

## АНОТАЦІЯ

Берчун Я.О. Математичне моделювання та експериментальні дослідження протяжних систем. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 113 «Прикладна математика». — Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ — 2020.

**Зміст дисертації.** У вступі обґрунтовано актуальність теми, вказано на її зв'язок з актуальним напрямом науково-технічної політики України, сформульовані мета та задачі досліджень, розкрито наукову новизну і практичну цінність роботи, представлено її загальну характеристику.

У розділі 1 розглянуто протяжні системи як об'єкт математичного моделювання. Приведено різні приклади широкого застосування протяжних систем у космосі, повітряному, водному та ґрунтовому середовищах. Проаналізовано роботи вітчизняних та закордонних вчених: Трофимчука О.М., Васяніна В.О., Власюка А.П., Королюка Д.В., Мокіна В.Б., Стефанишина Д.В., Дейнеки В.С., Ляшка І.І., Сергієнка І.В., Скопечького В.В., Жуковского В.В., Крилова А.М., Тимошенко С.П., Динніка А.М., Ішлінського А.Ю., Писаренко Г.С., Кільчевського М.А., Федорова М.М., Савіна Г.Н., Селезова І.Т., Горошко О.О., Каюка Я.Ф., Гузя О.М., Нестерова А.П., Флоринського Ф.В., Светлицького В.А., Салтанова М.В., Горбаня В.О., Ордановича О.Є., Калікова В.М., Гуляєва В.І., Гайдачука В.В., Кошкіна В.Л., Баженова В.О., Лізунова П.П., Попова Е.П., Ілюхіна О.А., Кубенко В.Д., Бойка В.В., Герсенванова М.М., Гольдштейна М.М., Гінзбурга Л.К., Кільвандера Є.Я., Маслова М.М., Полевецького В.В., Сільченка К.В., Шахунянца Г.М., Черног Г.І., Глуховського В.П., Яраса В.І., Улицького В.М., Джонса Р., Фекеоару І., Лещинського М.Ю., Єрмошкіна П.М., Красильнікова В.А., Ногіна С.І., Сафарова В.А., Судакова В.В., Почтовіка Г.Я., Бамбури А.М., Городжі А.Д., Мар'єнкова М.Г., Немчинова Ю.І., Довженко О.О., Калюха Ю.І., Савицького О.А., Седіна В.Л., Ablow С.М., Berto О.О., Calkins В.Е., Casarella М.І., Chapman В.А., Griffin О.М., Hegemier С., Iwers

W.B., Marichal D., Nair S., Paidoussis M.P., Triantaffullou N.S., Wingham B.S., Carino, N.J., Sansalone M., Hsu N.N., Lin J.- M., Streett W., Liao S. T., Roesset J.M., Chen C.H., Yu C.P., Ambrosini D., Ezeberry J., Kim D.S., Kim H.W., Kim W.C., Seo W.S., Choi K.C., Wooa S.K. та ін., в яких викладені різні аспекти чисельного та експериментального аналізу напружено-деформованого стану протяжних систем та їх елементів в різних середовищах та в різних умовах використання.

Узагальнено сучасний стан питання та зазначено основні передумови дослідження багатомодових моделей протяжних систем. Врахування обмежень швидкості поширення мод в системі дозволило певним чином сконструювати і збільшити швидкість чисельних алгоритмів обчислення протяжних систем на основі розпаралелювання по хвилях і хвильових швидкостях. На підставі проведеного огляду зроблено висновки і поставлено задачі досліджень.

В розділі 2 розроблена 3D шестихвильова модель протяжної системи у полі масових та поверхневих сил у ґрунті, що описує хвилі чотирьох типів: поздовжню, крутильну, конфігураційні (або поперечні; дві) та згинальні (дві). У сукупності з певними крайовими і початковими умовами модель може застосовуватися для різних завдань, зокрема для технічної діагностики протизсувних споруд, оцінки їх цілісності та уточнення несучої здатності. Вивчено особливості застосування методу скінченних різниць для вирішення нелінійних динамічних задач з визначення нестационарного 3D напружено-деформованого стану протяжних систем і залізобетонних паль у ґрунті. Удосконалено метод моделювання напружено-деформованого стану протяжних систем шляхом розпаралелювання чисельного алгоритму за типами хвиль і хвильовими швидкостями. Показано, що за рахунок розпаралелювання при обчисленнях поздовжніх і поперечних хвиль можна домогтися подальшого збільшення швидкості обчислень (більш ніж у 10 разів) у порівнянні з алгоритмом хвильової факторизації і до 100 ~ 1000 разів у порівнянні з первісним алгоритмом, не скорочуючи при цьому діапазон «стійкого рахунку». Проведена порівняльна оцінка точності трьох перерахованих чисельних алгоритмів. Найкраща монотонізація чисельного рішення отримана при використанні методу

