

© К.С. Заболотний¹, А.П. Шкут¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РОЗРОБКА ТА ТЕСТУВАННЯ СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РОБОТИ ІНЕРЦІЙНОГО ГРОХОТУ З ДВОМА МОТОР-ВІБРАТОРАМИ

© K. Zabolotnyi¹, A.Shkut¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DEVELOPMENT AND TESTING OF A STAND FOR STUDYING THE DYNAMICS OF AN INERTIAL SCREEN WITH TWO MOTOR-VIBRATORS

Мета. Обґрунтування конструкції стенду для дослідження динаміки перехідних режимів інерційного грохоту з двома мотор-вібраторами методики та розробка методики проведення фізичного експерименту для дослідження динаміки роботи грохоту.

Методологія. Для проведення фізичного експерименту розроблено лабораторний стенд для дослідження динаміки роботи грохотів. Стенд складається з інерційного грохота п'єзоелектричного датчику прискорення КД 35-2, системи лабораторних приладів акустичної та вібровиміральної техніки Robotron, комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням. Отримані дані аналізуються з використанням програмного забезпечення, яке дозволяє виводити графіки коливань у різних напрямках: вертикальному, горизонтальному та під кутом 45°.

Результати. Розроблено та протестовано стенд для аналізу динаміки грохотів. Отримані результати свідчать про узгодженість даних комп'ютерного моделювання та фізичних вимірювань. Максимальна амплітуда вертикальних коливань у центрі грохота склала 24,71 мм, горизонтальні переміщення досягли 18,6 мм, а амплітудні коливання під кутом 45° – 26,41 мм. Середнє відхилення між експериментальними та модельованими даними не перевищує 9%, що підтверджує точність розрахунків.

Наукова новизна. У рамках даного дослідження вперше представлено лабораторний стенд для дослідження динаміки роботи інерційних двопривідних грохотів з використанням п'єзоелектричних датчиків та системи віброметрії Robotron. Унікальність роботи полягає в розробці лабораторного стенду, що дозволяє точно вимірювати амплітуди у реальному часі, а також порівнянні результатів із даними моделей, розроблених у SolidWorks.

Практичне значення. Результати розробленої методики дослідження фізичних прототипів інерційних двопривідних грохотів можуть використовуватись для оптимізації конструкцій вібраційних грохотів у промисловості. Запропонований підхід дозволяє точно оцінити динамічні характеристики грохотів та визначити оптимальні параметри їх роботи, що сприяє зниженню енерговитрат та підвищенню ефективності процесу сортування матеріалів.

Ключові слова: грохот, динамічні характеристики, лабораторний стенд, амплітуда коливань, вимірювання, тарировка, SolidWorks.

Вступ. Фізичне моделювання є важливим інструментом у наукових дослідженнях і інженерних розробках, оскільки воно забезпечує надійність і точність отриманих результатів, допомагаючи зменшити ризики і витрати на подальші розробки та впровадження.

Часто для валідації результатів досліджень аналітичного моделювання та комп'ютерного аналізу не вистачає даних, для цього необхідно проводити фізичні експерименти. Таким чином, актуальним завданням є створення та випробування лабораторного стенду для дослідження вібраційних характеристик грохотів. Для реалізації цього завдання необхідно розробити схему стенду, що включатиме модель грохоту, сучасні прилади для дослідження вібраційної техніки, забезпечити їх правильне налаштування і взаємодію з комп'ютерними системами для аналізу даних, а також створити лабораторний стенд.

В результаті дослідження необхідно порівняти результати фізичного експерименту з даними, отриманими в під час аналітичного та комп'ютерного моделювання. Це дозволить оцінити точність та надійність розроблених моделей і зробити необхідні корективи для подальшого їх використання у практичних задачах.

Основна частина. Проектування грохоту для лабораторного стенду виконаємо в програмному забезпеченні SolidWorks (рис.1). На першому етапі це дозволить швидко розробити конструкцію з можливістю вносити необхідні коригування.

