

## АНОТАЦІЯ

*Федорова Г.М.* Метод та засоби інформаційної технології ідентифікації непараметричних динамічних моделей око-рухового апарату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення. – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі, що полягає у створенні методу ідентифікації непараметричних динамічних моделей око-рухового апарату (ОРА) людини та його реалізації у вигляді інформаційної технології моделювання як складової частини інформаційної системи.

Актуальність теми дисертаційного дослідження обумовлено існуючим протиріччям між підвищенням вимог щодо точності моделей опису ОРА, з одного боку, та підвищенням швидкодії процедури ідентифікації — з іншого боку. Це протиріччя розв'язано шляхом застосування методу непараметричної динамічної ідентифікації моделей ОРА у вигляді інтегростепеневих рядів Вольтерри з використанням багатовимірних вагових функцій (БВФ) та багатовимірних перехідних функцій (БПФ), що дозволяє одночасно врахувати нелінійні та динамічні властивості ОРА, а також зменшити обсяг обчислень при реалізації відповідних моделей ОРА.

**Метою роботи** є підвищення точності та швидкості при реалізації непараметричних динамічних моделей око-рухового апарату у вигляді інтегростепеневих рядів Вольтерри шляхом розробки ефективного методу ідентифікації цих моделей та реалізації запропонованого методу як інформаційної технології моделювання, що є складовою частиною інформаційної системи.

Для досягнення мети дослідження поставлено і розв'язано такі **задачі**:

– здійснити аналіз існуючих методів ідентифікації неперервних нелінійних динамічних об’єктів і обґрунтувати вибір напрямку досліджень щодо побудови інтегральних непараметричних динамічних моделей на основі БВФ та БПФ для опису ОРА людини;

– здійснити аналіз сучасного стану методів редукції інформаційних моделей і обґрунтувати вибір напрямку досліджень щодо зниження розмірності моделей на основі кореляційних методів фільтрації;

– розробити метод непараметричної ідентифікації ОРА на основі БПФ за результатами даних активного експерименту «вхід-вихід» з використанням тестових поліімпульсних і багатоступінчастих сигналів із забезпеченням прийнятної точності моделей;

– розробити інформаційну технологію ідентифікації нелінійних динамічних об’єктів, що ґрунтується на описі ОРА на основі непараметричних динамічних моделей у вигляді БВФ та БПФ, редукції збудованих моделей на основі кореляційних методів фільтрації;

– застосувати розроблений метод та засоби інформаційної технології ідентифікації неперервних нелінійних об’єктів для побудови непараметричних динамічних моделей ОРА.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному.

– *Вперше запропоновано* непараметричну модель ОРА людини у вигляді переходної та двовимірної перехідної функції, побудованих за даними експерименту «вхід–вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, яка, на відміну від відомих моделей, одночасно враховує нелінійні та інерційні властивості ОРА, що дозволяє підвищити точність моделювання.

– *Отримав подальший розвиток* метод побудови непараметричних динамічних моделей ОРА у вигляді переходної та двовимірної перехідної функцій на основі даних експериментів «вхід–вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, відмінність якого від відомих полягає у виділенні парціальних складових з відгуків та визначенні на їх основі БПФ. Це дозволяє зменшити обсяг обчислень та підвищити швидкодію моделювання.

– Отримав подальший розвиток метод стискання моделей запропонованих моделей ОРА, представлених як нелінійні інерційні об'єкти, на основі кореляційної фільтрації відліків під діагональних перетинів БВФ та БПФ для стиснення простору ознак, що, на відміну від використання рівновіддалених відліків піддіагональних перетинів, дозволяє враховувати інформацію, зосереджену на окремих ділянках моделей в області визначення, яка спостерігається. Це дозволяє будувати моделі, які забезпечують більшу точність за рахунок найбільш повного використання інформації первинного опису об'єктів.

