, *Harmonic and applied analysis*, 1st ed, XV, 2015.
- [159] N. Gasilova, S. E. Amrahov, and A. G. Fatullayev, "Solution of linear differential equations with fuzzy boundary values", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 257, pp. 169–183, 2014.
- [160] S. Pedersen, *From Calculus to analysis*, XIX, 2015.
- [161] S. M. Sadatrasoul, and R. Ezzati, "Iterative method for numerical solution of two-dimensional nonlinear fuzzy integral equations", *Fuzzy Sets and Systems* (in press), Vol. 280, pp. 91–106, 2015.
- [162] M. D. Chekroun, H. Liu, and S. Wang, *Approximation of stochastic invariant manifolds*, XV, 2015.
- [163] I. Higuera, T. Roldan, and J. Torrens, *Numerical simulation in physics and engineering*, 1st ed., IX, 2016.
- [164] Б. Г. Кадук, І. Д. Пономарьов, В. В. Середата ін., "Спектральний аналіз: класичні поліноми і адаптивні ортогональні базиси", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 101–110, 2000.
- [165] R. Herold, and M. Roberts, *Encyclopedia of information assurance*. Indiana, USA, 2010.
- [166] Д. А. Абдулаев, *Оперативная обработка измерительной информации в автоматизированных системах управления*. Ташкент, Узбекистан: Фан, 1985.
- [167] Б. Б. Абдусаратов, "Об одном алгоритме численного решения интегрального уравнения задачи восстановления сигналов", в *Вычислительные процессы в гибридных ЭВМ и комплексах*. Киев, Украина: АН УзССР. Ин-т электродинамики. 1980, № 251, 12 с. (Препринт)
- [168] Б. Б. Абдусаратов, и М. В. Сагатов, "Некоторые вопросы построения

- специализированных вычислительных устройств для решения обыкновенных дифференциальных уравнений интегральным методом", на *II Республик. научн.-техн. конф. Интегральные уравнения в прикладном моделировании*, ИПМЭ УССР, 1986, с. 5–6.
- [169] Б. Б. Абдусаратов, и М. В. Сагатов, "Об одном подходе к построению специализированных вычислительных устройств для решения обыкновенных дифференциальных уравнений интегральным методом", *Моделирование и разработка технических средств для АСУТП*. Ташкент, Узбекистан: ПашПи, с. 34–50, 1987.
- [170] А. М. Азизов, и А. Н. Горцов, *Точность измерительных преобразователей*. Ленинград, Россия: Энергия, 1975.
- [171] В. А. Боднер, и А. В. Алферов, "Измерительные приборы", *Т. 1: Теория измерительных приборов. Измерительные преобразователи*, Москва, Россия: Изд-во стандартов, 1986.
- [172] Р. Н. Кветний, та А. Я. Кулик, *Методи та засоби передавання інформації у проблемно-орієнтованих розподілених комп'ютерних системах*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [173] А. В. Кириленко, и В. Г. Левитский, *Основы автоматизации процессов расчета электротехнических схем*, Киев, Украина: Наук. думка, 2004.
- [174] В. Ф. Миргород, Д. Э. Контрерас, и А. Б. Волощенко, "Квадратурно-разностные алгоритмы моделирования нелинейных динамических объектов", *Моделирование и информационные технологии*, Вып. 6, с. 152–156, 2000.
- [175] Donald Greenspan, and Vincenzo Casulli, *Numerical analysis for applied mathematics, science and engineering*, Redwood City, CA: Addison–Wesley, 1993.
- [176] Н. В. Мясникова, и В. В. Пащенко, "Алгоритмический подход к созданию измерительных преобразователей повышенной точности", *Датчики и системы*, №2, с. 17–23, 1999.