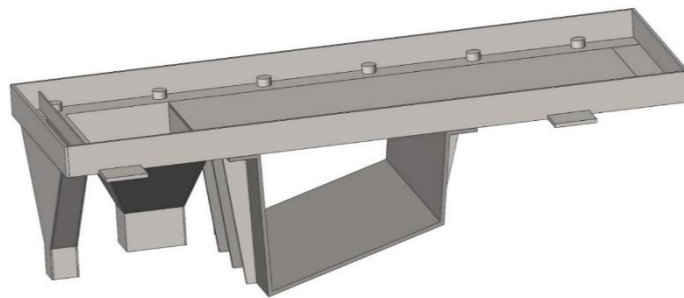


Рис. 1. Конструкція грохоту

Вібробудники можуть бути розташовані вище або нижче просіювальної поверхні, але в будь-якому разі для отримання однорідного поля коливань результуюча вимушена сила повинна проходити через центр ваги грохота (рис. 2). Використаємо вібратор ІВ-99, оскільки необхідності дослідити високочастотний грохот, оскільки він здатний забезпечити необхідні характеристики.

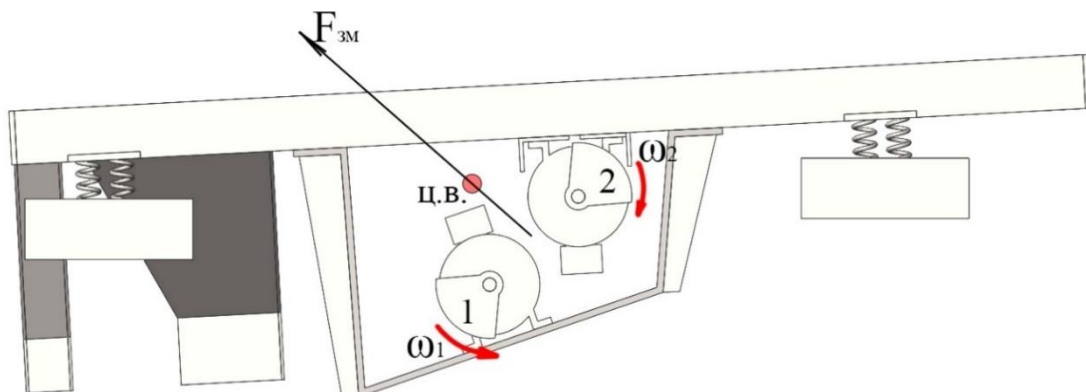


Рис. 2. Схема розміщення моторвібраторів в конструкції грохоту

Одна з основних особливостей таких грохотів – це наявність двох однакових дебалансних вібраційних збуджувачів з паралельним розташованими осями. Вібраційні збуджувачі обертаються з однаковою кутовою швидкістю, але у протилежних напрямках, при цьому відбувається синхронізація і виникає направлена сила.

Пружні елементи обираємо з урахуванням необхідності забезпечення власної частоти коливань грохота, нижчу за змушуючу частоту, створювану вібро-мотором ІВ-99.

Конструкція грохоту виготовлена ручною дуговою зваркою з листового та прокатного матеріалу. Листи товщиною 3 та 10 мм, та кути 80x80x3. Розробимо станину для розміщення коробу у просторі. На опорах станини розташовані вісім пружних елементів, на яких підтримується короб. На спеціально підготовленій полиці закріплюється один моторвібратор, тоді як другий моторвібратор кріпиться зверху, із додаванням у ці місця додаткових елементів жорсткості. Вібро-мотор фіксується до конструкції за допомогою болтового з'єднання. На рисунку представлено фото готової конструкції грохоту.

Розробимо схему лабораторного стенду для дослідження грохотів (рис. 3), що складатиметься з наступних елементів: модель грохоту 1, на короб грохоту встановимо п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35 – 2, за допомогою кабелю датчик буде поєднано з системою лабораторних приладів акустичної та вібровиміральної техніки Robotron [1–3]. Ця система використовуються для вимірювання і аналізу акустичних і вібраційних параметрів у різних інженерних та наукових застосуваннях. Для дослідження вібрацій використаємо вібровимірвальний прилад 00032 – 3. Основні елементи приладу: інтегруючий підсилювач 00028 – 3.1, блок індикації 02036 – 3.2 та блок живлення 04013 – 3.3. Віброметр кабелем підключимо до комп'ютера з встановленою на ньому програмою звуковим редактором.

Детально розглянемо кожний елемент схеми. В якості об'єкта дослідження використаємо грохот розроблений раніше.

Для дослідження вібрацій, а саме амплітуди, швидкості та прискорення коливань використаємо систему лабораторних приладів акустичної та вібровиміральної техніки Robotron. Один з приладів системи слугує для вимірювання вібрацій – віброметр 00032. Він складається з модулів: інтегруючий підсилювач 00028, блок індикації 02036 і блок живлення 04024. Використовуючи п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35 можна вимірювати прискорення, швидкість та амплітуду коливань. Прилад може функціонувати від мережі або від зовнішнього джерела постійної напруги 12В. Виходи змінної та постійної напруги дозволяють підключати реєструючи пристрої.

