

УДК 69.002.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.151735

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОУТВОРЮЮЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Назаренко І. І., Дєдов О. П., Свідерський А. Т., Орищенко С. В.

1. Вступ

На сучасному етапі розвитку будівельної індустрії виникає нагальна проблема впровадження таких технологій та машин, які дають можливість забезпечити високу якість готового продукту, суттєве зменшення енерговитрат та підвищену продуктивність. Питання енергозбереження являється актуальною задачею досліджень та розробки. Важливе місце в будівельній індустрії займають вібраційні машини і процеси. За допомогою вібрації здійснюються процеси подрібнення, сортування, транспортування, перемішування та ущільнення. Як правило, такі машини проектувалися та створювалися на основі розрахункових моделей, що враховували характеристики оброблювального середовища і машини дискретними параметрами. На сьогоднішній день існує значна розбіжність існуючих фізичних та математичних моделей, які описують рух вібраційних машин і ущільнювальних середовищ. Така відсутність загальноприйнятих розрахункових моделей, що адекватно відображають реальну картину руху машини і рух оброблювального матеріалу ускладнює розробку ефективної вібраційної техніки. Поведінка металоконструкцій машин такого типу під дією динамічного навантаження досліджувалась дуже мало. Виконання експериментальних досліджень моделей є основою для створення нового класу машин з мінімізацією енергетичних витрат.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом досліджень є процес руху формуютьуючої конструкції вібраційної установки із просторовими коливаннями. Основним недоліком подібних вібросистем є відсутність даних про взаємовплив машин і середовищ.

Вібраційна установка одночасно виконує функцію форми для бетонної суміші та складається зі зварної рами коробчастого перерізу, яка встановлена на гумових пружних опорах на бетонному фундаменті. Вібраційна установка обладнана двома, не симетрично встановленими відцентровими збудниками високочастотних коливань. На рамі закріплено два незнімних борти та один рухомий борт. Для дослідження вібраційної установки була створена геометрична 3D модель, на основі якої розроблена розрахункова скінченно-елементна модель (рис. 1).

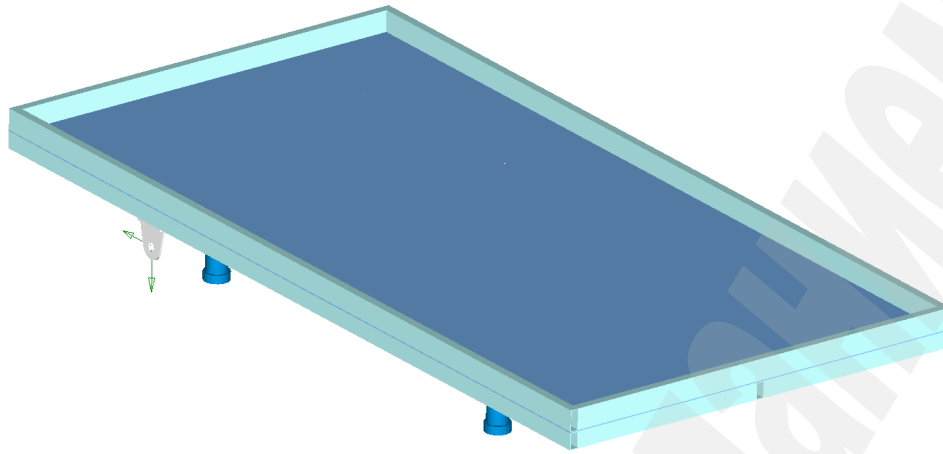


Рис. 1. Розрахункова 3D модель вібраційної установки для формування і ущільнення бетонних сумішей

Виконані попередні розрахунки були виконані з метою визначення простих та більш складних форм коливань. Вибір полягав у можливості реалізації режимів роботи з більш високими рівнями передачі енергії до оброблюваного середовища.