розпаралелювання. Виведено трьохмодову модель нелінійної динаміки поздовжньої деформованої протяжної системи як окремий випадок загальної моделі і проведено її тестування. Вона враховує поздовжні і конфігураційні (дві) хвилі в напрямку нормалі і бінормалі, а також крутильні хвилі. Проведено тестування моделі на прикладі ініціювання крутильних хвиль за рахунок поздовжніх та конфігураційних.

У **розділі 3** чисельно проаналізовані нелінійні крайові задачі статичної і динамічної протяжних систем. Розглянуті питання застосування методу скінченних різниць для моделювання хвильових процесів в палях, пов'язаних з діагностикою їх технічного стану (цілісності стовбура палі, що безпосередньо впливає на несучу здатність палі та ін.). Протестована модель зсуво-згинальних хвиль в залізобетонних палях для діагностики їх технічного стану. Наведено розрахунки бездефектної палі та палі з дефектами. В результаті порівняльного аналізу результатів розрахунків двох палей можна виявити багато відмінностей (не тільки за масштабом, а і за формою). Це служить запорукою коректної ідентифікації дефектів різного типу в залізобетонних палях при наявності відповідної бази математичних розрахунків та експериментальних даних. Спектри ж, отримані за допомогою однохвильових моделей попередніх дослідників Sansalone M., Streett W., Liao S.T., Ambrosini D., Kim H.W., практично не відрізнялися між собою. Побудована графічна модель і проведені розрахунки для залізничної протизсувної споруди на базі методу скінченних елементів в програмному комплексі LIRA 9.6. Крайові умови одночасно моделюють динамічний вплив від руху потягів та від підвищеної сейсмічної активності досліджуваного регіону (згідно з картою сейсмічного районування території України частина Чернівецької обл. належить до регіонів з підвищеним рівнем сейсмічної активності). На основі математичного моделювання напружено-деформованого стану отримана власна частота коливань протизсувної споруди - 9,46 Гц.

У **розділі 4** у розвиток комплексу стандартів для систем технічного діагностування будівельних конструкцій розроблено новий документ

«Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд: ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016». Цей документ увібрав у себе всі основні методичні вказівки та розробки з науково-методологічного обґрунтування, проектування та експериментального відпрацювання моніторингових систем в будівництві. Документ розроблений в гармонійній відповідності до документів fib. На його підставі проведено моніторинг вібрації несучих конструкцій житлового будинку за адресою вул. Пимоненка, 14 в м. Києві при виконанні буронабивних залізобетонних паль  $\varnothing 820$  мм. Зареєстровані рівні віброприскорень на рівні перекриття на 9 поверсі будівлі в вертикальному та горизонтальному напрямках не перевищували  $0,004 \text{ м/с}^2$ , що менше допустимих значень віброприскорень для висотних будівель ( $0,08 \text{ м/с}^2$ ). Проведено динамічні обстеження протизсувної споруди на перегоні Завалля-Неполоківці при дії мікросейсмічних коливань та під час руху залізничних потягів. Представлено графік горизонтальних віброприскорень в напрямку X (перпендикулярному до залізничної колії) при русі пасажирського потягу, що знаходяться в діапазоні  $0,21 - 0,42 \text{ м/с}^2$  на кінцевих ділянках ПЗС та  $0,63 \text{ м/с}^2$  – на її середній ділянці. Діапазон переважаючих частот при русі потягу для крайніх та середньої ділянок близький – в діапазоні  $0,3 - 25,0$  Гц. Це свідчить про те, що підпірна стінка в середній частині на час проведення віброметричних досліджень має зменшений показник жорсткості в горизонтальному напрямку. Це може бути спричинено як конструктивними особливостями протизсувної споруди, так і внутрішніми дефектами, що накопичились за час експлуатації стінки. Слід зазначити, що експериментально зареєстрована максимальна амплітуда поперечних коливань виникає при частоті  $8$  Гц. Різниця з розрахунковою частотою коливань становить  $1,46$  Гц, що відповідає відхиленню  $\sim 18 \%$  та є прийнятною (в якості оцінки коректності розрахункової моделі протизсувної споруди з попереднього розділу роботи).

