

АНОТАЦІЯ

Костін Д.Є. Реалізація методу скінченних елементів у задачах динаміки багатоповерхових будівель від впливу рухомого складу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2026.

Поглиблення співпраці з Євросоюзом у транспортній сфері та використання транзитного потенціалу України є важливим напрямком спільної транспортної політики. Сьогодні реалізуються інфраструктурні проєкти та проєкти технічної і військової допомоги. Найбільш актуальними для мегаполісів є питання, що пов'язані із зростанням парку транспортних засобів та руху залізничного транспорту поблизу цивільних будівель і споруд. Залізничний транспорт є екологічно чистим і тому є незамінним для сучасного суспільства. Але при цьому відомо, що рухомий склад є джерелом вібрацій у ґрунті, які впливають на прилеглі до залізничних магістралей будівлі. Вібрації можуть викликати нерівномірне осідання фундаментів та додаткові напруження в елементах каркасу будівель. На теперішній час немає достатньої кількості вірогідних даних як вібрації від рухомого складу розповсюджуються в ґрунті і впливають на споруди. Особливо важливим є урахування додаткових динамічних навантажень від рухомого складу при дослідженні динамічної поведінки багатоповерхових будівель, які є більш чутливими до такого типу навантажень. У діючих нормативних документах з проєктування будівель і споруд не регламентуються допустимі параметри коливань ґрунту, що не несуть шкоди існуючим поруч багатоповерховим будівлям або окремим їх елементам. Також треба підкреслити, що такі впливи виникають значно частіше ніж сейсмічні і негативно впливають на фізичні характеристики ґрунтів. Вони можуть стати причиною додаткових осідань ґрунту, зсувних процесів та пошкоджень будівель.

Виконання умов безаварійної експлуатації багатоповерхових будівель є необхідним для того, щоб попередити їх пошкодження або руйнування, зберегти здоров'я і життя людей та захистити навколишнє середовище. Точна оцінка динамічного впливу рухомого складу на напружено-деформований стан висотних будівель є важливою для підвищення їх довговічності та надійності. Створення ефективного чисельного підходу щодо побудови розрахункових схем ґрунтової основи і будівлі, точне математичного моделювання крайових задач статички і динаміки дасть можливість якісно прогнозувати рівень динамічної реакції елементів конструкцій на коливання ґрунту від рухомого складу. Особливо, це стосується будівель у густо населених пунктах та історичних місцях.

З цих причин дослідження конструкції під дією рухомого навантаження є важливою інженерною проблемою. На жаль, існуючі українські програмні комплекси не виконують чисельне моделювання таких задач у повному обсязі. Це можна пояснити відсутністю відповідних комп'ютерних процедур. Тому дослідження, що спрямовані на створення чисельної методики визначення впливу коливань ґрунту, спричинених рухомим складом, на розташовані в зоні залізничних колій будівлі є актуальними.

Дисертаційна робота присвячена розробці комплексного підходу щодо чисельного дослідження динамічної поведінки висотних будівель, що знаходяться поблизу руху залізничних потягів. Комплексний підхід полягає в аналізі статичних та динамічних характеристик ґрунтової основи і напружено-деформований стану багатоповерхової будівлі із застосуванням обчислювальних процедур програмних комплексів скінченно-елементного аналізу NASTRAN і SCAD. Комплексний підхід складається з двох етапів. На першому етапі досліджується вплив навантаження від рухомого складу, що передається через баластову призму, на динамічну поведінку основи. Формування розрахункових 2D скінченно-елементних моделей і математичне моделювання крайових задач статички і динаміки баластової призми і

ґрунтової основи виконано у середовищі програмного комплексу MSC NASTRAN. Для розв'язання задач статички в лінійній і нелінійній постановках застосовано методи Гауса і Ньютона-Рафсона відповідно. Динамічна поведінка досліджена методом Ньюмарка. В результаті розрахунків формуються вектори прискорень ґрунту, які виникають на різних відстанях і глибинах від місця прикладання динамічного навантаження. На другому етапі у програмному комплексі SCAD формується 3D модель багатоповерхової каркасної будівлі і проводиться дослідження її напружено-деформованого стану при дії кінематичного збудження ґрунту. Кінематичне збудження ґрунту у вигляді векторів прискорень прикладаються по висоті фундаменту будинку. Динамічна поведінка висотної будівлі аналізується за допомогою спектрального методу. На другому етапі у програмному комплексі SCAD формується 3D модель багатоповерхової каркасної будівлі і проводиться дослідження її напружено-деформованого стану при дії кінематичного збудження ґрунту. Кінематичне збудження ґрунту представлено у вигляді векторів прискорень, що прикладаються по висоті фундаменту будинку. Динамічна поведінка висотної будівлі аналізується за допомогою спектрального методу.