– Удосконалено метод детермінованої ідентифікації ОРА у вигляді непараметричних динамічних моделей, який відрізняється застосуванням вейвлет-фільтрації для згладжування експериментальних даних і оцінок БПФ, що підвищує точність і забезпечує гладкість результатів ідентифікації.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає у створенні інструментальних засобів інформаційної технології ідентифікації моделей ОРА при представленні цих моделей як непараметричні динамічні об'єкти, причому створені інструментальні засоби (ІЗ) реалізують обчислювальні алгоритми детермінованої ідентифікації ОРА у вигляді БВФ та БПФ щодо попередньої обробки експериментальної інформаціїї редукції моделей, а також у впровадженні створених ІЗ у наукові дослідження і навчальний процес.

На основі зазначених ІЗ виготовлено експериментальний стенд для випробувань та розроблено ефективні програмні модулі, які інтегровано з «хмарними» сервісами для вирішення ресурсномістких задач моделювання, що забезпечує високу обчислювальну потужність та швидкість пошуку розв'язків в задачах ідентифікації.

З використанням цих ІЗ побудовано прикладну інформаційну систему ідентифікації ОРА людини за допомогою відеореєстрації, що дозволяє будувати нелінійні інерційні моделі за експериментальними даними спостережень «вхід-вихід» з наперед заданою точністю.

За допомогою розробленої інформаційної системи ідентифікації отримано непараметричну динамічну модель ОРА людини з урахуванням його (ОРА) нелінійних та динамічних властивостей у вигляді перехідної і двовимірної перехідної функцій. Отримані результати ідентифікації ОРА можуть використовуватися в діагностичних дослідженнях при встановленні стадій захворювання, а також при апаратній корекції зору, в людино-машинних системах при професійному відборі операторів швидкоплинних технологічних процесів.

Результати роботи отримали впровадження у навчальний процес ОНПУ, зокрема, при викладанні дисциплін «Моделювання процесів і систем», «Розпізнавання і класифікація в управлінні» на кафедрі комп'ютеризованих систем управління; а також використовуються при розробці тем магістерських дипломних робіт і в дисертаційних дослідженнях аспірантів.

Об'єкт досліджень – процес ідентифікації неперервних нелінійних динамічних біомедичних об'єктів.

Предмет досліджень – моделі, метод та інформаційна технологія ідентифікації непараметричних динамічних моделей ОРА людини.

**Ключові слова:** нелінійні інерційні об'єкти, око-руховий апарат, непараметричні динамічні моделі, багатовимірні вагові та перехідні функції, ідентифікація, редукція моделей, інформаційні технології.

### Список публікацій здобувача

Основні результати дисертаційної роботи викладено в 13 публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук (у тому числі 1 робота у журналі з міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 статті у зарубіжних наукових періодичних виданнях з напрямку, з якого підготовлено дисертацію, 6 публікацій у працях і матеріалах наукових конференцій.

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. Ruban O., Fedorova H. Model-based information technology of continuous objects diagnostics in the conditions of their description dimension growth // Modern

engineering and innovative technologies. – №12. Part 3. Technical Science, 2020. – P. 141–145. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus International.*

<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit12-03>

2. Fomin, O., Ruban, O., Fedorova, H. Construction of the nonlinear dynamic objects diagnostic model based on of multiple factors variance analysis // Herald of Advanced Information Technology. – 2020. – Vol.3, No.2. – P. 52–61. DOI: 10.15276/hait 02.2020.5. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus International.*

<https://hait.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=6>

3. Ruban O., Fedorova H., Fomin O. Correlation based construction of the nonlinear dynamic objects diagnostic model // Colloquium-journal. – №13 (65). Part 1. Technical Science, 2020. – P. 23–25. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus International.*

<http://www.colloquium-journal.org/1365-2>

4. Fomin, O., Pavlenko, V., Ruban, O. Construction of the diagnostic model based on combining spectral characteristics of nonlinear dynamic objects // Applied Aspects of Information Technology. – 2020. – Vol.3, No.1. – P. 431–442. DOI: 10.15276/aait.01.2020.5. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus International.*

