

УДК 624.154.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Фомін В. М.¹, Фоміна І. П.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Вирішення проблеми математичного моделювання динамічних впливів на будівельні конструкції розглянута у загальному вигляді та у зв'язку із важливими науковими та практичними завданнями. Багато років частіше з'являється інформація про катастрофічні руйнування будівель і споруд, які є наслідком не тільки помилок, що виникли в процесі будівництва об'єктів, але і через динамічні впливи, що виникли в процесі їх експлуатації. Кожна будівля і споруда є складною технічною системою із наперед заданими технічними параметрами, які повинні контролюватися в процесі виготовлення конструкцій, будівельно-монтажних робіт, при прийманні і в ході експлуатації.

Експлуатація будівель і споруд постійно пов'язується з використанням будівельної техніки, обладнанням та устаткуванням, які призводять до динамічних впливів на будівельні конструкції. Особливо це впливає на експлуатування в складних інженерно-геологічних умовах будівель та споруд, які зазнали попередніх деформацій від нерівномірних осідань ґрунтової основи.

Значною частиною динамічних впливів є землетруси. За допомогою сейсмометричної апаратури вимірюють швидкість та період коливань ґрунту біля фундаменту будівлі і порівнюють їх з допустимою швидкістю коливань ґрунту для будівлі. Фактична сейсмічна стійкість споруд, що підлягають збереженню, визначається співвідношенням періодів коливань ґрунту та споруди.

Для структурної динаміки використовуються різні методи, такі як модальний аналіз, аналіз спектру відгуку, часовий аналіз та аналіз методом кінцевих елементів. Ці методи містять математичне моделювання, чисельне моделювання та обчислювальні методи для прогнозування поведінки та реакції конструкції в умовах динамічного навантаження.

Знаючи власні частоти та форми коливань, можна оцінити динамічну реакцію конструкції на прикладені навантаження. Це включає визначення переміщень, прискорень і внутрішніх сил в різних місцях конструкції. Аналіз реагування допомагає оцінити характеристики конструкції, визначити критичні області та переконатися, що проект відповідає бажаним критеріям [1].

Ключові слова: динамічна модель, будівельна конструкція, корозія, землетрус, теорія коливань.

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC IMPACTS ON BUILDING STRUCTURES

V. Fomin¹, I. Fomina¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The solution of the problem of mathematical modeling of dynamic influences on building structures is considered in general and in connection with important scientific and practical tasks. In modern conditions, special attention should be paid to the problems of taking into account dynamic influences, parameters of load-bearing structures of buildings that affect their structural reliability and safety. For many years, information about catastrophic destruction of buildings and structures has been appearing more often, which are the result not only of errors that arose during the construction of facilities, but also due to dynamic influences that arose during their operation.



A buildable technical system will be used in advance with the technical parameters set, which is responsible for the control of the process of the preparation of structures, the installation of the equipment, during the operation and operation. The development will be carried out and the sporud will be constantly used to promote the development of future technologies, the development and the establishment of the future, as well as the development of dynamic developments in the future. In particular, it is important to understand the development of the engineering and geological minds of the spores, as they have known the front deformation of the non-essential axis of the runt foundations.

Various methods are used for structural dynamics, such as modal analysis, response spectrum analysis, time analysis, and finite element analysis. These methods include mathematical modeling, numerical simulation, and computational methods to predict the behavior and response of a structure under dynamic load conditions.

Knowing the frequency and form of the structure, it is possible to estimate the dynamic reaction of the design to the application. For the purpose of including the transfer of the world, the destruction of internal forces in the real parts of the construction. Analyses of the response to the additional assessment of the characteristics of the construction, the identification of critical areas and the re-conversion, which the project is able to meet the criteria.

Keywords: dynamic model, building structure, corrosion, earthquake, oscillation theory.

1 ВСТУП

У сучасних умовах особливої уваги потребують проблеми врахування динамічних впливів, параметри несучих конструкцій будівель, що впливають на їх конструктивну надійність і безпеку.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Україна — на війні. Зазнають атак ворога населені пункти, житло, промислові об'єкти, угіддя, зелені зони. Багато мирних міст перетворилися на поля битв і руйнуються під час боїв, значні території забруднені боєприпасами. Це травматичний досвід для кожного, бо нам хочеться вважати свій світ — місто, рідну вулицю, домівку — міцним місцем, яке не може бути ушкодженим.