Перший розділ роботи присвячено огляду існуючих методів дослідження впливу вібродинамічних навантажень від руху транспорту та потягів метрополітену на ґрунтові основи із взаємодією з несучими конструкціями будівель.

Підходи до оцінки динамічної поведінки ґрунтів при дії рухомого складу представлені у наукових публікаціях теоретичними, експериментальними та емпіричними дослідженнями. Теоретичні методи базуються на механіці ґрунтів з урахуванням пружно-пластичних властивостей ґрунтів основи. Експериментальні дослідження, проведені в лабораторних і польових умовах, включають застосування інноваційних

методів вимірювання. Емпіричні підходи базуються на статистичній обробці даних, отриманих у ході натурних спостережень.

Зазначено, що при різноманітті наукових праць, присвячених дослідженню різних видів впливу на споруди, таких як сейсмічний вплив та вітрові пульсації, аспекти вібрації, що викликає рух залізничного транспорту, залишаються мало вивченими. У нормативних документах сьогодні немає вірогідних даних про те, яким чином вібрації, що виникають під час руху потягу по рейках, розповсюджуються по поверхні землі і впливають на споруди. При цьому особливо важливо оцінити вплив навантаження від рухомого складу на динамічну поведінку багатоповерхових будівель. Це дасть можливість забезпечити виконання умов безпечної експлуатації споруд, попередити їх руйнування та зберегти здоров'я і життя людей.

Другий розділ роботи присвячено теоретичним основам і методам, на яких базується чисельна методика аналізу статичної і динамічної поведінки ґрунтової основи і багатоповерхової будівлі.

Викладені основні співвідношення методу скінченних елементів для побудови математичних моделей ґрунтової основи і багатоповерхової будівлі. Лінійна крайова задача статичної баластової призми і ґрунтової основи побудована на основі принципу можливих переміщень Лагранжа в узагальнених координатах. Нелінійна крайова задача статичної сформульована із застосуванням методу Ньютона – Рафсона. Крайова задача динаміки ґрунтової основи побудована на основі варіаційного принципу Даламбера-Лагранжа в узагальнених координатах. Математичне моделювання динамічної поведінки багатоповерхової каркасної будівлі від прискорень ґрунту, спричинених рухомим складом, базується на принципі Лагранжа, принципі мінімуму повної потенціальної енергії системи.

У третьому розділі роботи реалізовано метод скінченних елементів у побудові математичних моделей статичної і динамічної ґрунтової основи. Для перевірки вірогідності створеної чисельної методики розрахована тестова

задача з визначення статичних і динамічних характеристик одношарової і багатошарової ґрунтової основи із застосуванням програмних комплексів MSC NASTRAN, LIRA-CAEP і SCAD. Досліджена статична поведінка двох моделей ґрунтової основи при різних значеннях навантаження. Отримані ізополі вертикальних і горизонтальних переміщень вузлів розрахункових моделей ґрунтової основи і баластової призми, а також вертикальних, горизонтальних і дотичних напружень в їх елементах. Виконано модальний аналіз і отримані форми і частоти власних коливань. Співпадіння ізополів переміщень і динамічних характеристик ґрунтової основи в усіх трьох комплексах дало можливість зробити висновок про достатню збіжність отриманих результатів з результатами програмного комплексу MSC NASTRAN і доцільність його застосування для дослідження впливу рухомого складу на ґрунтову основу. Виконані детальні дослідження статичної і динамічної поведінки одношарової і багатошарової моделей ґрунтової основи із значними поздовжніми розмірами у лінійній і нелінійній постановці. При лінійному розрахунку модель основи подана у вигляді лінійно-пружного півпростору. При нелінійному статичному розрахунку одношарової ґрунтової основи використана ідеальна пружно-пластична модель Мора – Кулона. Зважаючи на нелінійну поведінку ґрунтів, для урахування пластичних деформацій при нелінійному статичному розрахунку багатошарової основи прийнята модель Друкера – Прагера. Проаналізовані результати розрахунків. Порівняння результатів показало збільшення деформацій за рахунок фізичної нелінійності.

