

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.94.014.2:519.6

Д. В. РОЗУМЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

¹Фак. «Промислове та цивільне будівництво», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 681 68 38, ел. пошта dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417

^{2*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОДНОПОВЕРХОВОЇ ВИРОБНИЧОЇ БУДІВЛІ

Мета. Зараз в Україні зростає попит на повторне використання промислових будівель, які протягом певного часу не були в експлуатації. При цьому частими є випадки, коли нове технологічне обладнання передає на наявні конструкції значні динамічні навантаження протягом тривалого часу. Оскільки дані щодо динамічних властивостей виробничих будівель на сьогодні практично відсутні, основною метою нашого дослідження є оцінка власних динамічних характеристик одноповерхової виробничої будівлі. **Методика.** Для досягнення поставленої мети необхідно було спочатку обрати тип виробничої будівлі, який є доволі розповсюдженим для сформульованих умов можливості повторного використання. За таку будівлю було взято одноповерхову трипрогонову неопалювану виробничу будівлю (прогони 15 + 15 + 6 м) зі сталевим несучим каркасом. У ході досліджень варіювались перерізи основних несучих елементів, а також схеми їх з'єднання між собою. Розрахунки виконано методом скінченних елементів на базі проектного комплексу Lira for Windows. **Результати.** Отримані частотні спектри власних динамічних характеристик основних несучих конструктивних елементів для виробничої будівлі розглядуваного типу перебувають у діапазоні до 30 Гц. Також у ході досліджень отримані залежності для зміни цього діапазону для різних випадків проектно-конструкторських рішень будівлі. **Наукова новизна.** Представлені в публікації результати досліджень дозволяють оцінити спектр власних динамічних характеристик одноповерхових багатопрогонових неопалюваних виробничих будівель із традиційним конструктивним рішенням сталевих каркасів. **Практична значимість.** Отриманий діапазон власних динамічних характеристик виробничої будівлі розглядуваного типу виявляється доволі небезпечним для здоров'я людини. Найбільш несприятливою є форма коливань колон, яка фактично залучає до роботи весь конструктивний каркас. Тому в ході досліджень було розроблено та перевірено спеціальний спосіб стабілізації таких коливань «на основу» за допомогою гнучких канатів.

Ключові слова: виробничі будівлі; модальний аналіз; динамічні характеристики; метод скінченних елементів; комплекс Lira for Windows

Вступ

На сьогодні в Україні накопичилась значна кількість виробничих будівель різноманітного типу та призначення, які тривалий час не були в експлуатації. Їх будівництво припадає на другу половину ХХ сторіччя, відповідно об'ємно-

планувальні та конструктивні рішення також відповідають вимогам цього періоду.

Прагнення сучасних приватних підприємців зекономити певні кошти під час розгортання власного бізнесу призводить до повторного використання таких будівель. При цьому наявні об'ємно-планувальні та конструктивні рішення

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

залишають без змін, намагаючись їх використувати під сучасні виробничі технології. Такий підхід доволі часто реалізується без будь-якого спеціалізованого проєкту, без потрібних фахових розрахунків та навіть без елементарного техніко-економічного обґрунтування.

У результаті нове технологічне обладнання розташовують прямо на наявних елементах несучих конструкцій, кріплять до нього фактично без спеціальних конструкторських рішень. Доволі часто тривалість безперервної роботи обладнання вимірюється годинами, а в окремих випадках його робота є цілодобовою. Натомість одним із факторів роботи такого обладнання нерідко є динамічний вплив, викликаний його рухомими частинами.

Основною складовою такого динамічного впливу є вібрація, що проявляється у вигляді передачі на елементи конструкцій динамічного навантаження певного амплітудно-частотного спектра. Як наслідок, статична робота несучих конструкцій будівлі, передбачена проєктно-конструкторською документацією, порушується, перетворюючись на динамічну роботу.

Наслідки подібної ситуації проявляються вже через доволі короткий період часу у вигляді різноманітних пошкоджень та відмов елементів несучих конструкцій, порушення їх справної роботи.

Мета

Зважаючи на вищевикладене, основною метою нашого дослідження є оцінка динамічних характеристик одноповерхової виробничої будівлі.

Для досягнення цієї мети необхідно було спочатку обрати тип виробничої будівлі, який є доволі розповсюдженим для сформульованих умов можливості повторного використання, а надалі провести модальний аналіз його конструктивного рішення.

Методика

Для проведення досліджень була обрана одноповерхова виробнича неопалювана будівля, яка має три прогони $15 + 15 + 6$ м. Її конструктивне рішення є каркасним із застосуванням класичного компонування, яке доволі детально описано в багатьох фахових довідкових джере-

лах, наприклад, [3]. Несучі елементи являють собою поперечні рами, розташовані з кроком 5,3 м. Колони крайніх рядів виконані сталого суцільного перерізу, колони середніх рядів мають двоступінчасту конструкцію з наскрізною нижньою частиною. Як ригель передбачені ферми з розкісною решіткою додатковими стійками та ухилами верхнього пояса в $8,8^\circ$ (15,6 %) і $14,4^\circ$ (25,8 %), що, до речі, суперечить сучасним вимогам [14]. Загальний вигляд та конструктивне рішення розглядуваної будівлі наведені на рис. 1.