Перетворення механічних коливань в електричні сигнали виконає п'єзоелектричний датчик прискорення (акселерометр) КД 35. Встановивши датчик на короб, при коливаннях грохота данні будуть передаватись від акселерометра до віброметра.

Основний принцип роботи такого датчика полягає у використанні п'єзоелектричних матеріалів, що генерують електричний заряд у відповідь на механічну

напругу. Коли на п'єзоелектричний матеріал діє механічний вплив (наприклад, прискоренню), у його кристалічній структурі відбувається перерозподіл зарядів, що призводить до появи електричної напруги. Ця напруга пропорційна доданій силі, що дозволяє вимірювати прискорення.

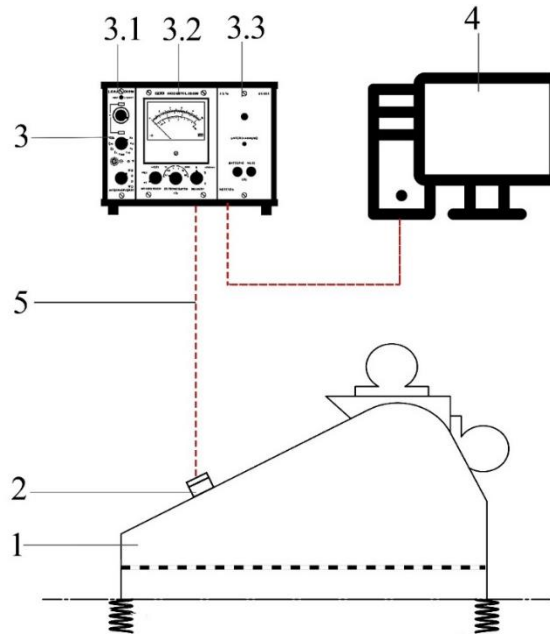


Рис. 3. Схема експериментального стенду для дослідження грохоту

Конструктивно акселерометр KD 35 складається з набору кристалів п'єзоелектрика 1, розміщених у легкому металевому корпусі 2 (рис. 4). Для підвищення чутливості акселерометра на п'єзоелемент накладена додаткова маса 3, яка притискається до кристала за допомогою пружини 4. При встановленні акселерометра на поверхню, що коливається, маса зміщується відносно основи. Оскільки сила, яка виникає в акселерометрі під час коливань, залежить від інерційної сили, яка, в свою чергу, пропорційна прискоренню коливань, то вихідний сигнал акселерометра буде прямо пропорційний цьому прискоренню.

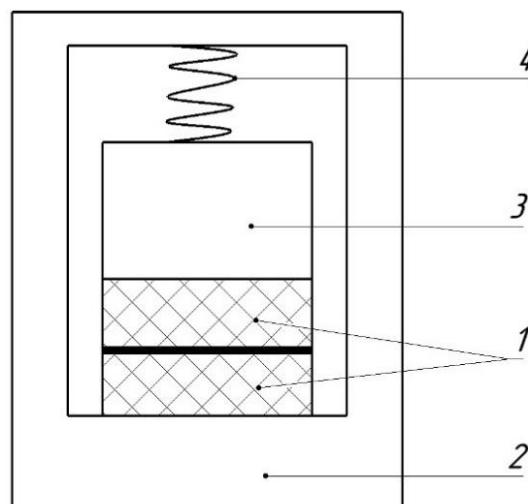


Рис. 4. Схема пристрою п'єзоелектричного датчика прискорення KD 35

Для відображення та зчитування отриманих параметрів під час вимірювання коливань використаємо блок індикації 02036. За його допомогою можна відображати як ефективне значення, так і позитивне або негативне пікове значення вимірюваних величин. Вихід змінної та постійної напруги дозволяє підключати всі стандартні реєструючі пристрої, включаючи аналого-цифрові перетворювачі.

Низька нижня частотна межа 0,5 Гц дозволяє використовувати прилад у сфері низьких частот. Блок індикації 02036 дозволяє підключати зовнішні фільтри до шлейфу. Частотний діапазон 0,5 Гц... 22 кГц \pm 0,5 дБ.

Інтегруючий підсилювач 00028 дозволяє використовувати систему лабораторних приладів для вимірювання коливань. Він призначений для підключення п'єзоелектричних датчиків прискорення і дозволяє вимірювати прискорення, швидкість і амплітуду коливань. Завдяки перемиканню нижніх граничних частот, є можливість усунути низькочастотні перешкоди.