Представлений перший етап чисельного підходу дозволив дослідити динамічний вплив рухомого складу на розповсюдження вібрацій у ґрунті, визначити прискорення ґрунту на різних відстанях і глибинах основи.

Четвертий розділ присвячений розрахункам декількох реальних задач про напружено-деформований стан і динамічну поведінку каркасних будівель з різними конструктивними рішеннями. За допомогою спектрального методу досліджено напружено-деформований стан будівлі при

дії розрахункових навантажень та вібродинамічного збурення ґрунту, прикладеного по висоті фундаменту будинку у вигляді векторів прискорень. Розв'язана задача на власні значення для знаходження періодів і форм власних коливань будівлі. Дослідження продемонструвало, що вплив вібрації ґрунту від рухомого складу є помітним на рівні основи будівлі, навіть на відстані, що дозволена державними будівельними нормами. Ці зміни викликають перерозподіл навантажень на палі і призводять до збільшення горизонтальних переміщень каркасу будинку. Зазначено, що загальні горизонтальні переміщення каркасу будівлі при дії прискорень ґрунту залишаються у межах допустимих за нормами, але при цьому суттєво збільшуються. На динамічну поведінку будівлі також впливає розташування її по відношенню до залізничних колій. Проаналізовано декілька кутів орієнтації будівлі до колій і оцінено зміни горизонтальних переміщень каркасу у контрольних точках.

Ключові слова: чисельна методика, метод скінченних елементів, нелінійна статика, динаміка, ґрунтова основа, прискорення ґрунту, багатоповерхова будівля, рухомий склад.

SUMMARY

Kostin D.Ye. Implementation of the finite element method in the dynamic problems of multi-story buildings under the influence of rolling stock. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 – Building and Civil Engineering. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

Deepening cooperation with the European Union in the transport sector and utilizing Ukraine's transit potential is an important direction of the common transport policy. Today, infrastructure projects as well as technical and military assistance projects are being implemented. The most urgent issues for metropolises are those related to the growth of the vehicle fleet and railway traffic near civil buildings and structures. Railway transport is environmentally friendly and therefore indispensable for modern society. However, it is known that rolling stock is a source of vibrations in the soil, which affect buildings adjacent to railway mainlines. Vibrations can cause uneven settlement of foundations and additional stresses in the building's frame elements. Currently, there is insufficient reliable data on how vibrations from rolling stock propagate in the soil and affect structures. It is particularly important to account for additional dynamic loads from rolling stock when investigating the dynamic behavior of multi-story buildings, which are more sensitive to this type of loading. Current regulatory documents for the design of buildings and structures do not regulate the permissible parameters of soil vibrations that are harmless to nearby multi-story buildings or their individual elements. It should also be emphasized that such impacts occur much more frequently than seismic ones and negatively affect the physical characteristics of soils. They can cause additional soil settlements, landslide processes, and damage to buildings.

Fulfilling the conditions for the trouble-free operation of multi-story buildings is necessary to prevent their damage or destruction, preserve human health and life, and protect the environment. An accurate assessment of the

dynamic impact of rolling stock on the stress-strain state of high-rise buildings is crucial for increasing their durability and reliability. The development of an effective numerical approach for constructing computational models of the soil base and the building, as well as accurate mathematical modeling of the boundary value problems of statics and dynamics, will enable a qualitative prediction of the level of dynamic response of structural elements to soil vibrations caused by rolling stock. This is especially relevant for buildings in densely populated areas and historical sites.

For these reasons, the study of structures subjected to moving loads is a significant engineering problem. Unfortunately, existing Ukrainian software packages do not perform full-scale numerical modeling of such problems. This can be explained by the lack of appropriate computer procedures. Therefore, research aimed at creating a numerical methodology to determine the impact of soil vibrations caused by rolling stock on buildings located in the railway track zone is highly relevant.