Найбільш цікавим питанням дослідження таких конструкцій є визначення законів передачі енергії від формоутворюючої поверхні до оброблюваного середовища. А також використання хвильових явищ у формоутворюючій поверхні при реалізації режимів роботи на основних частотах коливань.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне визначення амплітуд коливань формоутворюючої поверхні конструкції віброустановки.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Розробити експериментальну модель віброустановки з активною формоутворюючою поверхнею.
2. Оцінити основні частоти та амплітуди коливань формоутворюючої поверхні.
3. Перевірити гіпотезу про наявність хвильових явищ у формоутворюючій поверхні конструкції віброустановки.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Дослідженню вібраційних машин присвячено ряд робіт. Так, в роботі [1] запропонований підхід моделювання динамічних систем розподіленими параметрами. Наведена методика врахування не тільки пружних, а і дисипативних властивостей оброблювального в процесі коливань середовища. В роботі [2] запропонований аналітичний метод визначення впливу оброблюваного середовища на динаміку системи «машина – середовище». Отримані аналітичні залежності для оцінки впливу опору середовища при полічастотних коливаннях. В роботі [3] приводяться дослідження ударно-вібраційної машини для формування бетонних виробів. Дослідження базуються на визначенні приведеної маси і еквівалентного коефіцієнта опору бетонної суміші. В результаті отримані залежності для опису хвильових явищ у середовищі. Однак результати експериментального визначення динамічних параметрів досліджуваних установок в наве-

дених роботах відсутні. Автори роботи [4] розглядають динамічну систему, здатну до накопичення внутрішньої енергії. Явища в складних нелінійних системах, як зазначають автори, є перспективним напрямком і потребує додаткових досліджень. В роботі [5] наведені експериментальні дослідження коливальної системи за допомогою вимірювань прискорень. Дослідження базується на визначенні спектру коливань та виявленні власних частот коливань. Викладена методика може бути використана при дослідженні більш складних динамічних систем. Вимірювання динамічних характеристик систем з метою виявлення дефектів в конструктивних елементах присвячені роботи [6, 7]. В цих роботах подана методика застосування експериментальних досліджень вібрації та їх обробка. Запропоновано вдосконалення розрахункової моделі на основі отриманих динамічних характеристик. Такий підхід може бути використаний для перевірки відповідності математичної і експериментальної моделі досліджуваних складних динамічних систем [8, 9]. У роботі [10] подано застосування методу до нелінійних систем контролю активної вібрації. Як зазначають автори, перевагою такого інтегрального методу є те, що немає необхідності знати параметри системи, такі як маса, затухання та коефіцієнти жорсткості, які зазвичай отримуються методами скінченних елементів. Щодо вимірювання коливань то, як правило, застосовують датчики вимірювання прискорення [11]. Але поряд з тим існують альтернативні рішення. Так, в роботі [12] розглянуті варіанти дистанційного вимірювання коливань за допомогою лазерних та оптичних приладів. А застосування датчика коливань на основі оптичного волокна пропонується в роботі [13]. Звичайно, такі системи збору даних володіють високою точністю та чутливістю. Але застосування їх обмежене високою вартістю.

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновки про те, що для замірів динамічних параметрів використовуються датчики вимірювання прискорення. Застосування тензOMETричних методів вимірювання є одним із сучасних та ефективних для фіксації динамічних параметрів. Обумовлено це можливістю одночасно фіксувати як числові, так і якісні характеристики із урахуванням зсуву фаз.

5. Методи досліджень

Для реалізації досліджень віброустановки передбачається наступна послідовність виконання науково-дослідних робіт:

- аналіз розрахунків конструктивних елементів машини з точки зору врахування всіх видів навантажень, які здійснювались при проектуванні машини;
- розробка комп'ютерної моделі об'єкту дослідження (загальна або окремі найбільш навантажені вузли, конструктивні елементи);
- проведення додаткового моделювання и розрахунків по визначенню поведінки конструктивних елементів та машини в цілому при одночасній дії різноманітних навантажень;
- розробка на комп'ютерній моделі матриці точок контролю граничних значень інтегральних характеристик стану конструкції для подальшого застосування при натурних випробуваннях;

- проведення натурних випробувань шляхом прикладання визначених навантажень на його модель;
- корегування комп'ютерної моделі до того часу, поки співставлення інтегральних характеристик, які отримані шляхом вимірювань в контрольних точках при проведенні експерименту і при моделюванні будуть відрізнятись між собою в межах допустимої похибки. Отримана таким чином комп'ютерна модель буде адекватною реальній конструкції в межах точок адекватності – точок контролю інтегральних характеристик.