Підключення приладу до джерел напруги відбувається за допомогою блоку мережі 04024. Він служить в першу чергу для електроживлення модулів вібровимірювальної техніки (підсилювача 00028, блоку інтегратора 02036). Крім мережної напруги подаються стабілізовані та нестабілізовані постійні напруги та калібрувальна напруга.

Модулі системи лабораторних приладів акустики та вібровимірювальної техніки розміщуються в системному кожуху 04012, він з'єднує їх конструктивно та електрично між собою. Робочі та калібрувальні напруги подаються через внутрішнє дротове з'єднання модулів за допомогою штепсельних роз'ємів. Вимірювальні та керуючі сигнали підключаються зовні через вставні кабелі. Цей мобільний блок може бути використаний у будь-якому місці всередині кожуха.

На базі кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні в НТУ «Дніпровська політехніка» використовуючи наступні елементи: грохот, п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35 та віброметр 00032, що складається з інтегруючого підсилювача 00028, блоку індикації 02036 та блоку живлення 04013, створена лабораторна установка для дослідження грохотів, а саме амплітуди, швидкості та прискорення коливань (рис. 5).

Розроблено схему експериментального стенду для дослідження грохоту. Її складові елементи грохот, п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35, віброметр 00032 з такими модулями як інтегруючий підсилювач 00028, блок індикації 02036, блок живлення 04013. Схему втілено в лабораторну установку на базі кафедри інжинірингу та дизайну НТУ «ДП».

Стенд створений для дослідження амплітуди, швидкості та прискорення коливань інерційних грохотів, та працює наступним чином: механічні коливання в електричні сигнали перетворює п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35, далі вони передаються на віброметр 00032, а з нього до комп'ютеру з встановленим на ньому програмним забезпеченням для аналізу звукових хвиль.



Рис. 5. Основні компоненти лабораторного стану для дослідження грохотів

Налаштування обладнання, тарировка. Для перевірки вимірювальних пристроїв розроблено спеціалізований стенд (рис. 6). Основними елементами цього стану є пластина 1, що спирається на гумові амортизатори 2. За допомогою болтового з'єднання М14 на пластині закріплено вібратор ІВ-99 (3). Також на цій пластині закріплено п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35 (4), який, як зазначено у схемі експериментального стану для дослідження грохоту, з'єднано з віброметром. Віброметр передає дані на комп'ютер 5 для подальшої обробки. Крім того, датчик вимірювання переміщення годинникового типу 6 встановлено на штативі над платформою для додаткового контролю величини переміщення платформи.

Принцип роботи стану полягає у тому, що мотор-вібратор під час роботи створює коливальний рух, який передається на пластину, встановлену на гумових амортизаторах. П'єзоелектричний датчик, закріплений на платформі, перетворює механічні коливання на електричний сигнал, який передається до віброметра. Віброметр, у свою чергу, передає сигнал на комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням для обробки звукових хвиль.