- [177] Ravi P. Agarwal, Donal O'Regan, and Patricia J. Y. Wong, *Constant-sign solution of systems of integral equations*, XIV, 2013. Doi 10/1007/978-3-319-01255-1
- [178] R. P. Kanwal, *Linear integral equations*, 2 nd ed., XII, 2013.
- [179] R. Kress, *Linear integral equations*, 3 rd ed., XVI, 2014.
- [180] Д. Гроп, *Методы идентификации систем*, Москва, Россия: Мир, 1979.
- [181] Ю. Я. Бобало, Б. А. Мандзій, П. Г. Стахів та ін., *Основи теорії електронних кіл*, Львів, Україна: Видавн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008.
- [182] J. Beetz, *Integralrechnung für Hohen Menschen und andere Anfänger*, XIII, 2014.
- [183] A. Bermudez de Castro, D. Gomez, and P. Salgado, *Mathematical models and numerical simulation in electromagnetism*, Softcover, XVII, 2014. Doi 10.1007/978-3-319-02949-8
- [184] B. Despres, *Numerical methods for eulerian and lagrangian conservation laws*, 1 st ed, XVII, 2017.
- [185] A. L. Madureira, *Numerical methods and analysis of multiscale problems*, Softcover, X, 2017.
- [186] S. Nemati, P. Lima, and Y. Ordokhani, "Numerical solution of a class of two-dimensional nonlinear Volterra integral equations legendre polynomials", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, pp 53–69, 2013.
- [187] Джон Г. Мэтьюз, и Финк Д. Куртис, *Численные методы использование MATLAB*, Москва, Россия: Вильямс, 2001.
- [188] D. R. Kincaid, and E. W. Cheney, *Numerical analysis mathematics of scientific computing*, Pacific Grove, Calif.: Brooks/Cole, 1991.
- [189] В. Вольтера, *Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений*, Москва, Россия: Наука, 1982.

- [190] Г. Е. Пухов, *Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных преобразований*, Киев, Украина: Наукова думка, 1988.
- [191] З. П. Назарчук, та Я. П. Кулинич, "Кубатурна формула для обчислення деякого класу сингулярних інтегралів", *Доповіди НАН України*, № 4, с. 31–35, 2008.
- [192] М. Т. Цапенко, И. Ф. Клисторин, и А. Ф. Алейников, "Датчики. (Функции восприятия входных величин и формирования измерительных сигналов)", *Датчики и системы*, №1, с. 17–18, 1999.
- [193] Р. Н. Кветний, І. В. Богач, О. Р. Бойко та ін., *Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень*, Вінниця: ВНТУ, 2012.
- [194] А. П. Олійник, та О. В. Герман, *Чисельні методи: практикум*, Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2003.
- [195] M. Jomi, and S. Karimi, "A weighted singular value decomposition for the discrete inverse problems", *Numer Linear Algebra Appl*, 2017.
DOI: 10.1002/nla.2114
- [196] P. V. O'Neil, *Advanced engineering mathematics*, 3rd ed., Belmont, Calif: Wadsworth Pub. Co, 1991.
- [197] J. T. Sandefur, *Discrete dynamical systems: theory and applications*, New York: Oxford University Press, 1990.
- [198] В. И. Морозов, "Динамические свойства датчика быстрых угловых перемещений источника излучения", *Датчики и системы*, №3, с. 18–21, 2001.
- [199] М. И. Потеев, и В. С. Сизиков, *Повышение разрешающей способности измерительных устройств путем компьютерной обработки результатов измерений*, СПб: ИТМО, 1992.
- [200] В. А. Федорчук, и О. А. Дячук, "Еквівалентування математичних моделей динамічних систем", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 2, с. 155–164, 2009.

- [201] А. С. Апарцин, "О повышении точности моделирования нелинейных динамических систем полиномами Вольтерра", *Электронное моделирование*, т. 19, № 6, с. 3–12, 2001.
- [202] І. М. Гураль, та А. П. Олійник, *Конспект лекцій з вищої математики. Інтегральне числення функцій однієї змінної*, Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2001.
- [203] Н. А. Максимович, и М. В. Сагатов "Алгоритм идентификации линейных стационарных объектов с распределенными параметрами по их экспериментальным переходным характеристикам", *Вестник ТаиГТУ*, №1, с. 43–47, 2003.
- [204] Я. М. Матвійчук, *Математичне макромодельювання динамічних систем: теорія і практика*, Львів, Україна: Видавн. центр ЛНУ ім. І.Франка, 2000.
- [205] В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Г. Г. Ишанин и др., *Датчики*, Черкассы, Украина: Брама–Украина, 2008.
- [206] Дж. Фрайден, *Современные датчики*, Москва, Россия: Техносфера, 2006.
- [207] В. А. Іванюк, О. О. Ситник та Ю Стертен, "Дослідження еквівалентних форм представлення динамічних моделей вимірювальних перетворювачів методом обчислювальних експериментів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 27–34, 2018. (Входить до бази даних Index Copernicus).
- [208] Є. Т. Володарский, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, та Г. В. Сердюк *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*, Вінниця, Україна: ВДТУ, 2001.
- [209] R. Kvyetnyu, *Basics of modeling and computational methods*. Vinnitsa: VNTU, 2007.
- [210] П. Эйкхофф, *Основы идентификации систем управления*, Москва, Россия: Мир, 1975.