У випадку модернізації існуючої моделі машини технологічного призначення розрахункова модель в такому комплексі дозволить проаналізувати технічний рівень конструкції та виконати прогнозування її надійності. А в комплексі з виконаними експериментальними дослідженнями оцінити поточний технічний стан, появу можливих відмов, тощо.

На основі проведення таких досліджень можна оцінити характер і величину зміни напружено-деформованого стану елементів та металоконструкцій в цілому. Це дасть можливість визначити якість виготовлення конструкції і відповідність її проектним даним (виконання зварних швів, болтових з'єднань, цілісності конструкції).

6. Результати дослідження

Експериментальна модель віброустановки розроблена на основі досліджень розрахункової моделі [13]. Вібраційна експериментальна установка виготовлена з металопрокату. Конструкція складається з зварної рами трубчастого перерізу з формоутворюючою поверхнею. Рама опирається на гумові пружні опори. Загальний вигляд досліджуваної вібраційної установки показаний на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд вібраційної установки

Вібраційна установка обладнана двома, асиметрично встановленими вібраційними збуджувачами коливань (рис. 3), які прикріплені до рами за допомогою кріплень. Для контролю частоти збудження та положення дебалансу в просторі вібраційні збуджувачі обладнані датчиками положення дебалансу.



Рис. 3. Збуджувач коливань з датчиком положення дебаланса

Для визначення амплітуди коливань застосовувались датчики зміщення індуктивного типу (рис. 4, *а*). Контроль стану формоутворюючої поверхні здійснювався за допомогою датчиків деформації (рис. 4, *б*).

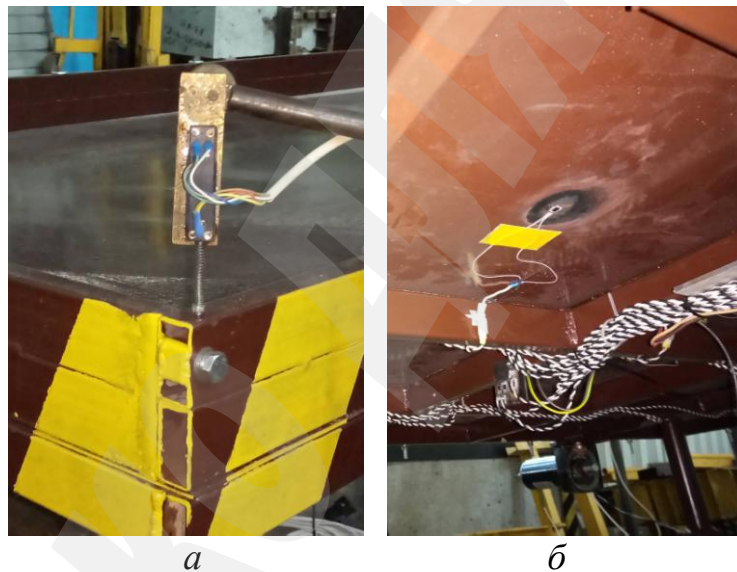


Рис. 4. Датчик: *а* – переміщень; *б* – деформації

Амплітуда коливань досліджуваної установки визначалася на основі вимірювань амплітуд у трьох точках, які розміщені вздовж конструкції. Контроль деформованого стану формоутворюючої поверхні проводився на основі даних з 18 датчиків деформації. Схема розміщення датчиків вимірювання наведена на рис. 5.