<https://aait.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=6>

5. Pavlenko V. D., Fomin O. O., Fedorova A. N., Dombrovskiy M. M. Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика і моделювання. – 2016. – №21 (1193). – P. 74 – 85. DOI: 10.20998/2411-0558.2016.21.08. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: ISSN, Index Copernicus International, Open Academic Journals Index.*

<http://pim.khpi.edu.ua/article/view/2411-0558.2016.21.08>

6. Фомин А. А., Масри М. М., Павленко В. Д., Фёдорова А. Н. Метод и информационная технология построения непараметрической динамической

моделі глазо-двигательного апарата // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Том 4, вып. 2/9 (74). – С. 64 – 69. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.41448. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Index Copernicus International, ResearchBib, CiteFactor, Directory of Open Access Journals, Directory of Research Journals Indexing.

<http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/2431>

7. Фомин А. А., Павленко В. Д., Фёдорова А. Н. Метод построения многомерной модели Вольтерра глазо-двигательного апарата // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2015. – №19 (95). – С. 296 – 302. DOI: 10.15276/eltecs.19.95.2015.65. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Index Copernicus International, Electronic Journals Library.

<https://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=21>

*Опубліковані праці апробаційного характеру*

8. Ruban O., Fedorova H., Fomin O. Information technology for feature selection using spectral characteristics of nonlinear dynamic objects // The 10 d International scientific and practical conference “Modern approaches to the introduction of science into practice” (March 30-31, 2020). – P. 267 – 270.

9. Рубан О.Д., Федорова Г.М., Кузін І.О., Фомін О.О. Підвищення оперативності побудови діагностичних моделей великих розмірностей в системах технічної діагностики // VII Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Технології» ІКТ–2019. – С.

10. Рубан А. Д., Федорова Г. М., Фомин А. А. Определение положения зрачка при помощи сверточной нейронной сети // Восьма Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології 2018». – Одеса. – 2018. – С. 112 – 113.

11. Фёдорова А. Н., Павленко В. Д., Фомин А. А. Построение непараметрической модели движения глаза на основе данных отслеживания поведения зрачка // Третя українсько-німецька конференція «Інформатика. Культура. Техніка». – Одеса. – 2015. – С. 51 – 52.

12. Федорова А. Н., Фомин А. А., Павленко В. Д. Технология отслеживания поведения зрачка при помощи видео регистрации // П'ята міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології (МІТ-2015)». – Одеса. – 2015. – С. 95 – 96.

13. Федорова А. Н., Павленко В. Д., Фомин А. А. Моделирование глазодвигательного аппарата в задачах медицинской диагностики // Четверта міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології (МІТ-2014)». – Одеса. – 2014. – С. 64 – 65.

## ABSTRACT

*Fedorova H.M.* Method and tools of information technology for nonparametric dynamic models identification of the oculomotor apparatus.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 121 Software Engineering. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The thesis is devoted to actual scientific and technical problem of mathematical software development methods and information technology nonparametric identification of dynamic models of oculomotor apparatus (OA) rights.

Subject study is due to the contradiction between the increasing requirements for accuracy of models describing the OA, on the one hand, and increasing speed identification procedure on the other side. This contradiction is resolved using information technology for the identification of nonparametric dynamic models in form of Volterra integro-power series using multidimensional weighting function (MWF) and multidimensional transition functions (MTF) that can simultaneously take into account nonlinear and dynamic properties of the OA and reduce the amount of computing.

**The purpose of the study** is to improve the accuracy and speed of constructing mathematical models of oculomotor system as integro-power Volterra series through

the development of effective methods and tools of information technology nonparametric identification of dynamic objects.

To achieve the purpose of the study raised and solved the following **problems**:

- analyzing the existing methods of identification of continuous nonlinear dynamic objects and justify the choice of research direction to build integrated nonparametric dynamic models based on MWF and MTF to describe human OA;

- analyzing the current state of reduction techniques and information models to justify the choice of research direction to reduce the the dimensionality of models based on correlation filtering methods;

- developing the method of nonparametric identification OA with MTF based on the results of these active experiment "input-output" using test polypulse and multistage signals to ensure acceptable accuracy of the models;

- developing the information technology for identification of nonlinear dynamic objects, based on the OA description on the basis of nonparametric dynamic models in the form of MWF and MTF, reduction of constructed models based on correlation filtering methods;

- applying the developed method and means of information technology of identification of continuous nonlinear objects for construction of nonparametric dynamic OA models.

