

УДК 622.7
№ державної реєстрації – 0117U003725
Інв. номер 32Б117

Центральноукраїнський національний технічний університет
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
25006, м. . Кропивницький, пр. Університетський, 8
тел. (0522) 39-05-47
e-mail: гектор@kntu.kg.ua

Затверджую:
Проректор з наукової
роботи ЦНТУ:
_____ О. Левченко
„___” _____ 2020 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
**„КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ
І ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ВІБРОМАШИН З ВІБРОЗБУДНИКАМИ У
ВИГЛЯДІ ПАСИВНИХ АВТОБАЛАНСИРІВ”**
(заключний)

Керівник НДР
доцент
кандидат техн. наук

В.Яцун

Рукопис закінчено 30 вересня 2020 р.
Результати цієї роботи розглянуто
науково-технічною радою ЦНТУ,
Протокол №10 від 24 листопада 2020 р.

Кропивницький, 2020

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,

канд.техн.наук, доц.

В. Яцун

(розділ 3, розділ 4,
загальні висновки)

Відповідальний виконавець

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук, доц.

А. Тихий

(розділ 2, розділ 4)

Виконавці:

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук, доц.

А. Мацуй

(розділ 4, розділ 5)

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук, доц.

А. Невдаха

(розділ 3)

Старший науковий співробітник,

канд. к.ф.-м.н. наук, доц.

М. Якименко

(розділ 2)

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук, доц.

О. Кузик

(розділ 1)

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук.

Л. Олійніченко

(розділ 3, розділ 5)

Старший науковий співробітник,

канд. техн. наук,

А. Гриньків

(розділ 4)

Молодший науковий співробітник,

В. Слонь

(реферат, розділ 5)

Провідний фахівець,

В. Яцун

(вступ, розділ 1)

РЕФЕРАТ

Звіт про ДКР: 80 с.; джерел 85.

Об'єкт дослідження – двочастотні резонансні вібромашини різного призначення з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Мета роботи – створення основ теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з інерційними віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Методи дослідження – теоретичне обґрунтування, комп'ютерне 3D моделювання динаміки, обчислювальні та натурні експерименти.

В проекті створюється наближена теорія нових вібраційних машин, що ґрунтується на припущенні, що автобалансир динамічно поводить як два незалежних інерційних віброзбудника. Таке припущення спрощує визначення вібраційних характеристик нових вібромашин, та розрахунок їх параметрів.

Уперше досліджуються умови існування і стійкості сім'ї усталених (майже) двочастотних рухів. Для цього використовуються узагальнені координати мас вібромашини і сумарний дебаланс від вантажів.

Оцінюється точність наближеної теорії і межі її застосування шляхом пошуку більш точних законів вібрацій віброплатформ.

Визначаються закони коливального руху віброплатформ у більш високих наближеннях. Оцінюється величина поправок до наближених законів коливань віброплатформ. За величинами поправок робиться заключення про межі застосування наближеної теорії.

Результати роботи можуть бути використані у різних галузях промисловості – машинобудуванні, будівництві, видобуванні тощо.

Створені дослідні зразки нових вібромашин. Перевірена їх працездатність в умовах виробництва. Встановлено, що у порівнянні зі звичайними інерційними вібромашинами нові машини мають на 8-20% більшу продуктивність при меншому на 10-25% споживанні енергії.

НЕЗРІВНОВАЖЕНІСТЬ, АВТОБАЛАНСИР, ДВОЧАСТОТНА
ВІБРОМАШИНА, РЕЗОНАНСНИЙ ВІБРОЗБУДНИК

THE ABSTRACT

The Report about ECW: 80 p.; sources 85.

The object of research is two-frequency resonant vibrating machines for various purposes with vibrating exciters in the form of passive autobalancers. The purpose of the work is to create the foundations of the theory and design of resonant two-frequency vibrating machines with inertial vibrators in the form of passive car balancers.