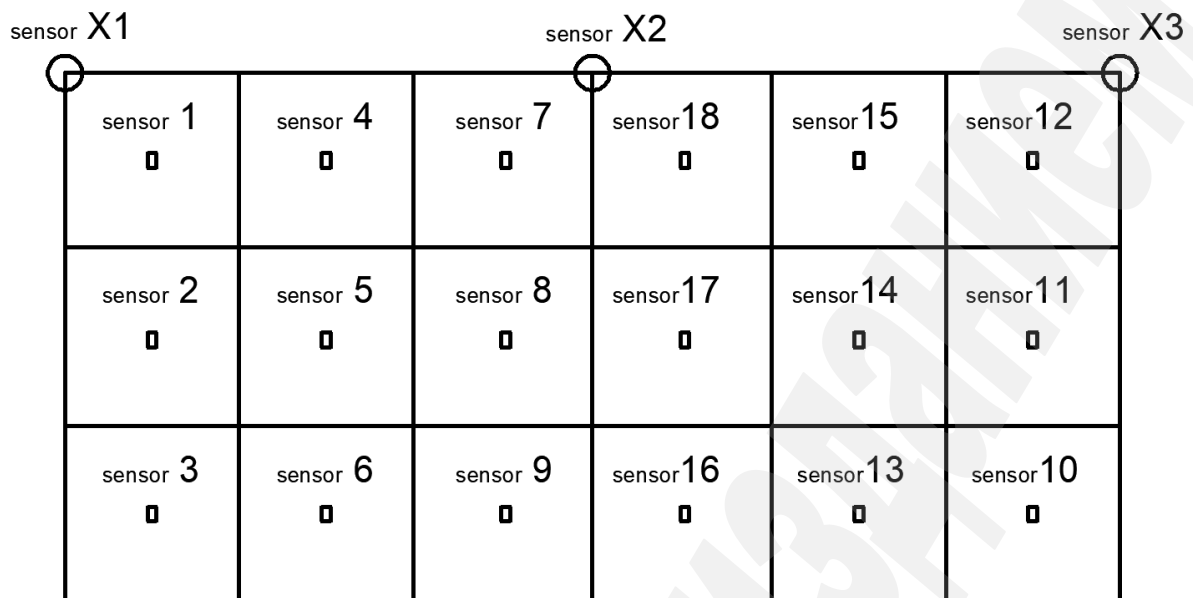


Рис. 5. Схема розміщення датчиків вимірювання

Зчитування даних з датчиків та послідовна їх обробка здійснювалась за допомогою розробленої схеми на базі 32 бітного контролера з двома незалежними аналого-цифровими перетворювачами. Така система забезпечила швидкість дискретизації сигналів з датчиків 20 кГц. Обробка даних здійснювалась за допомогою ПК. Загальний вигляд експериментальної установки з системою вимірювання наведений на рис. 6.



Рис. 6. Загальний вигляд експериментальної установки

При проведенні експериментальних досліджень отримана низка осцилограм на різних режимах роботи віброустановки. Типові осцилограми коливань наведені на рис. 7. Як видно з осцилограми на рис. 6, наявні перехідні процеси, які пояснюються зміною частоти коливань.