Матеріалом несучих елементів каркасу була обрана сталь, що пов'язано з більш низьким її логарифмічним декрементом затухання коливань порівняно із залізобетоном або деревиною [9, 10].

Зауважимо, що такий тип виробничих будівель з невеликими прогонами є також доволі розповсюдженим і популярним у наш час за кордоном [13].

Дослідження було проведено в декілька стадій, на кожній із яких оцінено власні динамічні характеристики розглядуваної будівлі.

На *першій стадії* оцінено вплив довжини будівлі. При цьому розглянуто три випадки – будівля довжиною в 4 кроки несучих поперечних рам (основний варіант), у 6 і 10 кроків, що становило загальну довжину будівлі в 21,2; 31,8 та 53 м відповідно.

На *другій стадії* оцінено вплив характеру з'єднання несучої поперечної рами будівлі з фундаментом. Розглянуто два випадки жорсткого та шарнірного прикріплення.

На *третьій стадії* оцінено вплив жорсткості основних конструктивних елементів будівлі – ферми, колони, підкранової балки, а також прогонів покрівлі та поздовжніх в'язів.

Для проведення всіх цих варіантних розрахунків було використано надзвичайно популярний в останні десятиріччя та апробований чисельний метод будівельної механіки – метод скінченних елементів [12, 16, 17] на базі широко відомого вітчизняного програмного комплексу Lira for Windows [11].

Побудована розрахункова модель для основного конструктивного варіанта виробничої будівлі наведена на рис. 2. Усі конструктивні елементи з модельовано стержневими скінченними елементами універсального типу зі стан-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

дартної бібліотеки комплексу. Розрахунки виконано в геометрично і фізично лінійній постановці. Такий підхід дозволив уникнути питань оцінки збіжності результатів, характерних для скінченних елементів інших видів [1, 2].

Окремо слід зазначити, що проведення динамічних розрахунків будівельних конструкцій у наш час не регламентується жодними нормативними документами. Чинний стандарт України з проектування сталевих конструкцій [6] містить лише вказівки щодо доцільності їх виконання, проте не подає ані методик, ані обсягів їх проведення. Стандарт України з визначення навантажень на конструкції [5] взагалі не містить вказівок стосовно розрахунку динамічних навантажень. Частково цю прогалину заповнює стандарт із визначення сейсмічних навантажень [4], проте такі розрахунки мають суто специфічний характер та непридатні для виконання, наприклад, модального аналізу просторових будівель-

них конструкцій, до яких належать і розглядувані одноповерхові виробничі будівлі.

Тому нерідко виникає необхідність запозичувати певні прийоми та методи з інших галузей, у першу чергу – машинобудування [15]. Зокрема були застосовані алгоритми відсіювання вищих частот, до уваги взяті лише перші власні частоти.

Результати

Отримані результати модального аналізу для всіх трьох стадій досліджень узагальнені в табл. 1. Наведені нижні власні парціальні частоти для основних конструктивних елементів. На рис. 3 – 6 представлені форми коливань основних конструктивних елементів для випадку, який показаний в табл. 1 темним кольором. Для всіх інших випадків форми коливань виявились якісно тотожними.

Таблиця 1

Власний частотний спектр одноповерхової виробничої будівлі (Гц)

Закріплення	Жорстке						Шарнірне
	4				6	10	
Кроки рам	квадрат	квадрат	круг	кутики	квадрат	квадрат	квадрат
	початковий	перепідібраний зниженої жорсткості					
Елемент будівлі							
Ферма	0,509	0,344	0,306	0,297	0,307	0,296	0,343
Колона	2,787	1,978	1,867	1,881	1,961	1,847	1,977
Прогони покрівлі	5,203	4,269	4,288	4,288	4,288	4,288	4,269
Підкранова балка	7,164	5,695	5,599	5,608	5,595	5,591	5,692
В'язі	25,401	22,384	22,448	22,577	22,465	22,128	22,410