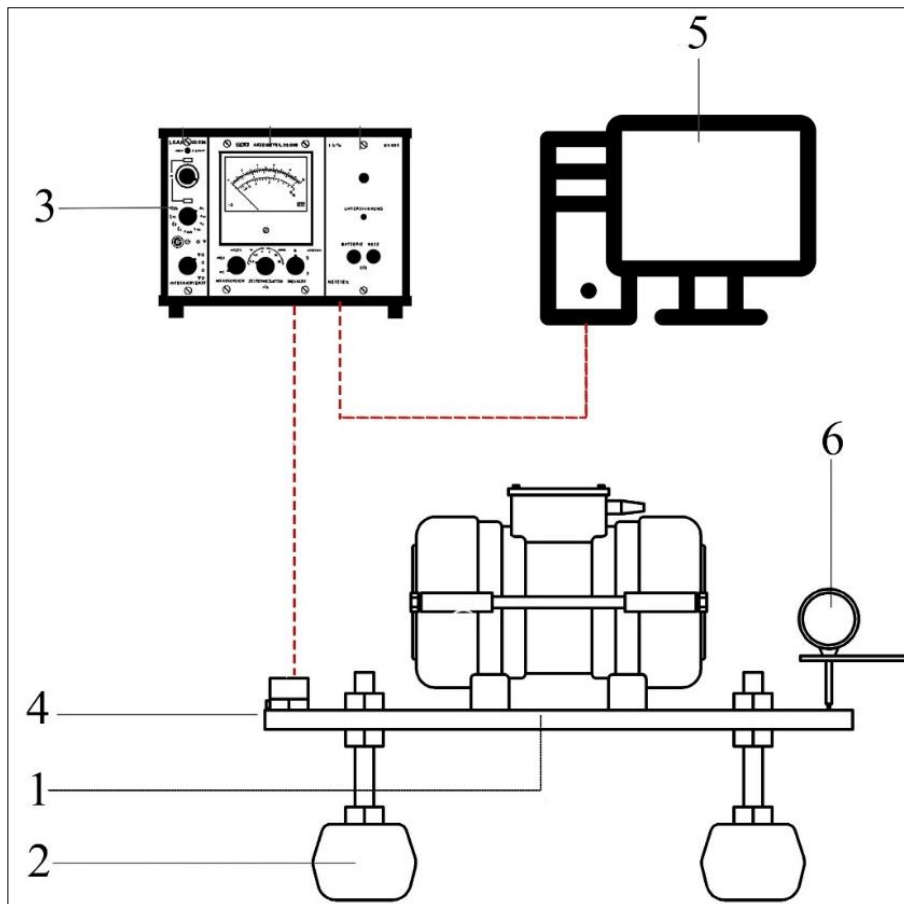


Рис. 6. Схема стану для випробування обладнання

Постійно ведеться відеозйомка датчика для вимірювання переміщень, щоб порівнявши рухи пластини з кількістю обертів стрілки датчика, розрахувати амплітуду руху пластини.

Під час роботи стану, на комп'ютері за допомогою звукового редактору відображається та записується графік амплітуди переміщень пластини при дії на неї змушуючого зусилля, що виникає під час роботи вібратору (рис. 7).

Розглянемо інтерфейс програмного забезпечення Sonic Sound Forge для запису звукових хвиль, завдяки вібратору який передає сигнал, програма може записувати графік амплітуди коливань. Отже, графік переміщень пластини 1, шкала зміни децибел 2, шкала зміни часу 3, масштаб відображення 4. Особливість відображення результатів в програмі, те що вісь ординат відображає децибели, тому необхідно створити еталон згідно якого, при порівняння інших графіків з ним, можливо розрахувати отриману величину амплітуди.

Скористаємось датчиком вимірювання переміщень годинникового типу. Паралельно з записом графіку амплітуд відбувається зйомка циферблату, в результаті чого отримано, що під час одного коливання пластини, стрілка датчика виконує 10 обертів, що відповідає 1 мм переміщенню.