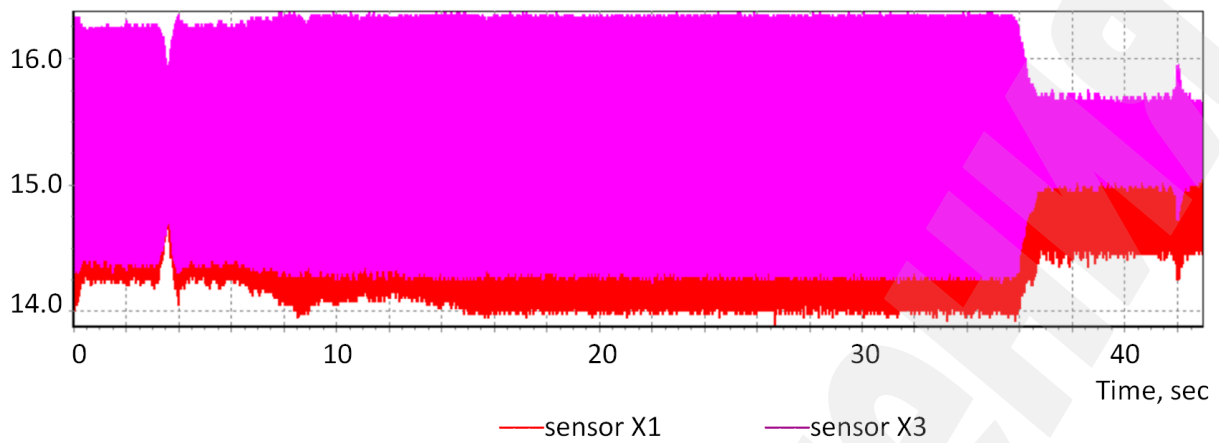


Рис. 7. Осцилограма руху віброустановки

Після обробки отриманих осцилограм переміщень віброустановки визначені основні частоти коливань. Також проведений аналіз форм коливань, які здійснюються при цих частотах. Так при частоті збудження 12,5 Гц формоутворююча поверхня здійснює вертикальні коливання (рис. 8). Рух установки відбувається у синфазному режимі, що свідчить про реалізацію форми коливань, коли вся конструкція рухається поступально у вертикальному напрямку. Так, для визначення амплітуди коливань застосовувались датчики зміщення індуктивного типу (рис. 4, а). Контроль стану формоутворюючої поверхні здійснювався за допомогою датчиків деформацій (рис. 4, б).

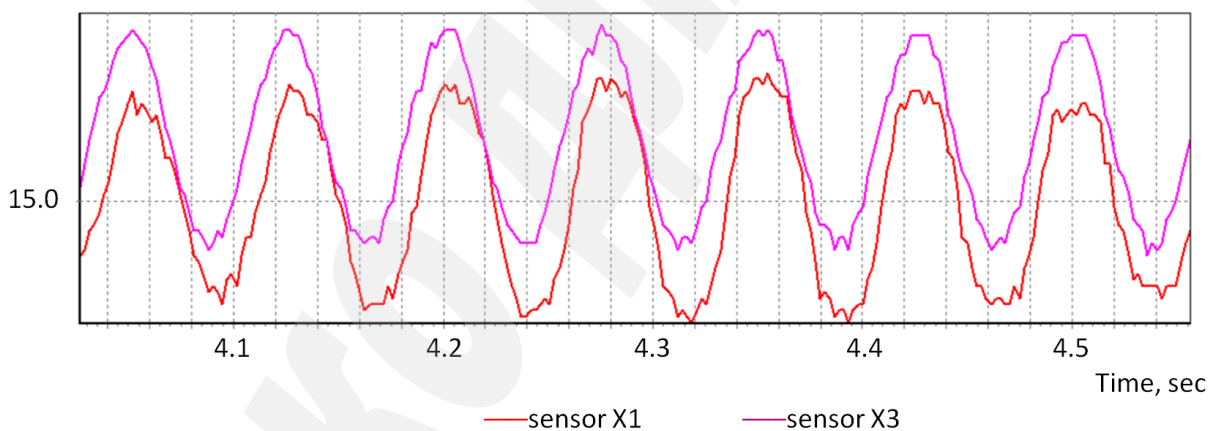


Рис. 8. Осцилограма руху віброустановки при частоті коливань 12,5 Гц

Рух віброустановки при частоті збудження 18,6 Гц та 24,3 Гц на відміну від попередньої свідчить про реалізацію форми коливань з протифазним рухом (рис. 9, 10).