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

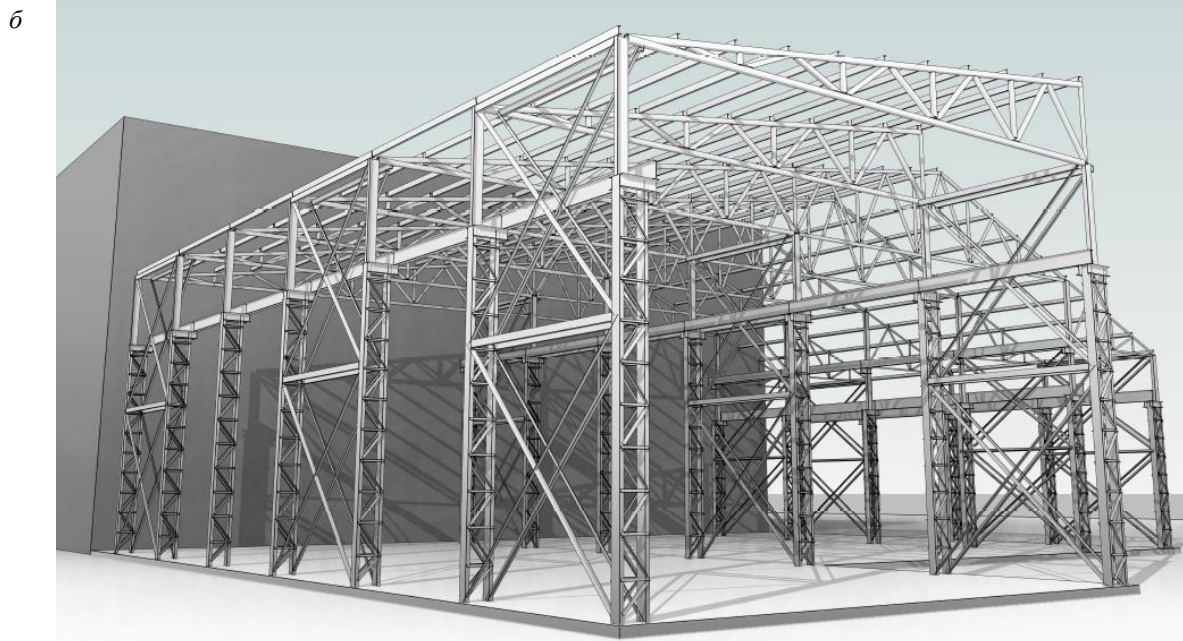
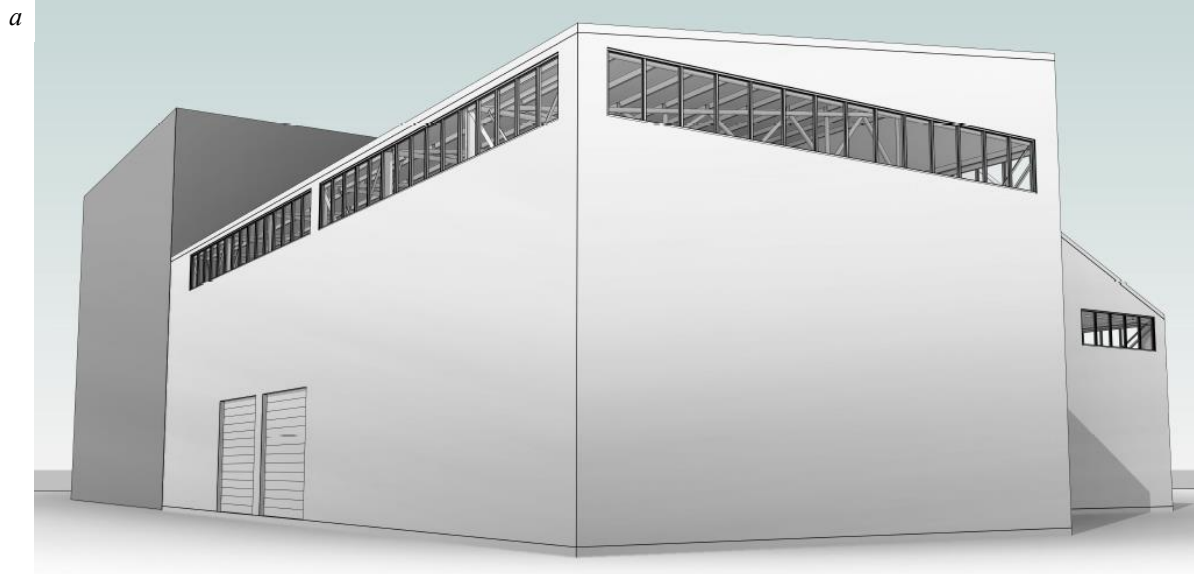


Рис. 1. Об'єкт досліджень – одноповерхова виробнича будівля:
a – загальний вигляд; *б* – конструктивне рішення