Проте є інші, не менш, а можливо, і більш неблаганні суперники для людського житла. Принаймні їх неможливо перемогти зброєю. Це — сили стихії, прояви змін клімату і час, який робить вірогідність тих чи інших подій практично гарантованою. Кожне місто розташоване на території, яка має свій контекст: особливості, зумовлені геологією та сейсмікою, рельєфом, факторами природного й техногенного походження [2]. У лютому 2023 року сталася низка руйнівних землетрусів на південному сході Туреччини та близькій до кордону частині Сирії. Потужність першого поштовху з епіцентром поблизу Газіантепа склала 7,8 балів за шкалою Ріхтера. Такі процеси мають значний вплив на сучасне будівництво. Для України також характерними є зсуви — на Прикарпатті, Хмельниччині, у східній частині країни. Від них страждають населені пункти поблизу морського узбережжя, наприклад на Одещині і в Криму. Витривалість споруд до можливого впливу стихії набуває нових контекстів під час війни, яка триває зараз. Ми бачимо, як під час обстрілів чи бомбардувань одні будівлі значно руйнуються або «складаються», а інші витримують удари чи пожежі з меншими втратами і можуть бути відновлені. Чи буде сейсмічно стійка будівля більш витривалою до інших впливів, наприклад у разі вибуху?

Традиційні залізобетонні колони продемонстрували погані сейсмічні характеристики, особливо в агресивному середовищі, оскільки за таких умов арматурні стрижні зазнають сильної корозії. Щоб вирішити проблему корозії сталі, останніми роками значну увагу привернули залізобетонні колони зі склопластику (GFRP). Однак сейсмічні характеристики залізобетонної колони із склопластику ще недостатньо вивчені. Однією з основних проблем, пов'язаних з використанням стрижнів зі склопластику, є їхня крихкість. Тому необхідно дослідити механічні властивості та види руйнування залізобетонних конструкцій із склопластику при сейсмічному впливі. У цьому дослідженні сейсмічну поведінку залізобетонних колон зі склопластику та звичайних колон при різних ступенях осьового стиснення аналізується за допомогою малоциклових повторних випробувань на псевдостатичне навантаження. В результаті досліджуються та обговорюються деформація та здатність розсіювати сейсмічну енергію залізобетонних колон зі склопластику. Крім того, вивчається механізм руйнування стрижневої конструкції зі склопластику, щоб забезпечити основу для покращення методу сейсмічного розрахунку залізобетонної конструкції зі склопластику та зміни норм для сейсмічного розрахунку. Крім того, досліджується вплив ступеня осьового стиснення на сейсмічну поведінку колон із цільного склопластику. Результати цього експерименту показують, що зі збільшенням ступеня осьового стиснення гранична несуча здатність залізобетонних колон зі склопластику збільшується, а деформація та сукупна здатність розсіювання енергії зменшуються [3-15].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Предметом математичного аналізу динамічного впливу є такі динамічні моделі, що відображають різні типи навантажень, а саме коливання від дії різних сил, що надають системі одну чи дві ступені свободи[16].