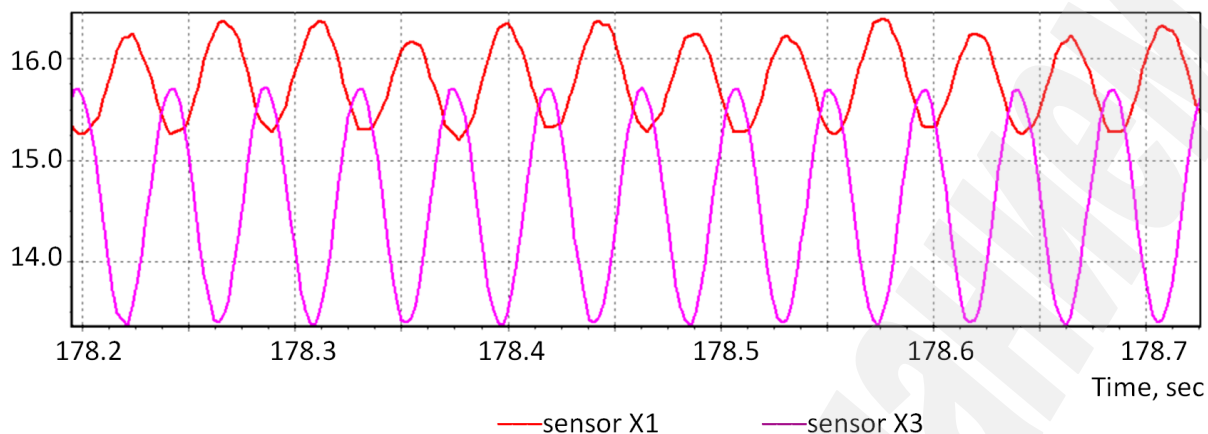


Рис. 9. Осцилограма руху віброустановки при частоті коливань 18,6 Гц

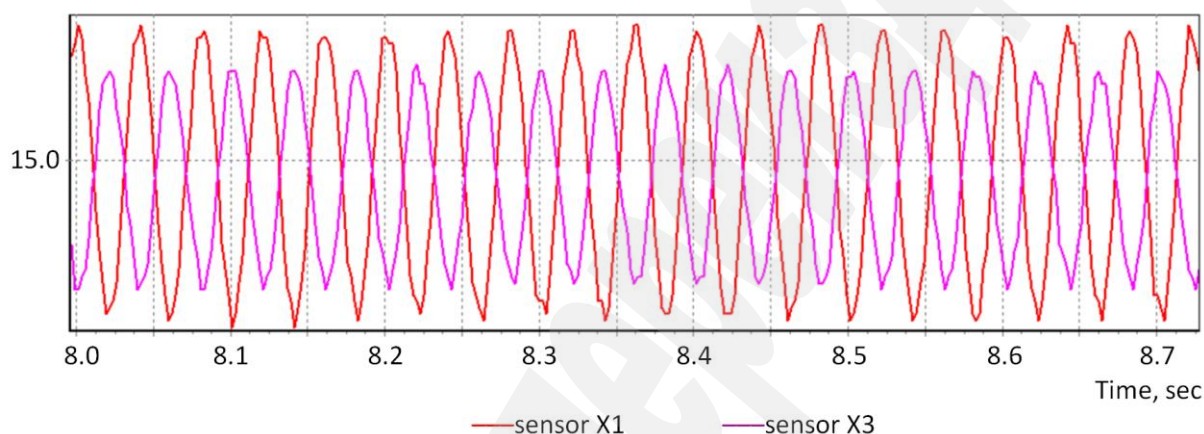


Рис. 10. Осцилограма руху віброустановки при частоті коливань 24,3 Гц

Для оцінки напружено-деформованого стану формоутворюючої конструкції були проаналізовані дані датчиків деформації. На основі отриманих результатів можна зазначити наступне. При реалізації робочого режиму на частоті 24,3 Гц у формоутворюючій поверхні виникає складний напружено-деформований стан. Про це свідчать різні за формою та за значенням деформації у відповідних ділянках поверхні. Також слід зазначити про наявність хвильових явищ (рис. 11, 12), які відбуваються у формоутворюючій поверхні.