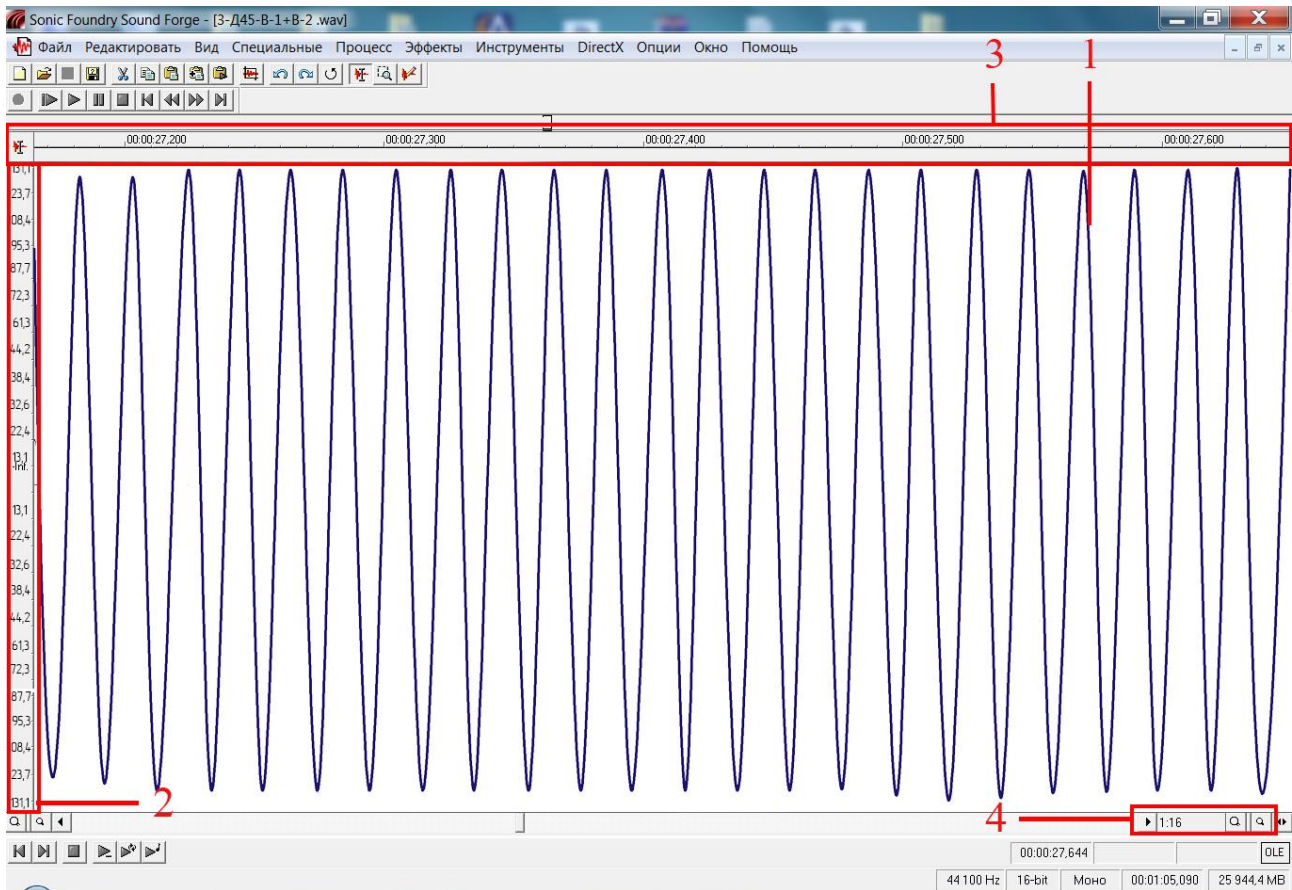


Рис. 7. Інтерфейс програми Sonic Sound Forge

Отже, порівнюємо графік коливань на 39,5 с та запис датчика в цей час. Отже, в 39,5 с на графіку спостерігаємо сталі коливання зі значеннями по вісі ординат 132 дБ, що відповідає 10 оборотам стрілки датчика та 1 мм амплітуди коливань пластини.

Для порівняння результатів експерименту проведемо аналітичний розрахунок системи.

Запишемо вираз для функції амплітуди від часу:

$$X(t) = A \sin(\omega_v t), m$$

де $X(t)$ – амплітуда в момент часу t ; A – максимальна амплітуда коливань, мм; ω_v – частота обертання вала моторвібратора, рад/с; t – час, с.

Визначимо максимальну амплітуду

$$X_{\max} = \frac{F_v}{m_v \cdot \omega_v^2 - 4 \cdot c_{np}} = \frac{2600}{30 \cdot 9,86 \cdot 10^4 - 280} = 0,94 \text{ мм.}$$

де $F_v = 2600 \text{ Н}$ – змушуюче зусилля, з характеристик моторвібратора; $\omega_v = 314 \text{ рад/с}$ – частота обертання вала моторвібратора; $m_v = 30 \text{ кг}$ – вага вібратора з пластиною; $c_{np} = 175 \text{ Н/м}$ – жорсткість пружного елемента.

Отже, похибка розрахунку визначення амплітуди на експериментальному стенда та аналітично складає 7 %.

Мета експерименту полягає в проведенні дослідження параметрів переміщення грохоту під час його роботи на основі лабораторного стенду. Отримані результати необхідно порівняти з даними розрахунку цього грохоту на основі методики комп'ютерного моделювання.

Розроблений стенд необхідно підготувати до проведення досліджень. Особливість розташування моторвібраторів на стенді полягає в тому, що при роботі вони створюють направлені коливання при цьому змушуюче зусилля діє під кутом 45° до короба. Зважаючи на це необхідно дослідити переміщення грохоту в декількох напрямках, а саме вертикально, горизонтально та під кутом 45° .

На лабораторному стенді на коробі грохота підготуємо місця для кріплення датчику, на рисунку 8 позначені цифрами.



Рис. 8. Місця кріплення датчиків на коробі грохоту

Алгоритм проведення експерименту для дослідження грохоту [4]

1. Переглянути цілісність приладів.
2. Увімкнути напругу.
3. Зафіксувати п'єзоелектричний датчик прискорення KD 35
4. Підключити п'єзоелектричний датчик прискорення KD 35.
5. Увімкнути ПК з програмою для запису звуку.
6. Увімкнути вимірювальний пристрій.
7. Увімкнути запис звуку.
8. Увімкнути моторвібратори.
9. Впевнитись, що грохот пройшов резонанс.
10. Вимкнути моторвібратори.
11. Зафіксувати показання отримані в програмі.
12. Повторити вимірювання.
13. Переставити датчик в іншу точку дослідження.