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

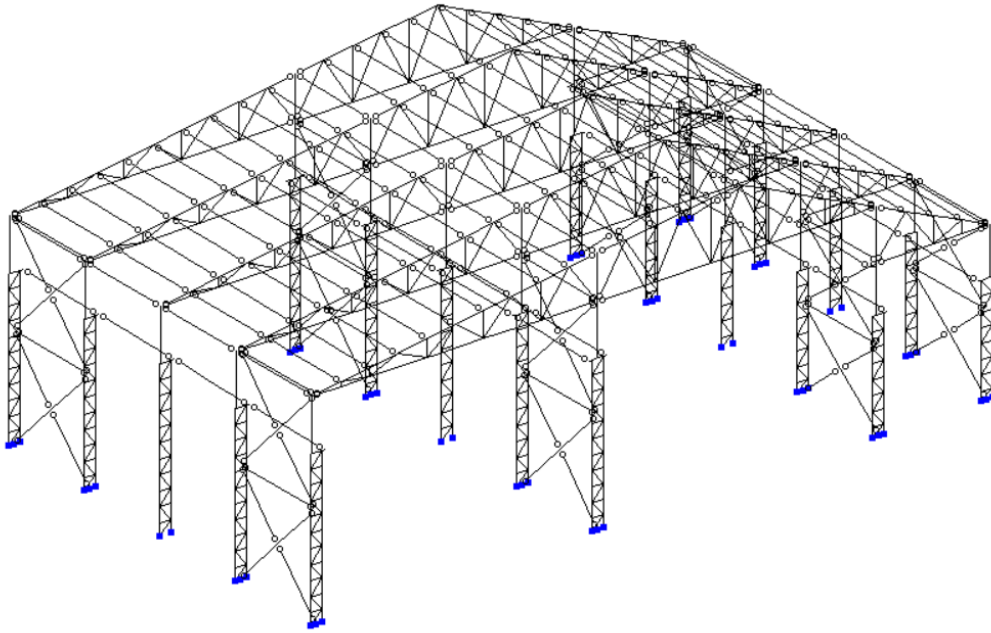


Рис. 2. Скінченно-елементна модель виробничої будівлі

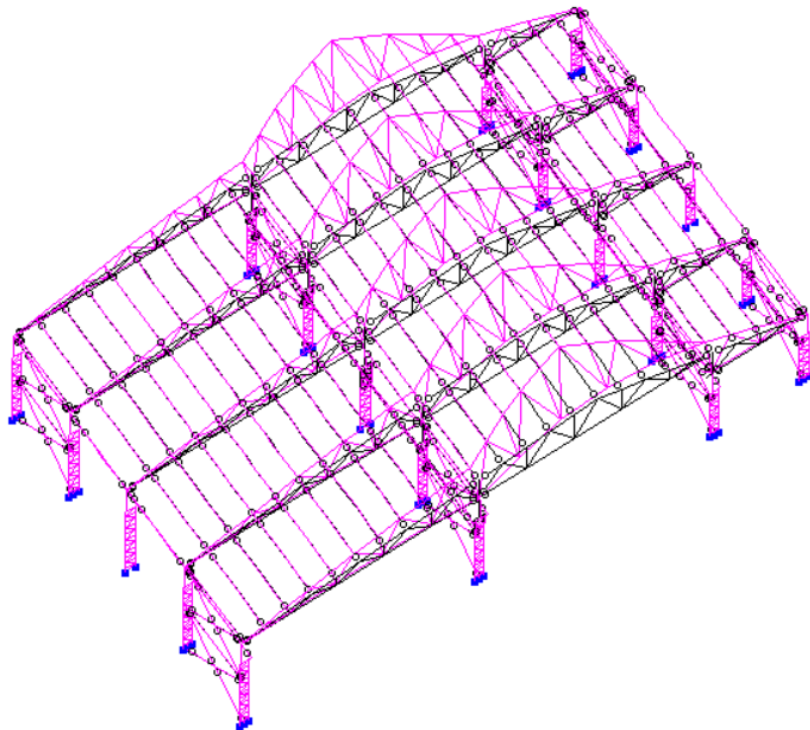


Рис. 3. Отримана найнижча форма коливань ферм виробничої будівлі

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

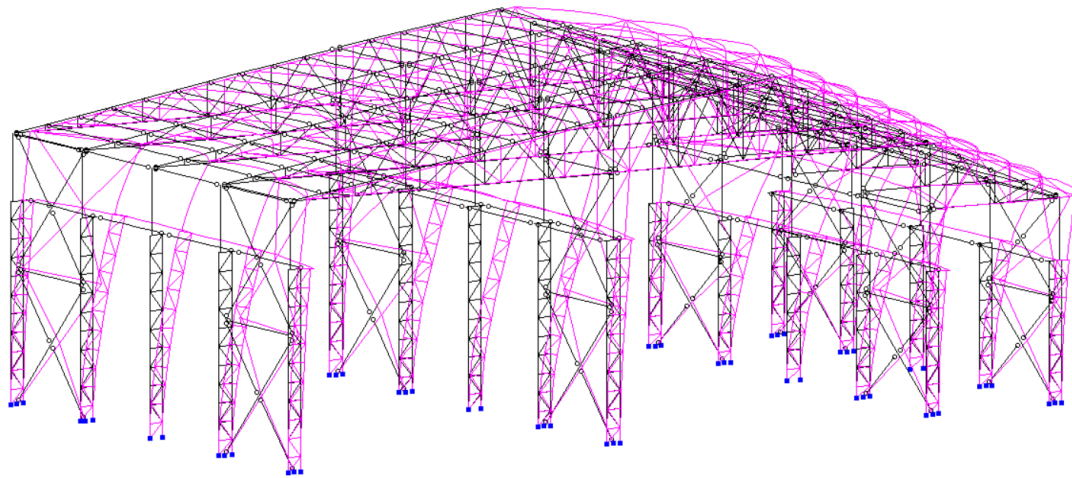


Рис. 4. Отримана найнижча форма коливань колон виробничої будівлі

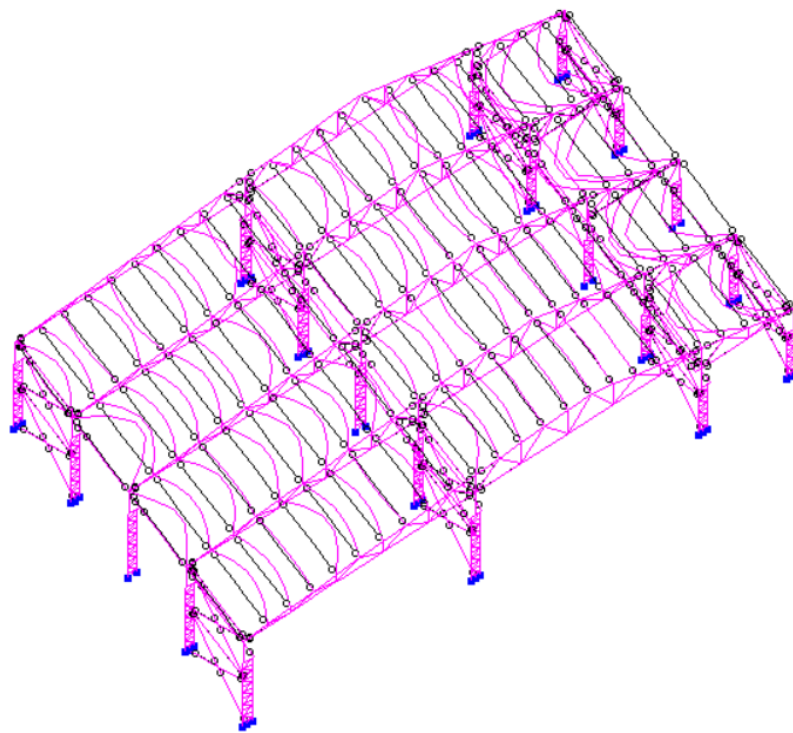


Рис. 5. Отримана найнижча форма коливань прогонів покрівлі виробничої будівлі

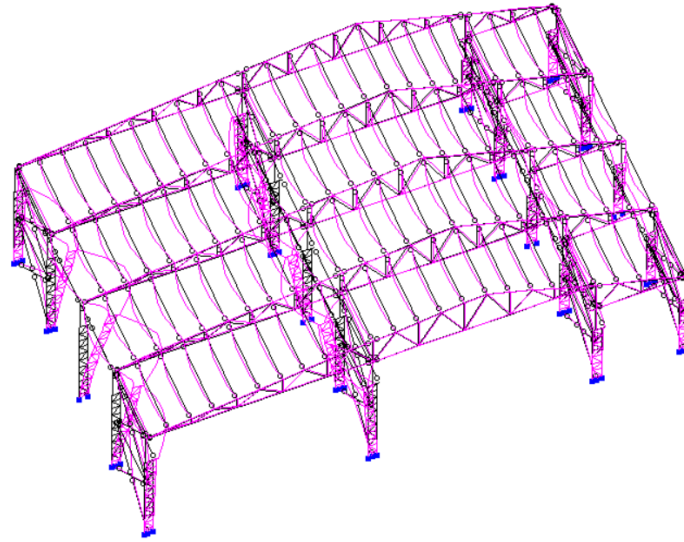


Рис. 6. Отримана найнижча форма коливань підкранових балок виробничої будівлі

Як видно з отриманих даних, частотний спектр перебуває в доволі небезпечному для людини діапазоні, який представлений в табл. 2 за даними роботи [7]. При цьому вплив на нього всіх розглянутих факторів – довжини будівлі, характеру з'єднання з фундаментом і жорсткості конструктивних елементів – є доволі незначним.

Таблиця 2

Власний частотний спектр людини (Гц)

№	Орган людини	Резонансна частота
1	Вестибулярний апарат	0,5–13
2	Шлунок	2–3
3	Кишечник	2–4
4	Тулуб	2–5
5	Серце	4–6
6	Нирки	6–8
7	Голова	20–30
8	Очні яблука	60–90

Найбільш небезпечною виявилась форма коливань колон виробничої будівлі, яка фактично залучає до роботи весь конструктивний каркас. Частота таких коливань також є найнебезпечнішою. Тому на *четвертій стадії* досліджень була розглянута більш детально стабілізація саме цієї форми.

З усіх сучасних методів стабілізації відповідно до роботи [8] для умов досліджуваної виробничої будівлі найбільш ефективним є конструктивний. Автори розробили та перевірили спосіб стабілізації «на основу» за допомогою гнучких канатів – рис. 7.