The dissertation is devoted to the development of a comprehensive approach to the numerical investigation of the dynamic behavior of high-rise buildings located near moving railway trains. The comprehensive approach consists of analyzing the static and dynamic characteristics of the soil base and the stress-strain state of a multi-story building using the computational procedures of the finite element analysis software packages NASTRAN and SCAD. The comprehensive approach involves two stages. The first stage investigates the influence of the load from the rolling stock, transmitted through the ballast prism, on the dynamic behavior of the foundation. The generation of 2D computational finite element models and the mathematical modeling of the boundary value problems of statics and dynamics of the ballast prism and soil base were performed within the MSC NASTRAN software environment. To solve the static problems in linear and nonlinear formulations, the Gauss and Newton-Raphson methods were applied, respectively. The dynamic behavior was investigated using the Newmark method. As a result of the calculations, vectors of soil accelerations occurring at

various distances and depths from the point of application of the dynamic load are generated. In the second stage, a 3D model of a multi-story frame building is created in the SCAD software package, and its stress-strain state is investigated under the kinematic excitation of the soil. The kinematic excitation of the soil in the form of acceleration vectors is applied along the height of the building's foundation. The dynamic behavior of the high-rise building is analyzed using the response spectrum method.

The first chapter of the work is devoted to a review of existing methods for studying the impact of vibrodynamic loads from road transport and subway trains on soil bases interacting with the load-bearing structures of buildings.

Approaches to assessing the dynamic behavior of soils under the action of rolling stock are presented in scientific publications through theoretical, experimental, and empirical studies. Theoretical methods are based on soil mechanics taking into account the elastoplastic properties of the foundation soils. Experimental studies conducted in laboratory and field conditions include the use of innovative measurement methods. Empirical approaches are based on the statistical processing of data obtained during field observations.

It is noted that despite the variety of scientific works dedicated to studying different types of impacts on structures, such as seismic effects and wind pulsations, the aspects of vibration caused by railway traffic remain insufficiently studied. Currently, regulatory documents lack reliable data on how vibrations arising during the movement of a train on rails propagate along the ground surface and affect structures. At the same time, it is particularly important to evaluate the impact of the load from the rolling stock on the dynamic behavior of multi-story buildings. This will make it possible to ensure the conditions for the safe operation of structures, prevent their destruction, and preserve human health and life.

The second chapter of the work is devoted to the theoretical foundations and methods underlying the numerical methodology for analyzing the static and dynamic behavior of the soil base and multi-story building.

The basic relations of the finite element method for constructing mathematical models of the soil base and multi-story building are presented. The linear boundary value problem of statics of the ballast prism and soil base is constructed based on Lagrange's principle of virtual displacements in generalized coordinates. The nonlinear boundary value problem of statics is formulated using the Newton- Raphson method. The boundary value problem of soil base dynamics is constructed based on the d'Alembert-Lagrange variational principle in generalized coordinates. The mathematical modeling of the dynamic behavior of a multi-story frame building subjected to soil accelerations caused by rolling stock is based on Lagrange's principle, the principle of minimum total potential energy of the system.

In the third chapter of the work, the finite element method is implemented in the construction of mathematical models of the statics and dynamics of the soil base. To verify the reliability of the developed numerical methodology, a test problem was solved to determine the static and dynamic characteristics of a single-layer and multi-layer soil base using the MSC NASTRAN, LIRA-SAPR, and SCAD software packages. The static behavior of two soil base models under various load values was investigated. Contour plots of the vertical and horizontal displacements of the nodes of the computational models of the soil base and ballast prism, as well as the vertical, horizontal, and shear stresses in their elements, were obtained. Modal analysis was performed, and the natural mode shapes and frequencies were obtained. The coincidence of the displacement contour plots and dynamic characteristics of the soil base across all three software packages allowed concluding that there is sufficient convergence of the obtained results with the results of the MSC NASTRAN software package, confirming the feasibility of its application to study the impact of rolling stock on the soil base. Detailed studies of the static and dynamic behavior of single-layer and multi-layer soil base models with significant longitudinal dimensions were performed in linear and nonlinear formulations. In the linear analysis, the base model was represented as a linearly elastic half-space. In the nonlinear static analysis of the single-layer soil base, the

ideal elastoplastic Mohr-Coulomb model was used. Considering the nonlinear behavior of soils, the Drucker-Prager model was adopted to account for plastic deformations in the nonlinear static analysis of the multi-layer base. The calculation results were analyzed. A comparison of the results showed an increase in deformations due to physical nonlinearity.