**Ключові слова:** математичне моделювання, протяжні системи, хвилі, метод кінцевих різниць, моніторинг.

## ABSTRACT

Berchun Y.O. Mathematical and experimental modeling of extended systems. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for a Candidate Degree in technical sciences by specialty 113 «Applied mathematics». – The Institute of Telecommunication and Global Information Space of the National Academy of Science of Ukraine. – Kyiv, 2020.

**The contents of the dissertation.** In the Introduction the relevance of the research topic is substantiated, the research purpose and tasks are formulated, the research scientific novelty and practical value are explained, and its general description is presented.

In **Chapter 1** the extended systems are considered as an object of mathematical modeling. There are various examples of widespread use of the extended systems in space, air, water and soil environments. The works of following domestic and foreign scientists are analyzed: Trofymchuk O.M., Vasyanin V.O., Vlasyuk A.P., Koroliouk D.V., Mokin V.B., Stefanyshyn D.V., Deineki V.S., Lyashko I.I., Sergienko I.V., Skopetsky V.V., Zhukovsky V.V., Krylov A.M., Tymoshenko S.P., Dinnik A.M., Ishlinsky A.Yu., Pisarenko G.S., Kilchevsky M.A., Fedorov M.M., Savin G.N., Selezov I.O., Goroshko O.A., Kayuk E.F., Guz A.N., Nesterov A.P., Florinskiy F.V., Svetlitsky V.A., Saltanov N.V., Gorban V.A., Ordanovich A.E., Kalikov V.N., Gulyaev V.I., Gaydachuk V.V., Koshkin V.L., Bazhenov V.A., Lizunov P.P., Popov E.P., Ilyukhin A.A., Kubenko V.D., Boyko V.V., Gersenvanov M.M., Goldstein M.M., Ginzburg L.K., Kilwander E.Y., Maslov M.M., Polevetsky V.V., Silchenko K.V., Shakhunyants G.M., Cherny G.I., Glukhovsky V.P., Yaras V.I., Ulitsky V.M., Jones R., Fekeoarui I., Leshchinsky M.Yu., Yermoshkin P.M., Krasilnikov V.A., Nogin S.I., Safarov V.A., Sudakov V.V., Pochtovik G.Ya., Bambura A.M., Horodzha A.D., Marienkov M.G., Nemchinov Yu.I., Dovzhenko O.O., Kalyukh Yu.I., Savitsky O.A., Sedin V.L., Ablow C.M., Berto O.O., Calkins B.E., Casarella M.I., Chapman B.A., Griffin O.M., Hegemier C., Iwers W.B., Marichal D., Nair S., Paidoussis M.P., Triantaffullou N.S., Wingham B.S., Carino N.J., Sansalone M., Hsu N.N., Lin J.- M.,

Streett W., Liao S. T., Roesset J.M., Chen C.H., Yu C.P., Ambrosini D., Ezeberry J., Kim D.S., Kim H.W., Kim W.C., Seo W.S., Choi K.C., Wooa S.K., etc. In their works various aspects of the numerical and experimental analysis of the stress-strain state of extended systems and their elements in different environments and under different conditions of use are outlined.

The modern state of the topic is summarized, and the research tasks are set, the basic prerequisites for study of the multimode models of the extended systems are specified. Taking into account the finite velocity of modes propagation in the system allowed to design and increase the speed of numerical algorithms of calculation of the extended systems on the basis of parallelization by waves and wave velocities. Based on the review, conclusions were drawn and research objectives were set.