The research methods are theoretical substantiation, computer 3D modeling of dynamics, computational and field experiments.

The project creates an approximate theory of new vibrating machines, based on the assumption that the autobalancer behaves dynamically as two independent inertial vibrators. This assumption simplifies the determination of vibration characteristics of new vibrating machines, and the calculation of their parameters. For the first time, the conditions of existence and stability of a family of established (almost) two-frequency movements are studied. For this purpose the generalized coordinates of masses of the vibromachine and total unbalance from cargoes are used. The accuracy of the approximate theory and limits of its application are estimated by search of more exact laws of vibrations of vibroplatforms. The laws of oscillating motion of vibroplatforms in higher approximations are determined. The value of corrections to the approximate laws of oscillations of vibroplatforms is estimated. According to the values of the amendments, a conclusion is made about the limits of application of the approximate theory. The results of the work can be used in various industries - mechanical engineering, construction, mining and more.

Prototypes of new vibrating machines have been created. Their efficiency in production conditions is checked. It is established that in comparison with usual inertial vibrating machines new cars have on 8-20% more productivity at smaller on 10-25% energy consumption.

UNBALANCE, AUTO-BALANCER, BALANCING, TWO-FREQUENCY
VIBRATORY MACHINE, RESONANCE VIBRATION EXCITER

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКЦІЯ ЗБУДНИКІВ ДВОХЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ У РЕЗОНАНСНИХ ВІБРОМАШИНАХ	12
1.1. Загальна характеристика розробки	12
1.2. Основні результати і висновки	15
1.3. Список опублікованих праць за темою розробки	15
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЗАСТРЯГАННЯ ВАНТАЖІВ В РАМКАХ ПЛОСКОЇ МОДЕЛІ РОТОРА З АВТОБАЛАНСИРОМ.....	18
2.1. Загальна характеристика розробки	18
2.2. Основні результати і висновки	24
2.3. Список опублікованих праць за темою розробки	26
РОЗДІЛ 3. ОДНОМАСОВІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМИ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА	30
3.1. Загальна характеристика розробки	30
3.2. Основні результати і висновки	37
3.3. Список опублікованих праць за темою розробки	41
РОЗДІЛ 4. ДВОХМАСНІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА	46
4.1. Загальна характеристика розробки	46
4.2. Основні результати і висновки	49

4.3. Список опублікованих праць за темою розробки	52
РОЗДІЛ 5. ТРЬОХМАСОВІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА	55
5.1. Загальна характеристика розробки	55
5.2. Основні результати і висновки.....	58
5.3. Список опублікованих праць за темою розробки	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69

ВСТУП

Актуальність. Серед вібромашин типу грохотів, вібростолів, віброконвеєрів, вибромлинів, вібросит тощо найбільш перспективними є багаточастотні і резонансні.

Загальновідомо, що багаточастотні вібрації інтенсифікують технологічні процеси. Доведено, що двочастотні вібрації забезпечують більш ефективно: зневоднення мінеральної сировини; розділення по крупності сипких матеріалів; подрібнення мінеральної сировини; збагачення вугілля, ущільнення бітоносумішей тощо. Багаточастотні вібрації можуть порушуватися в одно- і багатомасних вібромашинах різного призначення.

З іншого боку, резонансні вібромашини більш енергоефективні, оскільки в них вібророзбудник з меншою масою збуджує коливання платформи з більшою амплітудою. Існує кілька способів збудження резонансних коливань. В багатьох пристроях використовується електромеханічний вібророзбудник. Він має складну систему управління і важко адаптується до зміни маси віброплатформи під час виконання вібромашиною техпроцесу. В деяких пристроях використовується ефект Зоммерфельда. Маятник насаджений на ротор електродвигуна. Номінальна частота обертання ротора дещо менша резонансної частоти коливань віброплатформи. Через ефект Зоммерфельда маятник не може розігнатися до номінальної швидкості обертання ротора і застряє на резонансній частоті коливань платформи. Недолік методу полягає в тому, що електричний ланцюг двигуна при цьому перевантажений. Існує спосіб збудження в якому резонансні полічастотні коливання віброплатформи збуджуються за рахунок виникнення автоколивань. Вібророзбудник складається з декількох куль, що можуть вільно рухатися по кільцевим сегментам. Центр кривини кожного сегмента знаходиться на певній відстані від осі обертання. Недоліком способу є те, що область параметрів, у якій виникають резонансні коливання занадто мала.