The presented first stage of the numerical approach made it possible to investigate the dynamic impact of rolling stock on the propagation of vibrations in the soil, and to determine soil accelerations at various distances and depths of the base.

The fourth chapter is devoted to the calculations of several real-world problems regarding the stress-strain state and dynamic behavior of frame buildings with various structural solutions. Using the response spectrum method, the stress-strain state of the building under the action of design loads and vibrodynamic soil excitation, applied along the height of the building's foundation in the form of acceleration vectors, was investigated. The eigenvalue problem was solved to find the periods and natural mode shapes of the building. The study demonstrated that the impact of soil vibration from rolling stock is noticeable at the building's foundation level, even at distances permitted by state building codes. These changes cause a redistribution of loads on the piles and lead to an increase in the horizontal displacements of the building's frame. It is noted that the overall horizontal displacements of the building frame under the action of soil accelerations remain within the limits allowed by the norms, but significantly increase. The dynamic behavior of the building is also affected by its location relative to the railway tracks. Several orientation angles of the building relative to the tracks were analyzed, and changes in the horizontal displacements of the frame at control points were evaluated.

Keywords: numerical methodology, finite element method, nonlinear statics, dynamics, soil base, soil acceleration, multi-story building, rolling stock.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

а) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (в т.ч. включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А»):

1. Lukianchenko O.O., Kozak A.A., Kostin D.Ye. Analysis of dynamic behavior of a multi-storey frame building in the railway traffic area // Strength of Materials and Theory of Structures: Sci.-Tech. Coll. – Kyiv: KNUBA,. – 2025. – Issue. 114. – P. 127-134. **(Web of Science, Q4)**

Особистий внесок здобувача: виконано чисельний аналіз напружено-деформованого стану каркасу багатоповерхової будівлі, оформлена текстова частина і графічні матеріали.

2. Lukianchenko O.O., Kozak A.A., Kostin D.Ye. Finite element modeling of the static behavior of an elastic-plastic soil base under the action of rolling stock // Strength of Materials and Structural Theory: Sci.-Tech. Coll. – Kyiv: KNUBA, – 2025. – Issue 115. – P. 107-113. **(Web of Science, Q4)**

Особистий внесок здобувача: виконано чисельний аналіз одношарової і багатшарової ґрунтової основи у лінійній постановці, оформлена текстова частина і графічні матеріали.

б) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»:

3. Lukianchenko, O., Kozak, A., & Kostin, D. (2025). Investigation of the influence of ground accelerations Indifferent directions on a building in the railway traffic zone // Building Constructions. Theory and Practice, (16), P.77–86. **(Фахове видання категорії Б)**

Особистий внесок здобувача: проведено огляд існуючих досліджень, виконано чисельний аналіз динамічної поведінки будівлі, оформлена текстова частина і графічні матеріали.

4. Lukianchenko, O., Kostin, D. (2025). Analysis of the dynamic behavior of a frame building considering the multilayered nature of the soil foundation // Building Constructions. Theory and Practice, (17), P.200–210. **(Фахове видання категорії Б)**

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз попередніх досліджень, виконано чисельний аналіз динамічної поведінки будівлі, оформлена текстова частина і графічні матеріали.

Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Костін Денис Оцінка впливу коливань ґрунту, спричинених рухомим складом, на висотну будівлю / Тези міжнародного науково-технічного симпозіуму CIDS 2025, Київ, 30 – 31.10.2025 – С. 43 – 46.

6. Ольга Лук'янченко, Андрій Козак, Денис Костін Динамічна поведінка висотної будівлі, розташованої поблизу руху залізничного транспорту / V Міжнародна науково-практична конференція «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції». Київ, 14 – 16 травня 2025 року – С. 76 – 77.

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз ґрунтових моделей, виконано чисельний аналіз НДС будівлі, оформлена текстова частина і висновки.