- [211] Z. Belkhamza, and A. Wafa, *Measuring organizational information system success: new technologies and practices*, Malaysia: Universiti Malaysia Sabah, 2012.
- [212] В. В. Васильев, и Л. А. Симак, *Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем*. Киев, Украина: ИПМЭ НАН Украины, 2008.
- [213] А. Ф. Верлань, и А. А. Максимович, "Применение метода обратных операторов для компьютерного восстановления сигналов инерционного измерительного прибора", *Электронное моделирование*, №4, с. 14–27, 2001.
- [214] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, та Л. В. Грумінська *Метрологія та вимірювальна техніка*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
- [215] П. Д. Лежнюк, *Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом*, Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2003.
- [216] Р. К. Азимов, П. Р. Исматуллаев, и П. А. Коротков, *Теплообменные измерительные преобразователи*. Ташкент, Узбекистан, 1974.
- [217] В. П. Майданюк, та А. М. Петух, *Обробка сигналів*, Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [218] К. А. Городжа, М. В. Мислович, та Р. М. Сисак, "Моделювання відгуків електротехнічного обладнання на ударний вплив та використання його результатів при створенні автоматизованих систем діагностики", *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, №654, с.63–70, 2009.
- [219] В. Я. Распопов, и С. А. Зотов, "Особенности динамики чувствительного элемента микромеханического акселерометра на вибрирующем основании", *Датчики и системы*, № 8, 2002.
- [220] Н. Д. Дубовой, *Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи*, Москва, Россия: Радио и связь,

- 1989.
- [221] С. Н. Одокиенко, "Особенности методов решения интегральных уравнений Вольтерра I рода", *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, Вип. 1, с. 130–139, 2008.
- [222] Тен Мен Ян, "Линейные многошаговые методы для численного решения Вольтерра I рода", *Методы оптимизации и исследование операций*, Иркутск, Россия: СЭМ СО АН СССР, 1984, с. 254–257.
- [223] C. Andrade, F. M. Bertoldi, and S. Mckee, "Convergence of linear multistep method for Volterra first kind equations with $k(t,t)=0$ ", *Computing*, Vol. 27, № 3, pp. 189–201, 1981.
- [224] В. И. Заляпин, Ю. С. Попенко, и Е. В. Харитоновна, "Оценка погрешности численного метода решения одной обратной задачи", *Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия «Математическое моделирование и программирование»*, № 3, с.51–58, 2013.
- [225] В. С. Ситников, та Г. А. Грицкевич, "Алгоритм кусочно-линейной аппроксимации характеристик цифрового фильтра", на *XII междунар. науч.-практ. конф. Современные и информационные технологии*, Одесса, 2011, с. 121.
- [226] Р. Г. Джексон, *Новейшие датчики*, МоскваРоссия: Техносфера, 2007.
- [227] С. В. Ленков, "Восстановление сигналов при ударных испытаниях", *Датчики и системы*, № 3, с. 6–9, 2006.
- [228] A. Wikan, *Discrete dynamical systems with an introduction to discrete optimization problems*, Norway, 2013.
- [229] Е. Е. Володарский, Б. Н. Малиновский, та Ю. М. Туз, *Планирование и организация измерительного эксперимента*, Киев, Украина: Вища школа, 1987.
- [230] А. Ф. Алейников, В. А. Гридич, та М. П. Цапенко, *Датчики (перспективні напрямки розвитку)*. Новосибірськ, Росія: НТДУ, 2001.

- [231] В. В. Васильев, А. В. Васильев, и Л. А. Симак, "Аппроксимационное решение интегральных уравнений Фредгольма и Вольтерра второго рода методом S-преобразований". *Електроніка та системи управління*. № 3, с. 123–129, 2010.
- [232] Г. М. Кондратьев, *Тепловые измерения*, Ленинград, Россия: Машгиз, 1957.
- [233] А. Ф. Алейников, и М. П. Цапенко, "О классификации датчиков", *Датчики и системы*, №5, с. 37-46, 2000.
- [234] М. П. Цапенко, *Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование*, Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1985.