При цьому власна парціальна частота коливань підвищилась до 5,136 Гц, що зменшило її потенційний вплив на людину. Отримана нова форма коливань для цього випадку наведена на рис. 8.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

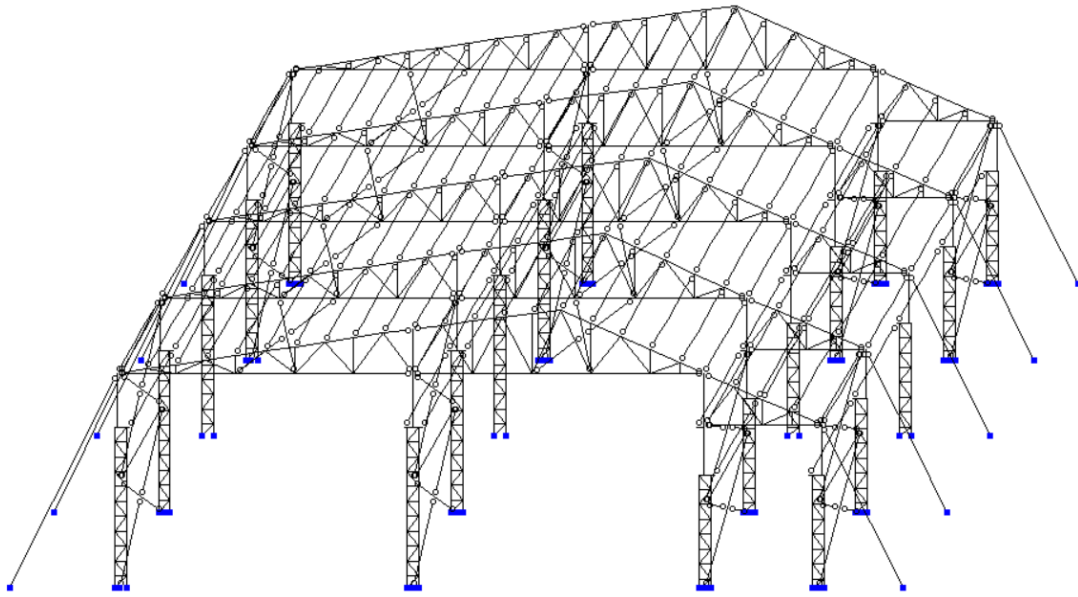


Рис. 7. Скінченно-елементна модель виробничої будівлі з додатковими канатами для стабілізації «на основу»

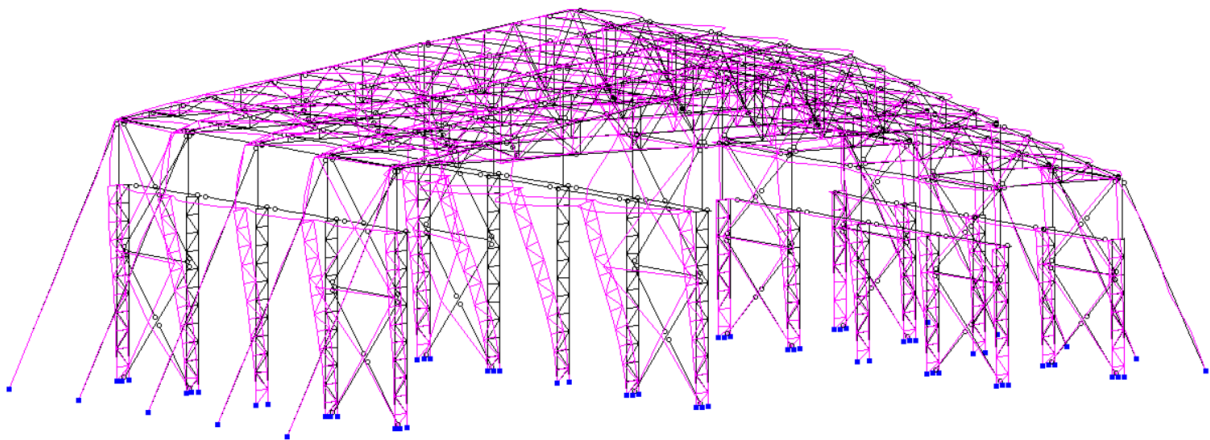


Рис. 8. Отримана форма коливань виробничої будівлі з додатковими канатами для стабілізації «на основу»

Наукова новизна та практична значимість

Представлені в публікації результати досліджень дозволяють оцінити спектр власних динамічних характеристик одноповерхових багатопрогонних неопалюваних виробничих будівель із традиційним конструктивним рішенням сталевих каркасів. Оскільки отриманий діапазон власних динамічних характеристик виробничої будівлі досліджуваного типу виявляється

доволі небезпечним для здоров'я людини, автори розробили спосіб зсуення частотного спектра в більш безпечну зону. Він полягає у застосуванні стабілізації найбільш несприятливої форми коливань колон виробничої будівлі «на основу» за допомогою гнучких канатів. Ефективність цього рішення була підтверджена в ході виконаних досліджень.

Також слід зазначити, що розглянута конструктивна пропозиція виявляється доволі простою з точки зору практичної реалізації і може

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бути застосована не тільки для виробничих будівель зі сталевим несучим каркасом, а й для інших типів наявних каркасних будівель, зокрема цивільного або сільськогосподарського призначення.

Висновки

На підставі викладеного в публікації матеріалу можна зробити наступні висновки:

1. Спектр власних динамічних характеристик одноповерхової виробничої неопалюваної будівлі з несучим сталевим каркасом є доволі щільним і для нижніх частот (до 30 Гц) представлений для всіх основних конструктивних елементів. Це потенційно небезпечно для здо-

ров'я людини, оскільки отриманий спектр доволі точно співпадає зі спектром резонансних характеристик людини.