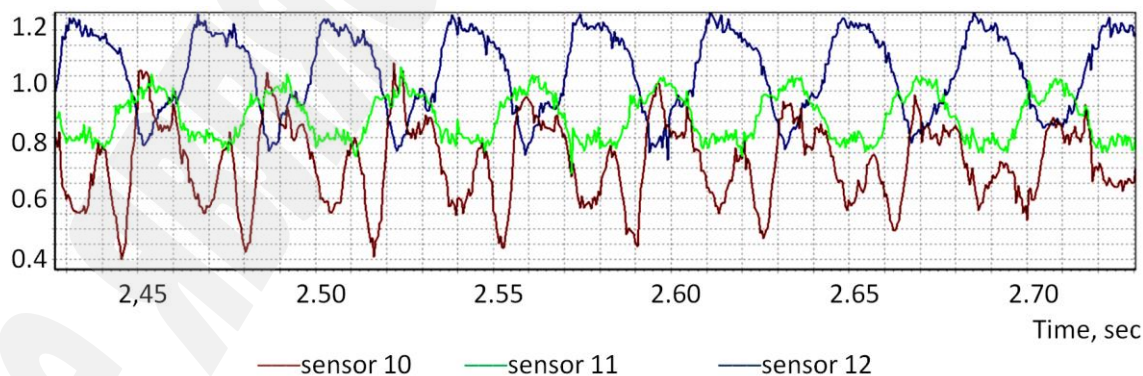


Рис. 11. Деформації формоутворюючої поверхні при частоті коливань 24,3 Гц (датчики 10, 11, 12 (рис. 5))

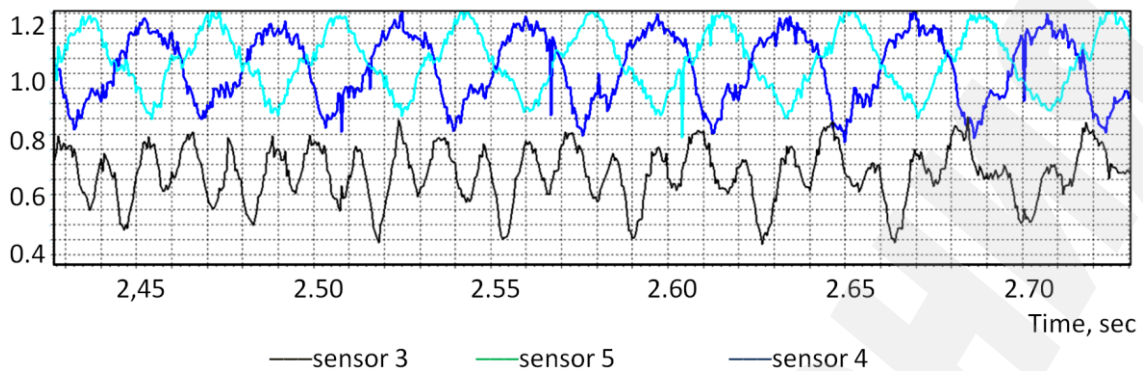


Рис. 12. Деформації формоутворюючої поверхні при частоті коливань 24,3 Гц (датчики 3, 4, 5 (рис. 5))

Так, наявність полічастотного (рис. 11, 12, датчики 4, 12) та протифазного характеру (рис. 12, датчики 3, 5) осцилограм свідчить про поширення хвилі як у повздовжньому, так і в поперечному напрямках конструкції.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Результати досліджень засвідчують наявність складних форм коливань формоутворюючої рами вібраційної установки. Таким чином, можливість реалізації режимів роботи при наявності хвильових явищ у формоутворюючій поверхні підтверджена. Це є підтвердженням досліджень? проведених авторами в роботі [14].

Weaknesses. Дане дослідження має обмеження, так як недосліджені режими роботи установки на більш високих частотах коливань. А також необхідні розрахунки якісних і кількісних показників зміни напружено-деформованого стану формоутворюючої поверхні. Для об'єктивного аналізу варто застосувати дещо інші методи, такі як спектральний або Wavelet аналіз. Такі дослідження заплановані авторами на майбутнє.

Opportunities. Перспективним напрямком подальших досліджень є потреба пошуку можливих варіантів розташування віброзбудників на формоутворюючій поверхні. Другим напрямком досліджень є використання параметричних коливань в подібних системах. В теоретичних дослідженнях таке рішення є ефективним. Проблема лише у відсутності дієвих конструктивних та надійних рішень реалізації таких коливань. Можливості таких досліджень лежать у площині розробки практичних рекомендацій для раціонального конструктивного оформлення перерізів формоутворюючих конструкцій. А також розробка на основі визначених технологічних параметрів коливань новітніх, подібних до досліджуваної, конструкцій.

Threats. Стрімкий розвиток будівельної галузі України у напрямку застосування каркасно-монолітної технології зведення будівель і споруд витісняє машини даного типу з ринку. Але закордонний досвід показує, що необхідність у таких машинах існує. Загрозою може стати відсутність машин даного класу на ринку України і втрата виробничих потужностей, на яких може бути застосований об'єкт дослідження.

