

УДК 539.3:69.002.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.183264

## **ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНДАМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ**

**Вабищевич М. О., Дедов О. П., Глітін О. Б.**

## **ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Вабищевич М. О., Дедов О. П., Глитин А. Б.**

## **NUMERICAL-EXPERIMENTAL RESEARCH OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOUNDATIONS IN DYNAMIC IMPACT CONDITIONS**

**Vabischevich M., Dedov O., Glitin O.**

*При проектуванні нових виробничих цехів чи реконструкції існуючих гостро постає питання врахування не тільки всіх статичних навантажень, але і можливих динамічних впливів, викликаних нестаціонарною роботою технологічного обладнання. В роботі на прикладі обстеження технічного стану виробничої будівлі, конструкції якої зазнають динамічного впливу від дії технологічного обладнання, розглянуто експериментально-чисельний підхід до моделювання розрахункової ситуації, визначення причин виникнення деформацій та вибору способу підсилення. Об'єктом досліджень є процес динамічного деформування окремо розташованого фундаменту технологічного обладнання – деревообробного верстату, в умовах діючого виробництва. Дослідження направлено на пошук конструктивного вирішення проблеми передачі вібрацій від двигунів верстату через власний фундамент та ґрунтову основу на фундаменти та несучі елементи споруди виробничого цеху. Основна ідея експериментально-чисельного підходу – це порівняння результатів чисельних та натурних вимірів параметрів коливань. Чисельний аналіз виконаний на основі скінчено-елементного розрахунку за допомогою сучасних програмних комплексів, натурні виміри – це записані за допомогою сейсмографа віброграми, на основі яких побудовані спектри коливань споруди, за якими визначені домінуючі частоти коливань. Явища внутрішнього резонансу споруди, виявлені на основі порівнянь результатів, дозволили чітко сформулювати причини появи тріщин в конструктивних елементах.*

*Результати досліджень використані при проектуванні нової та відновленні існуючих баз технологічного устаткування під час капітального ремонту споруди цеху та технічного переоснащення виробництва.*

*Застосування експериментально-чисельного підходу для аналізу вихідних даних при проектуванні чи реконструкції споруд, за наявності нестаціонарних*

вібродинамічних навантажень, дозволяє побудувати математичну модель максимально наближену до реальної. Отримані результати досліджень можуть бути використані при розробці методик і технологій діагностування несучих і огорожувальних конструкцій споруд, що перебувають під впливом динамічного навантаження.

**Ключові слова:** обстеження споруди, вібраційна діагностика, власні частоти коливань, тріциноутворення, динамічне навантаження, скінченно-елементна модель.

При проектировании новых производственных цехов или реконструкции существующих остро стоит вопрос учета не только всех статических нагрузок, но и возможных динамических воздействий, вызванных нестационарной работой технологического оборудования. В работе на примере обследования технического состояния производственного здания, конструкции которого подвергаются динамическому воздействию от действия технологического оборудования, рассмотрен экспериментально-численный подход к моделированию расчетной ситуации, определению причин возникновения деформаций и выбора способа усиления. Объектом исследований является процесс динамического деформирования отдельно расположенного фундамента технологического оборудования – деревообрабатывающего станка, в условиях действующего производства. Исследование направлено на поиск конструктивного решения проблемы передачи вибраций от двигателей станка через собственный фундамент и грунтовую основу на фундаменты и несущие элементы здания производственного цеха. Основная идея экспериментально-численного подхода – это сравнение результатов численных и натурных измерений параметров колебаний. Численный анализ выполнен на основе конечно-элементного расчета с помощью современных программных комплексов, натурные измерения – это записанные с помощью сейсмографа виброграммы, на основе которых построены спектры колебаний сооружения, по которым определены доминирующие частоты колебаний. Явления внутреннего резонанса сооружения, обнаруженные на основе сравнений результатов, позволили четко сформулировать причины появления трещин в конструктивных элементах.

Результаты исследований использованы при проектировании новой и восстановлении существующих баз технологического оборудования во время капитального ремонта сооружения и технического переоснащения производства.