Результати дослідження. В результаті проведення дослідження отримані графіки переміщень. На рисунку 9 представлено графік переміщень грохота в точці 3 при розміщенні датчику під кутом 45° вздовж змушуючого зусилля. графіку представлено дві криві: червоного кольору відповідає переміщенню пластини під час тарировки обладнання (див. рис. 7), а синього кольору з меншою амплітудою – переміщенню грохота. Порівнявши амплітуду переміщення грохоту з амплітудою еталонного зразку, визначено, що вертикальне переміщення точки 3 складає 0,2641 мм.

Для горизонтальних переміщень точки 3 порівнявши результати еталону та точки 3, амплітуда горизонтальних переміщень складає 0,186 мм, а вертикальних отримано переміщення 0,2471 мм.

Кожне з експериментів повторений 20 разів для проведення подальшого статистичного аналізу достовірності отриманих амплітуд [5].

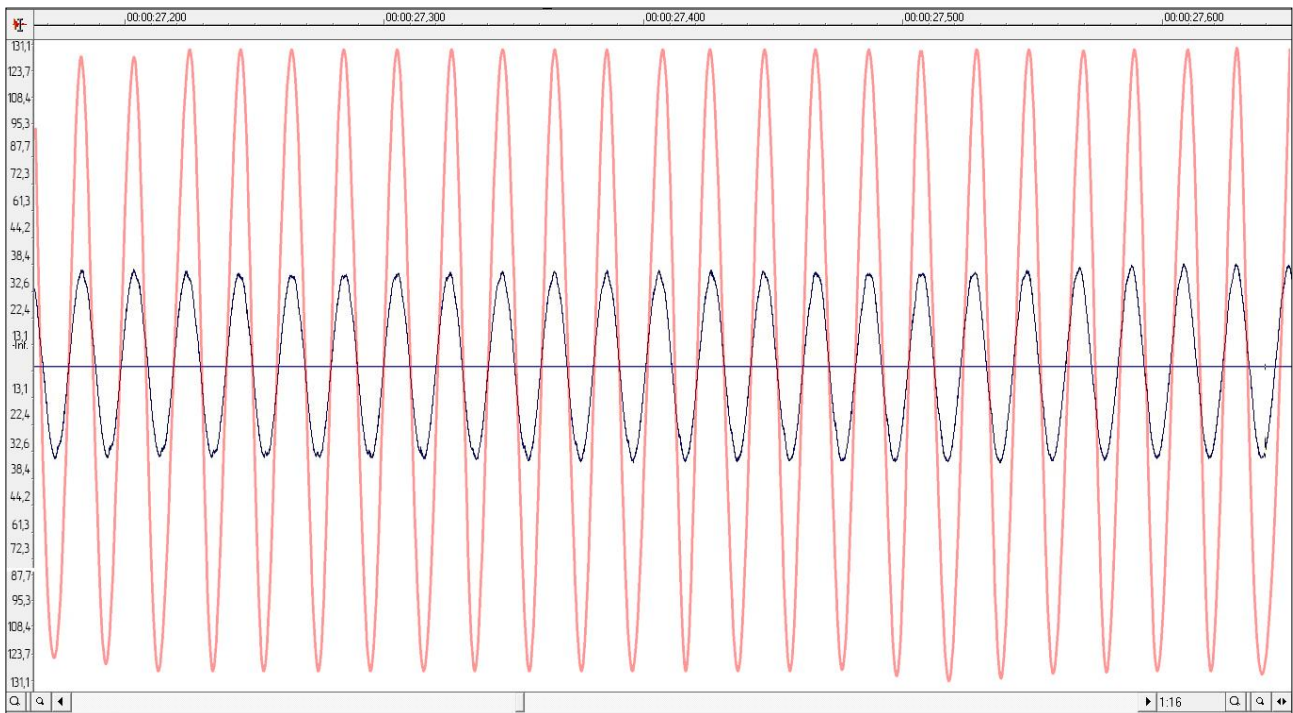


Рис. 9. Графік переміщень точки 3 під кутом 45° вздовж змушуючого зусилля

Під час проведення дослідження на експериментальному стенді для дослідження грохотів отримані результати необхідно порівняти з результатами отриманими з використанням комп'ютерного моделювання та аналітичної методики розрахунку.