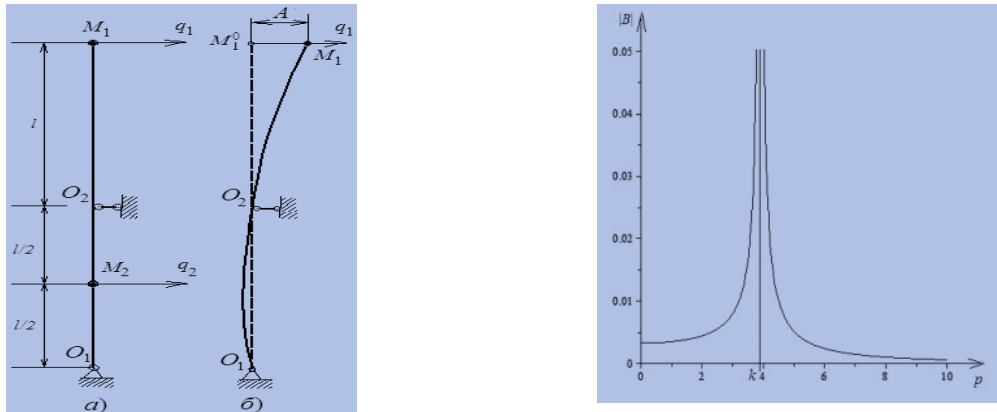


Рис. 1. Схема навантажень та графік частот коливань

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо рух пружної механічної системи з однією ступенню свободи при землетрусі.

Опори O_1 і O_2 рухаються із заданим прискоренням

$$a(t) = Ue^{-\epsilon t} \sin pt . \quad (1)$$

Це приводить до появи сили інерції $J = -m_1 a$, яка діє на точку M_1 і приводить у рух механічну систему (рис.1). Рух точки M_1 визначемо за формулою

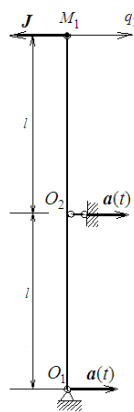


Рис. 2. Динамічна модель

$$q(t) = \frac{U}{k[\epsilon^2 + (p-k)^2][\epsilon^2 + (p+k)^2]} \{2\epsilon kp \cos kt - p(\epsilon^2 + p^2 - k^2) \sin kt - e^{-\epsilon t} [2\epsilon kp \cos pt + k(\epsilon^2 - p^2 + k^2) \sin pt]\} . \quad (2)$$

Після підстановки значень U , p , k і ϵ одержуємо закон руху точки M_1

$$q(t) = 0.0006015 \cos kt + 0.017 \sin kt - e^{-\xi t} (0.0006015 \cos pt + 0.021 \sin pt). \quad (3)$$

Для пружної механічної системи також можливо скласти рівняння вільного руху при наступних значеннях початкових переміщень і швидкостей:

початкові переміщення точок M_1 і M_2 :

$$q_{1,0} = 0,1 \text{ м}, q_{2,0} = 0,01 \text{ м},$$

початкові швидкості точок:

$$V_{1,0} = 0,1 \text{ м/с}, V_{2,0} = 0.$$

Знайдемо значення головних координат і їхніх похідних при $t = 0$:

$$\begin{aligned} \eta_{1,0} &= m_1 q_{1,0} A_1^{(1)} + m_2 q_{2,0} A_2^{(1)} = 0,1088, \\ \eta_{2,0} &= m_1 q_{1,0} A_1^{(2)} + m_2 q_{2,0} A_2^{(2)} = -0,0257, \\ \zeta_{1,0} &= m_1 V_{1,0} A_1^{(1)} + m_2 V_{2,0} A_2^{(1)} = 0,0973, \\ \zeta_{2,0} &= m_1 V_{1,0} A_1^{(2)} + m_2 V_{2,0} A_2^{(2)} = 0,0230. \end{aligned} \quad (4)$$

Розв'язок системи диференціальних рівнянь вільного руху системи представимо в наступному виді:

$$\begin{aligned} \eta_1(t) &= \Psi_1 \sin(k_1 t + \gamma_1), \\ \eta_2(t) &= \Psi_2 \sin(k_2 t + \gamma_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Значення Ψ_1 , Ψ_2 , γ_1 і γ_2 визначимо з формул

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \sqrt{\eta_{1,0}^2 + \frac{\zeta_{1,0}^2}{k_1^2}} = 0,1092, \quad \Psi_2 = \sqrt{\eta_{2,0}^2 + \frac{\zeta_{2,0}^2}{k_2^2}} = 0,0257, \\ \gamma_1 &= \arctg \frac{k_1 \eta_{1,0}}{\zeta_{1,0}} = 1,487, \quad \gamma_2 = \arctg \frac{k_2 \eta_{2,0}}{\zeta_{2,0}} = -1,514. \end{aligned} \quad (6)$$

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Якщо зневажити дуже малими (у порівнянні з іншими) доданками, то рівняння руху спрощується:

$$q(t) = 0.017 \sin kt - 0.021 e^{-\xi t} \sin pt. \quad (7)$$

і графік його може бути легко побудований (рис.4).