Применение экспериментально-численного подхода для анализа исходных данных при проектировании или реконструкции сооружений, при наличии нестационарных вибродинамических нагрузок, позволяет построить математическую модель максимально приближенную к реальной. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке методик и технологий диагностирования несущих и ограждающих конструкций сооружений, находящихся под воздействием динамической нагрузки.

**Ключевые слова:** *обследование сооружения, вибрационная диагностика, собственные частоты колебаний, трещинообразования, динамическая нагрузка, конечно-элементная модель.*

## **1. Вступ**

При проектуванні нових виробничих цехів чи реконструкції існуючих гостро постає питання врахування не тільки всіх статичних навантажень, але і можливих динамічних впливів, викликаних нестаціонарною роботою технологічного обладнання. Передача технологічних навантажень, в т. ч. і динамічної складової може відбуватися як через наземні елементи каркасу (балкові клітки, плити перекриття), так і через ґрунтову основу. У випадку проектування фундаментів під нове технологічне устаткування, в умовах діючого виробництва, означена задача значно ускладнюється, оскільки істотно зростає кількість невідомих у вихідних даних.

Вивченню динамічної поведінки будівельних конструкцій під впливом зовнішніх факторів присвячено ряд робіт. Так, в роботі [1] наведені результати вимірювань динамічних впливів та чисельних розрахунків систем віброізоляції. В роботі [2] запропонований метод оцінки впливу вібрації залізничної дороги на прилеглу забудову та поширення такої вібрації через ґрунтовий масив. В роботі [3] представлені результати чисельного дослідження антивібраційного бар'єру, що застосовується для зниження динамічного впливу на фундаменти історичної будівлі від руху транспорту, запропонована модель та методика врахування динамічних параметрів споруди та віброгасника. Експериментальні дослідження на основі вимірювань прискорень наведені у роботі [4]. На основі побудованого спектру коливань визначаються власні частоти коливань. Викладена методика може бути використана при дослідженні більш складних динамічних систем [5]. Вимірювання динамічних характеристик систем з метою діагностики та моніторингу існуючих дефектів у металоконструкціях представлені в роботі [6]. Подана методика застосування експериментальних досліджень вібрації та їх обробка. Запропоновано вдосконалення розрахункової моделі на основі отриманих динамічних характеристик. У роботі [7] подано застосування методу до нелінійних систем контролю активної вібрації. За відомостями авторів даний метод дозволяє отримати результат без суттєвих знань про дисипативні властивості системи, що звісно дає переваги і скорочення часу на дослідження. Щодо засобів вимірювання, то можна застосовувати різного типу датчики. Так, в роботі [8] застосовують датчики вимірювання прискорення. Дистанційне вимірювання наведене в роботі [9] базується на застосуванні лазерних та оптичних приладів. А застосування датчика коливань на основі оптичного волокна пропонується в роботі [10].

Зважаючи на значну кількість публікацій та широке коло задач, які в них розглядаються, вивчення поведінки будівельних конструкцій під впливом динамічного навантаження є актуальним напрямком як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

Об'єктом досліджень, наведених в поточній роботі, є процес динамічного деформування окремо розташованого фундаменту технологічного обладнання – деревообробного верстату, в умовах діючого виробництва.

Метою роботи є пошук конструктивного вирішення проблеми передачі вібрацій від двигунів верстату через власний фундамент та ґрунтову основу на фундаменти та несучі елементи споруди виробничого цеху.

## 2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження виконувались в умовах експлуатації будівельного об'єкту – споруди виробничого цеху, під час проведення інструментального обстеження її технічного стану. Основна задача технічного обстеження полягала у визначенні причини виникнення тріщин (в тому числі наскрізних) в зовнішніх та внутрішніх поздовжніх стінах. Під час обстеження було виявлено значні вібраційної дії від технологічного устаткування (мотальні станки дерев'яної стружки) на несучі елементи споруди.