Отримані результати аналізу амплітуди вібрації грохоту проведеного трьома методами, а саме комп'ютерним моделюванням, фізичним експериментом та аналітичним розрахунком. При порівнянні результатів комп'ютерного моделювання відносно фізичного експерименту отримана похибка від 1 до 9 %, а при порівнянні комп'ютерного моделювання з аналітичним розрахунком амплітуди похибка складає від 2 до 8 %.

У зв'язку з цим можна зробити висновок, що методи комп'ютерного дослідження роботи грохотів можна застосовувати на рівні з аналітичними дослідженнями та фізичним експериментом.

Висновки. Створено експериментальний стенд для дослідження грохотів. В склад стенду увійшли наступні елементи: високочастотний грохот, віброметр з системи лабораторних приладів акустичної та вібровимірювальної техніки Robotron, п'єзоелектричний датчик прискорення КД 35а 9, комп'ютер з програмним забезпеченням Sonic Sound Forge. Проведено тарировку обладнання.

Проведено комп'ютерне дослідження моделі грохоту та отримано наступні амплітуди коливань: при вертикальному встановленні датчику -0,232 мм, при горизонтальному – 0,182 мм, при встановленні датчику під кутом 45° переміщення складають 0,257 мм.

Проведено дослідження грохоту на базі лабораторного стенду. Аналогічно з комп'ютерною моделлю знаті параметри руху грохоту в трьох напрямках. Для отриманих значень проведено статистична обробка даних.

Порівняно результати дослідження грохоту аналітичним, комп'ютерним методами та фізичного експерименту. Похибка розрахунку амплітуд комп'ютерним методом в порівнянні з аналітичним склала від 2 до 8 %, а похибка розрахунку амплітуд комп'ютерного в порівнянні з фізичним експериментом склала від 1 до 9 % в залежності від досліджуваної точки грохоту.

Перелік посилань

1. Franchuk, V., Antsiferov, O., & Shkut, A. (2024). Dynamics of a vibrating screen with two motor-vibrators. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1348, 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012063>
2. Shkut, A.P. (2023). Research on the dynamics of transitional regimes in an inertial screen with two motor vibrators. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 75, 203–213. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.203>
3. Бірта, Г., & Бургу, Ю. (2023). *Методологія і організація наукових досліджень*. Київ: Центр учбової літератури.
4. Parovik, R. (2020). Mathematical Modeling of Linear Fractional Oscillators. *Mathematics*, 8(11), 1879. <https://doi.org/10.3390/math8111879>
5. Linhares, T., & Vimieiro, C. (2021) Analysis of the dynamic forces acting on a vibrating screen and its support structure using a scalemodel. *Measurement*, 176, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109179>

ABSTRACT

Purpose. To substantiate the design of a stand for studying the dynamics of transient modes of an inertial screen with two motor-vibrators and to develop a methodology for conducting a physical experiment to study the dynamics of the screen.

The methods. To conduct a physical experiment, a laboratory stand was developed to study the dynamics of screens. The bench consists of an inertial screen with a piezoelectric acceleration sensor KD 35-2, a system of laboratory devices for acoustic and vibration measuring equipment Robotron, and a computer with installed software. The obtained data are analyzed using software that allows to display graphs of oscillations in different directions: vertical, horizontal and at an angle of 45.

Findings. A stand for analyzing the dynamics of screens was developed and tested. The results show that the computer modeling data and physical measurements are consistent. The maximum amplitude of vertical vibrations in the center of the screen was 24.71 mm, horizontal displacements reached 18.6 mm, and amplitude vibrations at an angle of 45° – 26.41 mm. The average deviation between the experimental and modeled data does not exceed 9%, which confirms the accuracy of the calculations.

The originality. This study presents for the first time a laboratory testbed for studying the dynamics of inertial two-drive screens using piezoelectric sensors and the Robotron vibrometry system. The uniqueness of the work lies in the development of a laboratory bench that allows for accurate measurement of amplitudes in real time, as well as the comparison of results with data from models developed in SolidWorks.

Practical implementation. The results of the developed methodology for studying physical prototypes of inertial double-drive screens can be used to optimize the design of vibrating screens in industry. The proposed approach makes it possible to accurately assess the dynamic characteristics of screens and determine the optimal parameters of their operation, which helps to reduce energy consumption and increase the efficiency of the material sorting process.

Keywords: *screen, dynamic characteristics, laboratory bench, oscillation amplitude, measurement, calibration, SolidWorks.*