Різні автори незалежно один від одного експериментально і обчислювальним експериментом виявили особливі режими руху роторів з автобалансирами – «майже періодичні». В них коригувальні вантажі не можуть здогнати ротор і застряють на одній з резонансних частот його коливань. Ними помилково припускається, що такий режим виникає тільки завдяки сил сухого тертя, що діють на корегувальні вантажі під час їх руху відносно корпусу автобалансира. Аналітичної теорії такого режиму руху немає. Автори не використовували цей режим, а боролися з ним для забезпечення працездатності пасивних автобалансирів.

Для збудження двочастотних резонансних вібрацій запропоновано використовувати пасивні автобалансири. Передбачається, що такі віброзбудники застосовні для одно- і багатомасних вібромашин з різною кінематикою руху віброплатформи.

Для цього використовується спеціальний режим руху вантажів (куль, роликів, маятників) в автобалансирі, що виникає при малих силах опору руху вантажів щодо корпусу автобалансира. В цьому режимі вантажі збираються разом, не можуть наздогнати вал, на який насаджений автобалансир і застряють на резонансній частоті коливань короба. Цим порушуються повільні резонансні коливання віброплатформи, призначенні для виконання основного техпроцесу (сепарації, просіювання, зневоження, подрібнення тощо). На корпус автобалансира встановлюється дебаланс. Корпус з дебалансом обертаються синхронно з валом. Цим порушуються швидкі коливання віброплатформи, призначені для інтенсифікації основного техпроцесу шляхом самоочищення сита, створення киплячого шару тощо. Параметри двочастотних вібрацій змінюються в широких межах зміною швидкості обертання валу, дебалансної маси на корпусі автобалансира, сумарної маси вантажів.

Передбачається, що віброзбудник у вигляді пасивного автобалансира застосовний для одно- і багатомасних вібромашин різного призначення з

різною кінематикою руху віброплатформи. Працездатність нового методу досліджена 3D моделюванням і натурним експериментом для одномасної вібромашини з прямолінійним поступальним чи поворотно-коливальним рухом вібромашини.

Тому актуальне: створення загальної теорії одно- і багатомасних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів; розробка принципів конструювання таких вібромашин; вироблення рекомендацій з забезпечення їх працездатності.

В роботі планується: розробити конструкції вібраційних машин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів; побудувати загальну теорію нових вібромашин; перевірити працездатність нових вібромашин теоретично, 3D моделюванням, натурними випробовуваннями.

Результати роботи дозволять створювати високопродуктивні і енергоефективні вібромашини для різних галузей промисловості: будівельної; дорожньо-будівельної; видобувної; машинобудівної; сільськогосподарської тощо. Це сприятиме підвищенню як енергонезалежності та енергобезпеки держави, так і продуктивності праці та ефективності виробництва.

Метою досліджень є – створення основ теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з інерційними віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Завдання, на вирішення яких спрямовано проект:

1) розробка технічних рішень з конструкції нових віброзбудників та вібромашин різного призначення (вібростолів, вібросит, грохотів, вібротранспортерів тощо);

2) розробка узагальнених теоретико-механічних моделей одно- і багатомасних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів, визначення у їх рамках: умов існування і стійкості двочастотних режимів руху віброплатформи; вигляду закону двочастотних

коливань; впливу параметрів автобалансира і вібромашини на характеристики вібрацій віброплатформи; енергоефективності.