Будівля, що обстежувалася, одноповерхова, в плані прямокутної форми з габаритними розмірами 53.865×17.70 м. Висота будівлі до нижнього поясу балок покриття складає 4.535–5.10 м. За конструктивною системою споруда стінова з поздовжніми несучими стінами, підсиленими пілястрами, на які опираються збірні залізобетонні таврові балки, поверх яких влаштовані ребристі плити покриття. Фундаменти – стрічкові, вирішені зі збірних фундаментних стінових блоків. Основа представлена глинистими лесовими ґрунтами.

Для проведення робіт по вимірюванню та отриманню реальних значень коливань різних точок споруди використовувався сейсмограф ZET 048С (Росія), технічні дані якого наведені у табл. 1.

Виконання досліджень полягало у експериментальному вимірюванні параметрів руху елементів несучих конструкцій в реальному часі з подальшою їх обробкою та визначенням динамічних характеристик таких елементів та споруди в цілому.

У якості динамічного критерію для оцінки стану несучих конструкцій були використані значення власних частот коливань.

Таблиця 1

Технічні характеристики акселерометра ZET 048С

Тип датчиків	диференціальні
Число вимірюваних координат	3 (X, Y, Z)
Параметр вимірювання	віброприскорення
Робочий діапазон, Гц	від 0.3 до 400
Чутливість	не більше $10^{-5}$ м/с <sup>2</sup>
Основна відносна похибка, %	не більше $\pm 10$
Робоча температура, °С	від -30 до +50

Для визначення динамічних параметрів обрані шість точок контролю, перелік яких наведений в табл. 2.

Таблиця 2

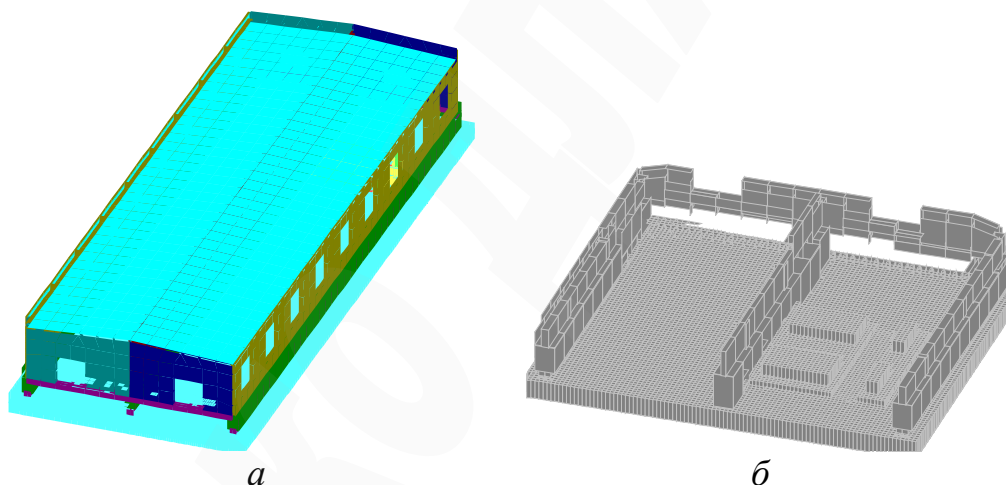
## Розташування точок контролю статичного моніторингу

Точка контролю	Розташування точки контролю	Опис конструктивного елемента	Кількість датчиків вимірювання	Параметр, що підлягає контролю
T1K1	3-Б	Фундамент технологічного устаткування	3 (X, Y, Z)	Віброприскорення
T1K2	2-Б	Колона центр 1	3 (X, Y, Z)	
T1K3	9-Б	Колона центр 2	3 (X, Y, Z)	
T1K4	2-В	Колона центр 3	3 (X, Y, Z)	
T1K5	3-А	Колона цех 1	3 (X, Y, Z)	
T1K6	3-Б	Колона цех 1	–	

Зареєстровані віброграми коливань споруди у точках контролю підлягали обробці за допомогою програмного забезпечення ZETLAB SEISMO за допомогою спектрального аналізу методом дискретного перетворення Фур'є.

Отримані спектри були проаналізовані з метою визначення числових значень частот коливань, які відповідають основним пікам на спектрограмах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела вібрації.