**The scientific novelty** of the results is asfollows.

- *For the first time proposed* the nonparametric model of human ORA in the form of transient and two-dimensional transient function, built on the data of the "input-output" experiment using test multistage signals, which unlike the known models simultaneously takes into account nonlinear and inertial properties of OA, which improves modeling accuracy.

- *Further developed* the method for constructing nonparametric dynamic models OA as a transient and two-dimensional transition functions based experiments "input-output" using test multistage signals the difference of which from famous is to allocate partial components of the review and determination on the basis MTF. This allows you to reduce the amount of computation and increase the speed of modeling.

– *Further developed* the method of compression of models of nonlinear inertial object based on of correlation filtering of samples of subdiagonal sections of MWF and MTF for compression space of signs that unlike use of equidistant samples of subdiagonal sections allows to consider the information concentrated on separate sites of area. This allows you to build models that provide greater accuracy through the full range of primary information describing objects.

– *The method* of deterministic OA identification in the form of nonparametric dynamic model *has been improved*, which differs in the use of wavelet filtering for smoothing experimental data and MTF estimates, which increases the accuracy and ensures the smoothness of identification results.

**The practical significance** of the obtained results lies in the creation tools of information technology for the identification of nonparametric dynamic objects that implement computational algorithms for deterministic OA identification in the form of MWF and MTF, pre-processing of experimental information and model reduction, and their implementation in research and teaching.

Based on this information technology, an experimental test bench was built and effective tools were developed, which are integrated with cloud services to solve resource-intensive modeling problems, which provides high computing power and speed of finding solutions to identification problems.

Using these tools built application identification information system of human OA with video recording, allowing you to build non-linear inertial model from experimental observations "input-output" specified accuracy.

With developed information received nonparametric identification system OA dynamic model person considering its nonlinear and dynamic properties in a two-dimensional transition and transition functions. The results identify the OA may be used in diagnostic studies in determining the stage of disease, as well as hardware correcting vision, human-machine systems for professional selection of operators of fast processes.

The results embodied in the educational process ONPU: discipline "Modeling of processes and systems", "Recognition and Classification Management" at the

Department of computerized control systems; are used in the development of topics of master's theses and in dissertation research of graduate students.

The object of research is the process of identification of continuous nonlinear dynamic biomedical objects.

Subject of research – models, methods and information technology for identification of nonparametric dynamic OA models.

**Keywords:** nonlinear inertial objects, oculomotor apparatus, nonparametric dynamic models, multidimensional weight and transition functions, identification, reduction of models, information technologies.

### **List of publications**

The main results of the dissertation are presented in 13 publications, including: 5 articles in scientific professional publications of Ukraine in technical sciences (including 1 work in the journal of the international scientometric database Scopus), 2 articles in foreign scientific periodicals in the field from which prepared dissertation, 6 publications in papers and materials of scientific conferences.

*Publications where the main scientific results of the dissertation are published*

1. Ruban O., Fedorova H. Model-based information technology of continuous objects diagnostics in the conditions of their description dimension growth // Modern engineering and innovative technologies. – №12. Part 3. Technical Science, 2020. – P. 141–145. *The publication is included in the international scientometric base: Index Copernicus International.*

*<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit12-03>*

2. Fomin, O., Ruban, O., Fedorova, H. Construction of the nonlinear dynamic objects diagnostic model based on of multiple factors variance analysis // Herald of Advanced Information Technology. – 2020. – Vol.3, No.2. – P. 52–61. *DOI: 10.15276/hait 02.2020.5. The publication is included in the international scientometric base: Index Copernicus International.*