2. Вплив на власні динамічні характеристики виробничої будівлі розглядуваного типу таких факторів, як довжина будівлі, характер з'єднання з фундаментом, а також жорсткості конструктивних елементів, є доволі незначним.

3. Для стабілізації найбільш несприятливої форми коливань каркасу розглядуваної виробничої будівлі запропоновано та перевірено чисельними розрахунками спосіб стабілізації «на основу» за допомогою гнучких канатів. Він також дозволяє зсунути відповідний частотний спектр у більш безпечну зону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банніков Д. О. Оцінка практичної збіжності результатів аналізу пластинчастих моделей в методі скінчених елементів. *Нові технології в будівництві*. 2017. № 32. С. 26–31.
2. Банников Д. О., Гуслистая А. Э. Оценка сходимости напряжений в сложных металлоконструкциях методом конечных элементов. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 4. С. 93–96.
3. Буга П. Г. *Гражданские, промышленные и сельскохозяйственные здания* : монография. Москва : Книга по требованию, 2013. 349 с.
4. *ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України*. [Чинний від 2007-01-02]. Вид. офіц. Київ : Мін. буд-ва, арх-ри та ЖКГ України, 2006. 84 с.
5. *ДБН В.1.2-2-2006 (зі змінами). Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування*. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держбуд, 2007. 70 с.
6. *ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування*. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон, 2014. 205 с.
7. Казакевич М. И., Кулябко В. В. *Введение в виброэкологию зданий и сооружений* : монография. Днепропетровск : ПГАСА, 1996. 200 с.
8. Казакевич М. И. Проблемы стабилизации вант. *Металлические конструкции*. 2011. Т. 17. № 2. С. 63–84.
9. Редченко В. П. *Динамічні випробування мостів. Частина 1 : Загальні положення, спектральний аналіз, динамічні характеристики* : монография. Дніпро : Пороги, 2016. 216 с.
10. Редченко В. П. *Динамічні випробування мостів. Частина 2 : Вільні коливання, модальний контроль* : монография. Дніпро : Пороги, 2017. 216 с.
11. Стрелец–Стрелецкий Е. Б., Журавлев А. В., Водопьянов Р. Ю. *ЛИРА–САПР. Книга 1 : Основы* : монография / под ред. А. С. Городецкого. Киев : LIRALAND, 2019. 154 с.
12. Bofang Z. *The Finite Element Method. Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*. Singapore : John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2018. 843 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323>
13. Johnson R. P. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings* : monograph. Wiley Blackwell, 2018. 265 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119401353>
14. Kruhlikova N. G., Bannikov D. O. Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 144–152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853>
15. Neduzha L. O., Shvets A. O. Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 131–147. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457>

16. Shames I. H. *Energy and Finite Element Methods In Structural Mechanics* : monograph. New York : Routledge, 2017. 776 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203757567>
17. Singiresu S. R. *The Finite Element Method in Engineering* : monograph. Elsevier Inc, 2018. 763 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2016-0-01493-6>

Д. В. РОЗУМЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}

¹ Фак. «Промышленное и гражданское строительство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 681 68 38, эл. почта dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417

^{2*} Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОДНОЭТАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

Цель. В последнее время в Украине растет спрос на повторное использование промышленных зданий, которые на протяжении определенного периода времени не пребывали в эксплуатации. При этом нередки случаи, когда новое технологическое оборудование передает на существующие конструкции значительные динамические нагрузки на протяжении длительного времени. Поскольку данные относительно динамических свойств производственных зданий на сегодня практически отсутствуют, основной целью нашего исследования является оценка собственных динамических характеристик одноэтажного производственного здания. **Методика.** Для достижения поставленной цели необходимо было сначала избрать тип производственного здания, который является достаточно распространенным для сформулированных условий возможности повторного использования. В качестве такого здания было принято одноэтажное трехпролетное неотапливаемое производственное здание (пролеты 15 + 15 + 6 м) со стальным несущим каркасом. В ходе исследований варьировались сечения основных несущих элементов, а также схемы их соединения между собой. Расчеты выполнены методом конечных элементов на базе проектного комплекса Lira for Windows. **Результаты.** Полученные частотные спектры собственных динамических характеристик основных несущих конструктивных элементов для производственного здания рассматриваемого типа находятся в диапазоне до 30 Гц. Также в ходе исследований получены зависимости для изменения этого диапазона для различных случаев проектно-конструкторских решений здания. **Научная новизна.** Представленные в публикации результаты исследований позволяют оценить спектр собственных динамических характеристик одноэтажных многопролетных неотапливаемых производственных зданий с традиционным конструктивным решением стального каркаса. **Практическая значимость.** Полученный диапазон собственных динамических характеристик производственного здания рассматриваемого типа оказывается достаточно опасным для здоровья человека. Наиболее неблагоприятной является форма колебаний колонн, которая фактически вовлекает в работу весь конструктивный каркас. Поэтому в ходе исследований был разработан и проверен специальный способ стабилизации таких колебаний «на основании» с помощью гибких канатов.