Розрахункова скінчено-елементна модель споруди (далі СЕМ) прийнята відповідно до відомих правил будівельної механіки з урахуванням наявності фундаментів технологічного обладнання (рис. 1). Апроксимація ґрунтового масиву виконана з використанням просторових 8-вузлових скінчених елементів типу № 276.



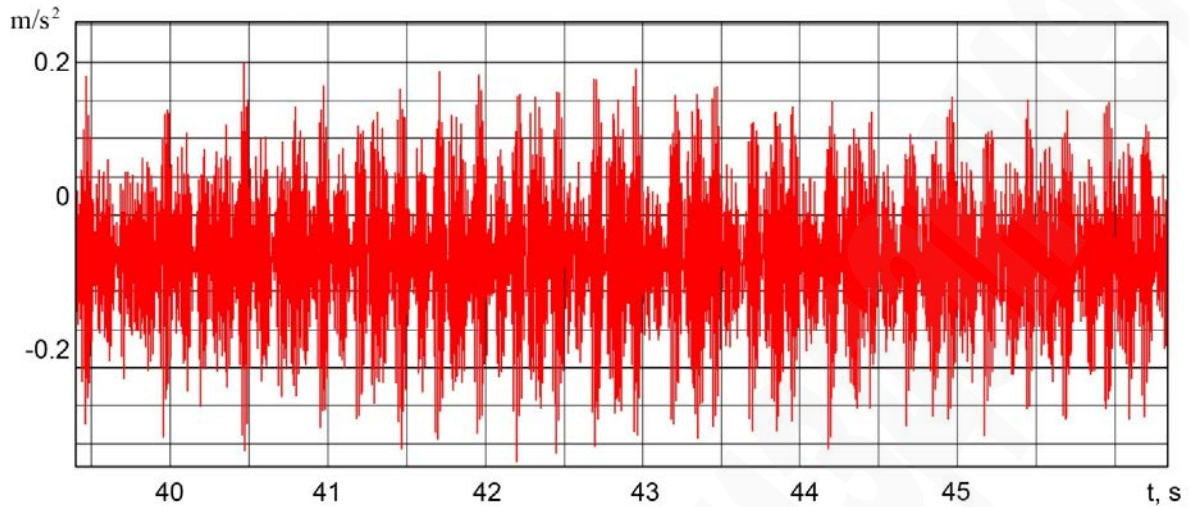
**Рис. 1.** Скінченоелементна модель (СЕМ) споруди виробничого цеху:  
*а* – загальний вигляд будівлі; *б* – фрагмент СЕМ з фундаментом обладнання

Статичний та модальний аналіз конструкцій виконаний у нелінійній постановці з використанням обчислювальних комплексів «Scad Office» та «Лира САПР», що базується на використанні методу скінчених елементів.

### 3. Результати дослідження та обговорення

В ході натурних вимірювань вібрацій конструкцій були отримані віброграми коливань (рис. 2) у контрольних точках. Зафіксовані коливання

показують, що інтенсивність вібродії на конструкцію зростає зі зменшенням відстані до джерел технологічного впливу.