*<https://hait.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=6>*

3. Ruban O., Fedorova H., Fomin O. Correlation based construction of the nonlinear dynamic objects diagnostic model // *Colloquium-journal*. – №13 (65). Part 1. Technical Science, 2020. – P. 23–25. *The publication is included in the international scientometric base: Index Copernicus International.*

<http://www.colloquium-journal.org/1365-2>

4. Fomin, O., Pavlenko, V., Ruban, O. Construction of the diagnostic model based on combining spectral characteristics of nonlinear dynamic objects // *Applied Aspects of Information Technology*. – 2020. – Vol.3, No.1. – P. 431–442. DOI: 10.15276/aait.01.2020.5. *The publication is included in the international scientometric base: Index Copernicus International.*

<https://aait.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=6>

5. Pavlenko V. D., Fomin O. O., Fedorova A. N., Dombrovskiy M. M. Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model // *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «XPI»*. Seriya: Informatyka i modelyuvannya. – 2016. – №21 (1193). – P. 74 – 85. *The publication is included in the international scientometric bases: ISSN, Index Copernicus International, Open Academic Journals Index.*

<http://pim.khpi.edu.ua/article/view/2411-0558.2016.21.08>

6. Fomin A. A., Masri M. M., Pavlenko V. D., Fedorova A. N. Metod i informatsionnaya tehnologiya postroeniya neparametricheskoy dinamicheskoy modeli glazo-dvigatel'nogo apparata // *Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy*. – 2015. – Tom 4, vyip. 2/9 (74). – P. 64 – 69. *The publication is included in the international scientometric bases: Scopus, Index Copernicus International, ResearchBib, CiteFactor, Directory of Open Access Journals, Directory of Research Journals Indexing.*

<http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/2431>

7. Fomin A. A., Pavlenko V. D., Fedorova A. N. Metod postroeniya mnogomernoy modeli Volterra glazo-dvigatel'nogo apparata // *Elektrotehnicni ta komp'yuterni sistemi*. – 2015. – №19 (95). – P. 296 – 302. *The publication is included*

*in the international scientometric bases: Index Copernicus International, Electronic Journals Library.*

*<https://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=book&id=21>*

*Published work of approbatory character*

8. Ruban O., Fedorova H., Fomin O. Information technology for feature selection using spectral characteristics of nonlinear dynamic objects // The 10 International scientific and practical conference “Modern approaches to the introduction of science into practice” (March 30-31, 2020). – P. 267 – 270.

9. Ruban O.D., Fedorova H.M., Kuzin I.O., Fomin O.O. Pidvyshhennya operatyvnosti pobudovy diahnostychnyx modelej velykyx rozmirnostej v systemax texnichnoyi diahnostyky // VII International scientific and practical conference «Informatics. Culture. Technology» ICT–2019. – P. 63 – 64.

10. Ruban O.D., Fedorova H.M., Fomin O.O. Opredelenye polozhenyya zrachka pry pomoshhy svertochnoj nejronnoj sety // Eighth International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Modern Information Technologies 2018» – Odessa. 2018. – P. 112 – 113.

11. Fedorova H.M., Pavlenko V. D., Fomin O.O. Postroenie neparametricheskoy modeli dvizheniya glaza na osnove dannyih otslezhivaniya povedeniya zrachka // The third Ukrainian-German conference «Informatics. Culture. Machinery». – Odesa. – 2015. – P. 51 – 52.

12. Fedorova H.M., Fomin O.O., Pavlenko V. D. Tehnologiya otslezhivaniya povedeniya zrachka pri pomoschi video registratsii // Fifth International Conference of Students and Young Scientists «Modern Information Technologies (MIT-2015)». – Odesa. – 2015. – P. 95 – 96.

13. Fedorova H.M., Pavlenko V. D., Fomin O.O. Modelirovanie glazodvigatel'nogo aparata v zadachah meditsinskoj diagnostiki // Fourth International Conference of Students and Young Scientists «Modern Information Technologies (MIT-2014)». – Odesa.– 2014. – P. 64 – 65.