In **Chapter 2** the 3D six-wave model of the extended system in the field of mass and surface forces in the ground was developed. It describes the waves of four types: longitudinal, torsional, configurational (or transverse; two) and bending (two). Together with certain boundary and initial conditions, the model can be used for various tasks, in particular for the technical diagnostics of the anti-landslide constructions, evaluation of their integrity and refinement of load capacity. The peculiarities of application of the finite difference method for solving nonlinear dynamic problems for the determination of non-stationary 3D stress-strain state of the extended systems and the reinforced concrete piles in the soil are studied. The method of modeling the stress-strain state of the extended systems by parallelization of the numerical algorithm by types of waves and wave velocities has been improved. It is shown that due to the parallelization during the calculation of longitudinal and transverse waves it is possible to achieve a further increase in the speed of calculations (more than 10 times) in comparison with the algorithm of wave factorization and up to 100 ~ 1000 times in comparison with the original algorithm, without reducing the range of «stable count». The comparative estimation of accuracy of the three listed numerical algorithms is carried out. The best monotonization of the numerical solution was obtained while using the parallelization method. The three-mode model of nonlinear dynamics of the longitudinally deformed extended system is derived as a single case

of the general model, and its testing is carried out. It takes into account longitudinal and configurational (two) waves in the direction of the normal and binormal, as well as the torsion wave. The model was tested on a specific example of excitation of torsion waves due to the longitudinal and configurational ones.

In **Chapter 3** the nonlinear boundary problems of the statics and dynamics of the extended systems are analyzed numerically. Consideration is given to the use of the finite difference method to simulate wave processes in piles related to the diagnosis of their technical condition (the integrity of the pile trunk, which directly affects their load carrying capacity, etc.). The model of shear-bending waves in the reinforced concrete piles for technical diagnostics is tested. The calculations of defective piles and piles without defects are given. Comparative analysis reveals many differences (not only in scale but also in form). This is the key to correct identification of defects of various types in piles in the presence of an appropriate database of mathematical calculations and experimental data. The spectra obtained by previous researchers Sansalone M., Streett W., Liao S.T., Ambrosini D., Kim H.W. using the one-wave models practically did not differ. A graphical model of the railway anti-landslide structure based on the finite element method in LIRA 9.6 software was built. The boundary conditions model both the dynamic impact from the movement of trains and from the increased seismic activity of the studied region (according to the map of seismic zoning of the territory of Ukraine part of Chernivtsi region belongs to regions with high levels of seismic activity). On the basis of mathematical modeling of the stress-strain state the natural frequency of vibrations of the anti-landslide structure was obtained - 9.46 Hz.

In **Chapter 4** a new DSTU-N B document B.1.2-17: 2016 has been developed for the development of a set of standards for systems of technical diagnostics of building structures. This document incorporates all the basic methodological instructions and developments on scientific and methodological substantiation, design and experimental development of monitoring systems in construction. The document is designed in a harmonious manner with the fib documents. Basing on it, monitoring of vibration of the load-bearing structures of the dwelling house at the address 14 Pymonenko St. in Kyiv was conducted during the installation of the bored pile ( $\varnothing 820$

mm). The reported vibration acceleration levels in the floor level on the 9th floor of the building in the vertical and horizontal directions did not exceed  $0.004 \text{ m/s}^2$ , which is less than the allowable vibration acceleration values for tall buildings ( $0.08 \text{ m/s}^2$ ). Moreover, dynamic surveys of the anti-landslide structure were performed on the Zavallia-Nepolokivtsi run during the action of microseismic vibrations and during the movement of railway trains. The graph of horizontal vibration acceleration in the X direction (perpendicular to the railway track) during movement of a passenger train, which is in the range  $0.21 - 0.42 \text{ m/s}^2$  at the end sections of the anti-landslide structure and  $0.63 \text{ m/s}^2$  at its middle section, is presented. The range of prevailing frequencies during train movement for the extreme and middle sections is close - in the range of  $0.3 - 25.0 \text{ Hz}$ . This indicates that the retaining wall in the middle part during vibrometric studies has a reduced rigidity in the horizontal direction. This can be caused by both the design features of the anti-landslide structure and internal defects that have accumulated during the life of the wall. It should be noted that the experimentally recorded maximum amplitude of transverse oscillations occurs at a frequency of  $8 \text{ Hz}$ . The difference with the calculated oscillation frequency is  $1.46 \text{ Hz}$ , which corresponds to a deviation of  $\sim 18\%$  and is used to estimate the correctness of the calculated model.

**Key words:** mathematical modeling, extended systems, waves, finite difference method, monitoring.

Список публікацій здобувача:

1. Розробка ДБН «Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення» та ДСТУ-Н Б «Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів» до нього / Ю.С. Слюсаренко, Ю.І. Калюх, В.Д. Шумінський, В.А. Титаренко, О.М. Трофимчук, О.А. Клименков, Я.О. Берчун, М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников, Ю.Й. Великодний, С.В. Бида // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2016. – Вип. 83, Кн.1 – С. 195 – 205.