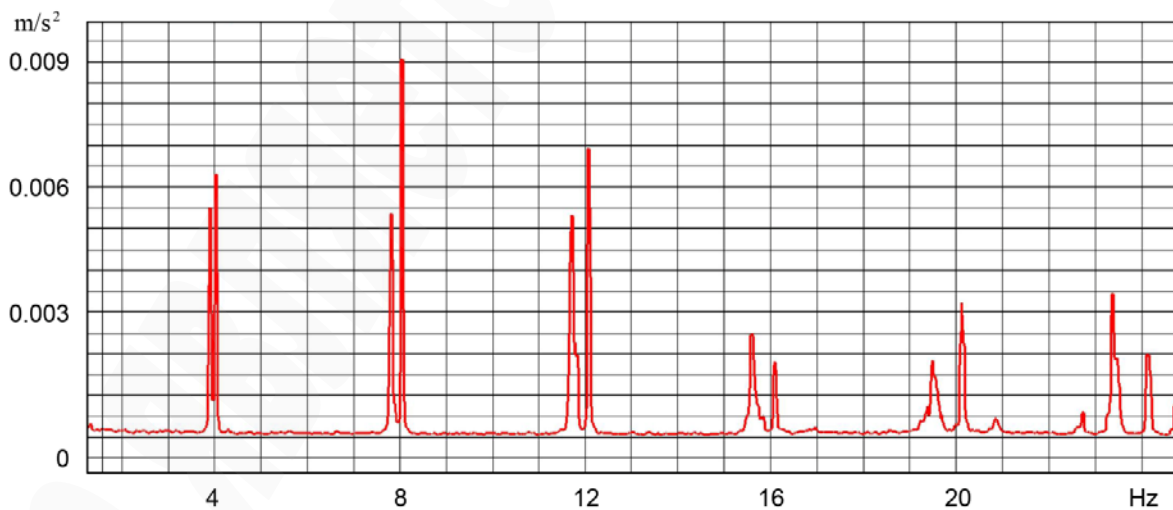


**Рис. 2.** Віброграма коливань точка контролю Т1К1

Отримані спектри були проаналізовані з метою визначення числових значень частот коливань, які відповідають основним пікам на спектрограмах та є наслідком відгуку конструкції на зовнішні джерела вібрації.

В результаті аналізу віброграм отримані спектральний розподіл частот коливань у кожній точці контролю.

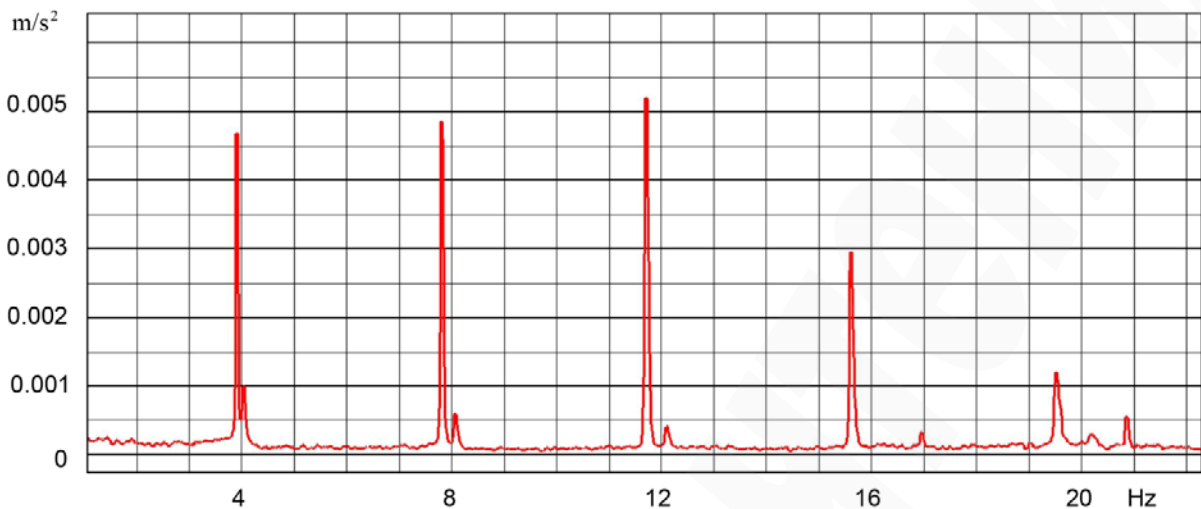
Так, у точці контролю Т1К1 (фундаменти технологічного обладнання) у діапазоні частот від 0 до 15 Гц можна виділити ряд піків (рис. 3), які відповідають частотам коливань 3.90, 4.02, 7.81, 8.06 та 11.73 і 12.08 Гц, відповідно. Враховуючи безпосередню близькість точки контролю до джерел віброзбудження можна стверджувати, що динамічний вплив на каркас несучих конструкцій характеризується саме цими значеннями частот коливань.