Серед загроз даного напрямку досліджень є намагання технологів застосувати допоміжні добавки для зменшення необхідності використовувати вібраційні методи. Разом з тим, потребуються додаткові дослідження життєвого циклу створених конструкцій за такою технологією. За кордоном існують подібні рішення на інших середовищах.

8. Висновки

1. На основі попередніх розрахунків та моделювання несучих елементів рами балочними скінченними елементами, пружно деформованими під дією поздовжньої сили, згинальних моментів в двох площинах і крутного моменту розроблена експериментальна модель віброустановки з активною формоутворюючою поверхнею. При дослідженні системи застосовані принципи, які забезпечили адекватність моделі, а також можливість подальших досліджень – розв’язування інших типів задач.

2. Визначені основні частоти коливань, які реалізуються при 12,50 Гц, 18,60 Гц та 24,30 Гц при цьому реалізуються форми коливань з складним рухом формоутворюючої поверхні.

3. Експериментально доведена наявність хвильових явищ у формоутворюючій поверхні при реалізації режимів роботи на основних частотах коливань. Визначені амплітуди коливань установки в межах 0,0006...0,0003 м при частотах збудження 18,60 Гц та 24,30 Гц.

Література

1. Design of New Structures of Vibro-Shocking Building Machines by Internal Characteristics of Oscillating System / Nazarenko I. I. et. al. // The Seventh Triennial International Conference HEAVY MACHINERY HM 2011. 2011. Issue 2. P. 1–4.

2. Dedov O. Determining the influence of the environment on the dynamics of the machine on the basis of spectral analysis // Control, Navigation and Communication Systems. 2018. Vol. 4, Issue 50. P. 69–72. doi: <http://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.069>

3. Nesterenko M., Nesterenko T., Skliarenko T. Theoretical Studies of Stresses in a Layer of a Light-Concrete Mixture, Which is Compacted on the Shock-Vibration Machine // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, Issue 3.2. P. 419–424. doi: <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14564>

4. Experimental and Theoretical Investigation of a Nonlinear Vibrational Energy Harvester / Andò B. et. al. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 120. P. 1024–1027. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.701>

5. Kavayanpoor M., Shokrollahi S. Dynamic behaviors of a fractional order nonlinear oscillator // Journal of King Saud University – Science. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.006>

6. Computational Framework for Online Estimation of Fatigue Damage using Vibration Measurements from a Limited Number of Sensors / Giagopoulos D. et. al. // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. P. 1906–1911. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.424>

7. Patel V. N., Tandon N., Pandey R. K. Vibrations Generated by Rolling Element Bearings having Multiple Local Defects on Races // Procedia Technology. 2014. Vol. 14. P. 312–319. doi: <http://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.041>

8. Bendjama H., Bouhouche S., Boucherit M. S. Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery // *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2012. Vol. 2, Issue 1. P. 82–87. doi: <http://doi.org/10.7763/ijmlc.2012.v2.93>
9. Ghandchi Tehrani M., Wilmshurst L., Elliott S. J. Receptance method for active vibration control of a nonlinear system // *Journal of Sound and Vibration*. 2013. Vol. 332, Issue 19. P. 4440–4449. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.04.002>
10. Yamamoto G. K., da Costa C., da Silva Sousa J. S. A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery // *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 4. P. 8–18. doi: <http://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.07.001>
11. Jia Y., Seshia A. A. An auto-parametrically excited vibration energy harvester // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 220. P. 69–75. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.012>
12. Comparison of Different Methods of Non-contact Vibration Measurement / Lezhin D. S. et. al. // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 176. P. 175–183. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.286>
13. Vibration Measurement of Mathematical Pendulum based on Macrobending-Fiber Optic Sensor as a Model of Bridge Structural Health Monitoring / Gianti M. S. et. al. // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 170. P. 430–434. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.069>
14. Investigation of vibration machine movement with a multimode oscillation spectrum / Nazarenko I. et. al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, Issue 1 (90). P. 28–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118731>