2. Врахування сейсмічних впливів на стійкість зсувонебезпечних схилів та гребель в ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X «Інженерний захист територій, будинків, будівель та споруд від зсувів та обвалів» / Ю.І. Немчинов, М.Г. Мар'єнков, Ю.І. Калюх, Я.І. Домбровский, В.Д. Шумінський, О.М. Трофимчук, О.А. Клименков, Я.О. Берчун // Будівельні констр. : зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2016. – Вип. 83, Кн.1 – С. 229 – 239.
3. Клименков О.А. Теоретико-методологические и практические аспекты мониторинга зданий и оползнеопасных территорий / О.А. Клименков, Я.О. Берчун // 15 Міжнародна науково – практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», Матеріали 15-й Міжнародної науково-практичної конф. (м. Київ, Пуща-Водиця, 3-6 жовтня 2016 р.).- К.:ТОВ «Видавництво Юстон», 2016. - С. 152-154.
4. Берчун Я.О. Початкова-крайова задача з оцінки напруженодеформованого стану дренажної галереї / Я.О Берчун / Всеукраїнська наукова конференція «Дифференциальные уравнения и проблемы аэрогидромеханики и тепломассопереноса», 28-30 сентября, Днепропетровск, 2016.: тез. докл. – Днепропетровск: Из-во ДНУ, 2016. – С. 31.
5. Експериментально-аналітичні дослідження технічного стану залізничних протизсувних споруд під дією динамічних навантажень / Ю.І. Калюх, В.А. Дунін, Я.О. Берчун, С.М. Самойленко // Екологічна безпека. – 2017. – № 3-4 (24). – С. 148-155.
6. Experimental and theoretical diagnostics of ferroconcrete piles base on reflection of longitudinal and transverse waves) / G. Farenjuk, I. Kaliukh, E. Farenjuk, T. Kaliukh, Y. Berchun, V. Berchun / International fib symposium “High tech concrete: Where technology and engineering meet!”, Maastricht, The Netherlands, 12 – 14 June, 2017. – [s.l. : s.n.], 2017. – P. 1307-1317.
7. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд: ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 / К. Бабік, Ю. Калюх, М. Мар'єнков... Я. Берчун та ін. // [Чинні

від 01 квітня 2017 року]. – К. : Мінрегіонбуд, 2017. – 42 с. – (Державні будівельні норми України).

8. Про можливість багатохвильової ідентифікації дефектів у палях / О.М. Трофимчук, Ю.І. Калюх, В.А. Дунін, Я.О. Берчун // Кибернетика и системный анализ, № 4, 2018. – С. 98-108.

9. Identification of defects of the piles with reflected waves / O. Lebid, I. Kaliukh, Y. Berchun, D. Chernyshev // Екологічна безпека. –2018. – № 1 (25). – С. 64-76.

10. Vibrodinamic monitoring of pile foundation engineering on landslide hazardous site in dense urban development conditions / I. Kaliukh, O. Lebid, V. Dunin, N. Margvelashvili, Y. Berchun, S. Samoilenko // Екологічна безпека. –2018. – № 2 (26). – С. 54-64.

11. Identification of defects in reinforced concrete piles based on multi-wave reflection / I. Kaliukh, G. Fareniuk, O. Trofymchuk, I. Fareniuk, Y. Berchun / In: Derkowski W., Gwoździewicz P., Hojdys Ł., Krajewski P. (eds). Proc. fib Symp. 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures, Fédération Internationale du Béton (fib) – International Federation for Structural Concrete. – P. 991-998.

12. Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions / O. Trofymchuk, O. Lebid, O. Klymenkov, Y. Berchun, V. Berchun, I. Kaliukh, M. Marjenkov, S. Shekhunova, R. Havriliuk / Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy, 17-20 June 2019 /Ed. Silvestri F., Moraci N. – P. 5337-5344.

13. Experimental monitoring and dynamic certification of building structures / M.H. Marienkov, V.A. Dunin, N. Margvelashvili, G.G. Farenyuk, Ya.O. Berchun // Наука та будівництво. –2019. – № 22(4). – С. 33-44.

14. Калюх Ю.И. Четырехмодовая модель динамики распределенных систем / Ю.И. Калюх, Я.А. Берчун // Проблемы управления и информатики, № 1, 2020. – С. 5-15.