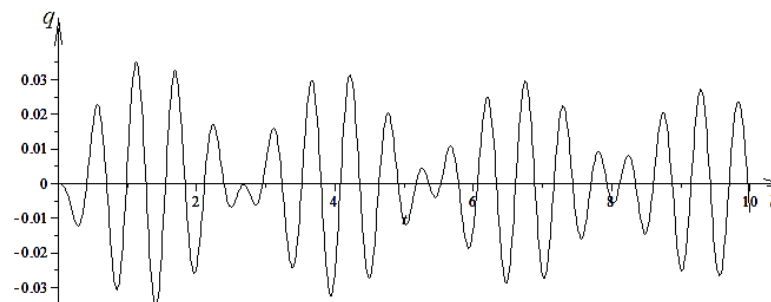


Рис. 4. Графік вільного руху

6 ВИСНОВКИ

При створенні динамічної моделі та з урахуванням динамічного впливу можливо створити математичний опис динамічного навантаження та врахувати це для запобігання порушення експлуатаційних вимог чи руйнування будівельних конструкцій та споруд.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Діагностика стійкості промисловості будівельних матеріалів в сучасних умовах / О.В. Хахльов // *Культура народів Причорномор'я*. — 2006. — № 83. — С. 23-26.
2. *Український журнал будівництва та архітектури*, № 1(001), 2021, ISSN 2710-0367 (print), ISSN 2710-0375 (online) *Український журнал будівництва та архітектури*
3. Nabid N., Hajirasouliha I., Petkovski M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 198. Pp. 109549-1–109549
4. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel L.F.F., Riera J.D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 190. Pp. 276–284.
5. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel Letícia F.F., Miguel Leandro F.F. A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 6040986. 18 p.
6. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинний від 16.05.2014]. Київ :Мінрегіон України, 2014. 110 с.
7. Данішевський В. В., Гайдар А. М. Метод рою частинок для розв'язання задач нелінійної оптимізації. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 6. С. 18–25.
8. Данішевський В. В., Гайдар А. М. Оптимізація розташування демпферів сухого тертя для сейсмічного захисту каркасних будівель за допомогою методу рою частинок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Т. 80. С. 34–42.
9. Xu S., Rahmat-Samii Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55. Pp. 760–765.
10. Christoph Adam, University of Innsbruck Assessment of the dynamic stability of tall buildings subjected to severe earthquake excitation <https://www.researchgate.net/publication/315892521>
11. Лук'янченко О. О., Ворона Ю. В., Костіна О.В., Геращенко О.В. Застосування вейвлет-аналізу до моделювання стохастичної поведінки пружних систем при сейсмічному впливі // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2017. – Вип. 99. – С. 160–180.
12. Лук'янченко О.О., Костіна О. В., Геращенко О.В. Дослідження сейсмічної хвильової реакції просторової конструкції // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 83–102.
13. Лук'янченко О. О., Ворона Ю. В., Костіна О. В. Вейвлет-аналіз сейсмічної хвильової реакції каркасної будівлі // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – К: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 131–134.
14. Lizunov P. P., Nedin V. O. The gyroscopic forces influence on the oscillations of the rotating shafts, *Strength of Materials of Structures*.– K.: KNUCA, 2020. – V. 105. – С. 199–207.
15. Tian, L.; Zhu, Z.; Bai, C.; Shen, C. Nonlinear Dynamic Stability of Cylindrical Reticulated Shells with Initial Damage. *Buildings* 2023, 13, 2852. <https://doi.org/10.3390/buildings13112852> Academic
16. V. M. Fomin, I. P. Fomina. *Dynamic models for engineering problems*, OSACEA, Odessa, 2021