Ключевые слова: производственное здание; модальный анализ; динамические характеристики; метод конечных элементов; комплекс Lira for Windows

D. V. ROZUMENKO¹, D. O. BANNIKOV^{2*}

¹Fac. «Industrial and Civil Engineering», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 681 68 38, e-mail dmitriy.rozumenko.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-6058-9417

^{2*}Dep. «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

DYNAMIC PROPERTIES OF ONE-STOREY INDUSTRIAL BUILDING

Purpose. Recently, there has been a growing demand in Ukraine for the reuse of industrial buildings that have not been in exploitation for a certain period of time. At the same time, there are frequent cases when new technological equipment transfers significant dynamic loads to existing structures over a long period of time. Since the available data regarding the dynamic properties of industrial buildings are now practically absent, the main goal of the studies made by the authors is to evaluate and analyze own dynamic characteristics of a one-storey industrial building. **Methodology.** To achieve this goal, it was necessary first to choose the type of industrial building, which is common enough for the formulated conditions of the reuse possibility. A one-storey unheated industrial building with three purlins (purlins 15 + 15 + 6 m) with a steel supporting frame was taken as such a building. In the course of research, the cross sections of the main load-bearing elements were varied, as well as the schemes of their connection with each other. The calculations were carried out by the finite element method based on the Lira for Windows project complex. **Findings.** The obtained frequency spectra of the own dynamic characteristics for the main bearing structural elements of an industrial building of the type in question are in the range up to 30 Hz. Also, during the research, dependencies were obtained for changing this range for various cases of design decisions of the building. **Originality.** The research results presented in the publication make it possible to evaluate the range of the own dynamic characteristics of single-storey multipurlined unheated industrial buildings with the traditional structural solution of the steel frame. **Practical value.** The resulting range of the own dynamic characteristics of the industrial building of the type in question is quite dangerous for human health. The most unfavorable is the oscillation form of the columns, which actually involves the entire structural frame. Therefore, in the course of research, a special method was developed and tested to stabilize such vibrations «on the base» using flexible ropes.

Keywords: industrial building; modal analysis; dynamic characteristics; finite element method; complex Lira for Windows

REFERENCES

1. Bannikov, D. O. (2017). Ocinka praktychnoji zbzhnosti rezul'tativ analizu plastynchastykh modelej v metodi skinchenykh elementiv. *New Technologies in Construction*, 32, 26-31. (in Ukrainian)
2. Bannikov, D. O., & Huslista, G. E. (2011). Otsenka skhodimosti napryazheniy v slozhnykh metallokonstruktsiyakh metodom konechnykh elementov, *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 93-96. (in Russian)
3. Buga, P. G. (2013). *Grazhdanskie, promyshlennye i selskokhozyaystvennye zdaniya: monografiya*. Moscow: Kniga po trebovaniyu. (in Russian)
4. *Zakhyst vid nebezpechnykh gheologichnykh procesiv, shkidlyvykh ekspluatatsijnykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytvo u seismichnykh rajonakh Ukrainy*, 84 DBN B. 1.1-12:2006 (2006). (in Ukrainian)
5. *Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia*, 70 DBN B.1.2-2:2006 (2007). (in Ukrainian)
6. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*, 205 DBN B.2.6-198:2014 (2014). (in Ukrainian)
7. Kazakevitch, M. I., & Kuljabko, V. V. (1996). *Vvedenie v vibroekologiyu zdaniy i sooruzheniy: monografiya*. Dnepropetrovsk, PGASA. (in Russian)
8. Kazakevitch, M. I. (2011). Problems of cable stabilization. *Metall Structures*, 17(2), 63-84. (in Russian)
9. Redchenko, V. P. (2016). *Dynamichni vyprovuvannja mostiv. Zahaljni polozhennja, spektralnyj analiz, dynamichni kharakterystyky: monoghrafija. Part 1*. Dnipro, Porogi. (in Ukrainian)
10. Redchenko, V. P. (2017). *Dynamichni vyprovuvannja mostiv. Viljni kolyvannja, modalnyj kontrolj: monoghrafija. Part 2*. Dnipro, Porogi. (in Ukrainian)
11. Strelec-Streleckij, E. B., Zhuravlev, A. V., & Vodop'janov, R. Ju. (2019). *LIRA-SAPR. Kniga I. Osnovy*. Kiev: LIRALAND. (in Russian)
12. Bofang, Z. (2018). *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119107323> (in English)
13. Johnson, R. P. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. Wiley Blackwell. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119401353> (in English)
14. Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Science and Transport Progress*, 2(80), 144-152. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165853> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

15. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2018). Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Science and Transport Progress*, 1(73). 131-147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457> (in English)
16. Shames, I. H. (2017). *Energy and Finite Element Methods In Structural Mechanics*. New York: Routledge.
DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203757567> (in English)
17. Singiresu, S. R. (2018). *The Finite Element Method in Engineering: 6th Edition*. Elsevier Inc.
DOI: <https://doi.org/10.1016/c2016-0-01493-6> (in English)

Надійшла до редколегії: 18.09.2019

Прийнята до друку: 20.01.2020