**Рис. 3.** Спектр частот коливань Т1К1 у діапазоні частот від 0 до 20 Гц

Спектр коливань у точці контролю Т1К2 (центральна залізобетонна колона несучого каркасу споруди) має чітко виражені піки частот, значення яких

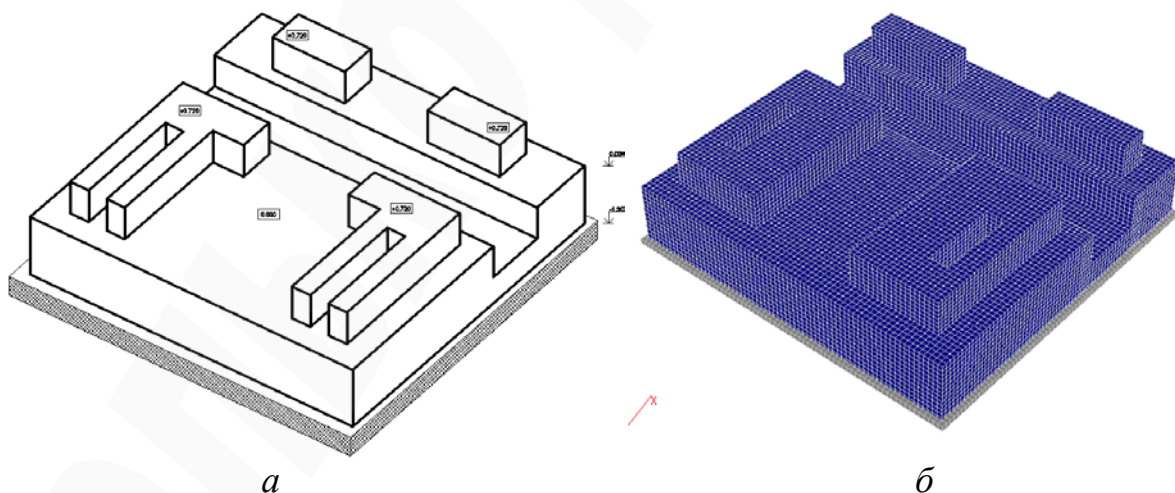
відповідно 3.90 та 4.02 Гц (рис. 4). Очевидно, що саме ці значення частот і є причиною виникнення коливань та процесу тріщиноутворення стіни, окрім цього чітко виділяються супергармоніки цих піків: частоти коливань 7.81, 8.06 Гц та 11.73 і 12.08 Гц, відповідно.



**Рис. 4.** Спектр частот коливань ГІК2 у діапазоні частот від 0 до 20 Гц

За результатами розрахунків виявлено, що частоти 3-ї форми власних коливань (3.67 Гц) фактично співпадають з вимушеними. Саме ці значення частот призвели до виникнення близького до резонансного режиму коливань конструкції стіни промислової споруди.

За результатами чисельно-експериментальних досліджень була запроєктована нова конструкція технологічного фундаменту – масивна, складного перерізу залізобетонна плита, з розмірами в плані 6850x7000 мм (рис. 5). Фундамент запроєктовано для розміщення двох деревообробних верстатів, параметри динамічного впливу від роботи яких обчислені на основі натурних вимірів.



**Рис. 5.** Конструкція фундаменту технологічного обладнання: а – графічна просторова модель; б – скінченоелементна модель з використанням об'ємних скінченних елементів

Динамічний розрахунок конструкції виконаний з використанням двох методів – на основі розкладу за власними формами коливань та прямим інтегруванням рівняння руху. СЕМ фундаменту побудована з використанням об'ємних 8-и вузлових скінченних елементів (СЕ). Отримані значення частот власних коливань перших 10 форм (від 0.5 до 1.5 Гц) вказують на відсутність загрози виникнення близького до резонансного режиму коливань. За допомогою прямого методу інтегрування рівняння руху обчислений напружено-деформований стан конструкції та підібрані відповідні параметри армування з урахуванням наявності динамічного впливу.

#### **4. Висновки**

За результатами вимірювання динамічних параметрів руху несучих елементів споруди виробничого цеху при дії технологічного обладнання визначені частоти коливань 3.90 та 4.02 Гц. Порівняння результатів чисельного модального аналізу споруди з даними натурних вимірів засвідчив наявність режиму роботи близького до резонансного, що і стало причиною появи та розповсюдження тріщин в стінах будівлі (рис. 1).