References

1. Diagnostyka stiykosti promislovosti budivelnih materialiv v sychasnih umovah / O. V. Halov // Kultura narodiv Prichernomoria. — 2006. — № 83. — P. 23-26.
2. Ukrainskiy zurnal ,budivnitsva ta arhitekturi, № 1(001), 2021, ISSN 2710-0367 (print), ISSN 2710-0375 (online)
3. Nabid N., Hajirasouliha I., Petkovski M. Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 198. Pp. 109549-1–109549
4. Ontiveros-Pérez S.P., Miguel L. F. F. and Riera J. D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Engineering Structures*. 2019, vol. 190, pp. 276–284.
5. Ontiveros-Pérez S. P., Miguel Letícia F. F. and Miguel Leandro F. F. A new assessment in the simultaneous optimization of friction dampers in plane and spatial civil structures. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Article ID 6040986. 18 p.
6. DBN V.1.1-12-2014. *Budivnitsvo u seysmichnih rayonah UkraYini* [Construction in seismic regions of Ukraine]. Ranked from 16.05.2014. Kyiv : Minrehion Ukrainy Publ., 2014, 110 p. (in Ukrainian)
7. Danishevskyy V. V. and Gaidar A. M. *Metod royu chastinok dlya rozv'yazannya zadach nelsiniynoyi optimizatsiyi* [Method of rotation of particles to solve the problems of nonlinear optimization]. *Visnik Pridniprovskoy i derzhavnoy i akademiyi budivnitsva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Construction]. 2019, no. 6, pp. 18–25. (in Ukrainian)
8. Danishevskyy V. V. and Gaidar A. M. *Optimizatsiya roztašuvannya dempferiv suhogo tertya dlya seysmichnogo zahistu karkasnih budivel za dopomogoyu metodu royu chastinok* [Optimization of the location of dry friction dampers for seismic protection of frame buildings using the particles method]. *Visnik Odeskoyi derzhavnoy akademiyi budivnitsva ta arhitekturi* [Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Construction]. 2020, vol. 80, pp. 34–42. (in Ukrainian).
9. Xu S., Rahmat-Samii Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007. Vol. 55. Pp. 760–765.
10. Christoph Adam, University of Innsbruck Assessment of the dynamic stability of tall buildings subjected to severe earthquake excitation <https://www.researchgate.net/publication/315892521>.
11. Lukianchnko O. O., Vorona U. V., Kostina O. V., Geraschenko O. V. Zastosuvannya veivlet-analizu do modeluvannya stohastichnoi povedinki pruznih sistem pri ceismichnomu hvivi // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2017. – Vip. 99. – P. 160 –180.
12. Lukianchnko O.O., Kostina O.V., Geraschenko O.V. Doslidzennya ceismichnomu hvivovoi reakcii prostorovoi konstruksii // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2018. – Vip. 101. – P. 83 –102.
13. Lukianchnko O. O., Vorona U. V., Kostina O. V., Veivlet- analiz ceismichnomu hvivovoi reakcii karkasnoi budivli // *Opir materialiv i rteoriya sporud*. – K: KNUBA, 2019. – Vip. 103. – P. 131 – 134.
14. Lizunov P. P., Nedin V. O. The gyroscopic forces influence on the oscillations of the rotating shafts, *Strength of Materials of Structures*.– K.: KNUCA, 2020. – V. 105. – C. 199 –207.
15. Tian, L.; Zhu, Z.; Bai, C.; Shen, C. Nonlinear Dynamic Stability of Cylindrical Reticulated Shells with Initial Damage. *Buildings* 2023, 13, 2852. <https://doi.org/10.3390/buildings13112852> Academic
16. V. M. Fomin, I. P. Fomina. *Dynamic models for engeneering problems*, OSACEA, Odessa, 2021

Фомін Володимир Михайлович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
Fomin@ogasa.org.ua
ORCID: 0000-0003-4814-6415



Фоміна Інна Петрівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури
старший викладач
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
Fomina@ogasa.org.ua
ORCID: 0000-0001-7366-1537

Для посилань:

Фомін В. М., Фоміна І. П. Математичне моделювання динамічних впливів на будівельні конструкції. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 1. С. 49–56.

For references:

V. Fomin, I. Fomina. (2024). Mathematical modeling of dynamic impacts on building structures. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 49–56.