Результати чисельно-експериментального дослідження існуючого фундаменту технологічного обладнання були використані для СЕ-моделювання конструкції нового фундаменту під аналогічне устаткування.

#### **Література**

1. Vladimir, S. (2017). Numerical Estimation of Precision Equipment Vibration Isolation System. *Procedia Engineering*, 176, 363–370. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.333>
2. Connolly, D. P., Kouroussis, G., Giannopoulos, A., Verlinden, O., Woodward, P. K., Forde, M. C. (2014). Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58, 37–47. doi: <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.12.003>
3. Cacciola, P., Banjanac, N., Tombari, A. (2017). Vibration Control of an existing building through the Vibrating Barrier. *Procedia Engineering*, 199, 1598–1603. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.065>
4. Kavyanpoor, M., Shokrollahi, S. (2019). Dynamic behaviors of a fractional order nonlinear oscillator. *Journal of King Saud University – Science*, 31 (1), 14–20. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.006>
5. Giagopoulos, D., Arailopoulos, A., Dertimanis, V., Papadimitriou, C., Chatzi, E., Grompanopoulos, K. (2017). Computational Framework for Online Estimation of Fatigue Damage using Vibration Measurements from a Limited Number of Sensors. *Procedia Engineering*, 199, 1906–1911. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.424>
6. Bendjama, H., Bouhouche, S., Boucherit, M. S. (2012). Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2 (1), 82–87. doi: <http://doi.org/10.7763/ijmlc.2012.v2.93>
7. Yamamoto, G. K., da Costa, C., da Silva Sousa, J. S. (2016). A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in



rotating machinery. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, 4, 8–18. doi: <http://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.07.001>

8. Jia, Y., Seshia, A. A. (2014). An auto-parametrically excited vibration energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220, 69–75. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.012>

9. Lezhin, D. S., Falaleev, S. V., Safin, A. I., Ulanov, A. M., Vergnano, D. (2017). Comparison of Different Methods of Non-contact Vibration Measurement. *Procedia Engineering*, 176, 175–183. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.286>

10. Gianti, M. S., Prasetyo, E., Wijaya, A. D., Berliandika, S., Marzuki, A. (2017). Vibration Measurement of Mathematical Pendulum based on Macrobending-Fiber Optic Sensor as a Model of Bridge Structural Health Monitoring. *Procedia Engineering*, 170, 430–434. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.069>

*When designing new production workshops or reconstructing existing ones, the urgent issue is to take into account not only all static loads, but also possible dynamic effects caused by unsteady operation of technological equipment. In the work, on the example of examining the technical condition of an industrial building, the structures of which are subjected to dynamic effects from the action of technological equipment, an experimental-numerical approach to modeling the design situation, determining the causes of deformations and choosing a reinforcement method are considered. The object of research is the process of dynamic deformation of a separately located foundation of technological equipment – a woodworking machine, in the conditions of existing production. The research is aimed at finding a constructive solution to the problem of transferring vibrations from the machine’s engines through its own foundation and soil base to the foundations and load-bearing elements of the building of the production workshop. The main idea of the experimental-numerical approach is a comparison of the results of numerical and field measurements of vibration parameters. Numerical analysis is performed on the basis of finite element calculation using modern software systems, field measurements are vibration records recorded using a seismograph, based on which the vibration spectra of the structure are constructed, from which the dominant vibration frequencies are determined. The phenomena of the internal resonance of the structure, discovered on the basis of comparisons of the results, make it possible to clearly formulate the causes of cracks in the structural elements.*

*The research results are used in the design of new and restoration of existing bases of technological equipment during the overhaul of the construction of the workshop and technical re-equipment of production.*

*The application of an experimental-numerical approach for the analysis of initial data in the design or reconstruction of structures, in the presence of unsteady vibrodynamic loads, allows to build a mathematical model as close as possible to the real one. The obtained research results can be used in the development of methods and technologies for diagnosing supporting and enclosing structures of structures under the influence of dynamic load.*

**Keywords:** *survey of the structure, vibration diagnostics, natural frequencies of vibrations, cracking, dynamic loading, finite element model.*