3) перевірка одержаних результатів натурними експериментами і 3D-моделюванням.

4) розробка наближеної теорії нових вібраційних машин, визначення меж її застосування;

5) вироблення технічних рекомендацій із конструювання і забезпечення працездатності нових вібромашин.

Об'єкт досліджень - двочастотні резонансні вібромашини різного призначення з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Предмет досліджень - принципи конструювання, закономірності функціонування та працездатність двочастотних резонансних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Методи досліджень. Уперше досліджуються умови існування і стійкості сім'ї усталених (майже) двочастотних рухів. Для цього використовуються узагальнені координати мас вібромашини і сумарний дебаланс від вантажів.

Уперше створюється наближена теорія нових вібромашин, заснована на припущенні, що пасивний автобалансир у якості віброзбудника працює як два незалежних інерційних віброзбудника.

Оцінюється точність наближеної теорії і межі її застосування шляхом пошуку більш точних законів вібрації віброплатформи.

Наукова новизна одержаних теоретичних результатів. Будуть уперше створені основи теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів, зокрема:

1) запропоновані технічні рішення з конструкції нових віброзбудників та вібромашин різного призначення (вібростолів, вібросит, грохотів, вібротранспортерів тощо);

- 2) розроблені узагальнені теоретико-механічні моделі одно- багатомасних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів;
- 3) визначені умови працездатності різних вібромашин, зокрема: умови існування і стійкості двочастотних режимів руху віброплатформи; вигляд закону двочастотних коливань; вплив параметрів автобалансира і вібромашини на характеристики коливань віброплатформи.
- 4) розроблена наближена теорія нових вібраційних машин, визначені межі її застосування;
- 5) розроблені технічні рекомендації з конструювання нових вібромашин, та забезпечення їх працездатності.

Практичне значення одержаних результатів. Для впровадження на виробництві будуть розроблені:

- 1) технічні рекомендації з проектування резонансних двочастотних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів;
- 2) технічні рішення, зокрема – патенти для впровадження;
- 3) дослідні зразки віброста і вібростола для випробовування в умовах виробництва.

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКЦІЯ ЗБУДНИКІВ ДВОХЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ У РЕЗОНАНСНИХ ВІБРОМАШИНАХ

1.1. Загальна характеристика розробки

Актуальність теми. Серед вібраційних машин типу грохотів, вібростит, сепараторів перспективними є машини із двохчастотними збудниками вібрацій. У них при коливаннях платформи (решета, сита й т.п.) з більш низькою частотою виконується основний технологічний процес – сепарація, просівання, очищення. Коливання з більш високою частотою забезпечують:

- 1) самоочищення платформи;
- 2) зміна механічних властивостей оброблюваного матеріалу для збільшення інтенсивності основного процесу.

Серед вібраційних машин найбільше енергоефективні резонансні. Так само в таких машинах віброзбудники з меншою масою збуджують коливання платформи з більшою амплітудою.

За принципом роботи збудники діляться на: електромагнітні – вібрації генеруються змінними силами притягання електромагнітів; механічні, у тому числі відцентрові – вібрації генеруються за рахунок руху мас, у тому числі обертанням декількох дебалансів.

Електромагнітні віброзбудники надійні в роботі, енергоефективні, дозволяють генерувати вібрації, амплітуди й частоти яких міняються в широких межах. Однак вони мають складність конструкції, обслуговування й керування, особливо у випадку автоматичного підстроювання генеруємої частоти вібрацій під резонансну частоту коливань платформи.

Найбільш відомі конструкції механічних віброзбудників, приводний принцип яких засновано на застосуванні двох (декількох) інерційних віброзбудників з різною частотою збудження вібрацій. При використанні для цього двох незалежних приводів з різними швидкостями обертання

виходить громіздка конструкція. При використанні одного привода й зв'язку між валами, що несуть дебаланси (у вигляді редукторів, шестірень і т.п.) виходить твердий зв'язок між збуджуваними частотами. В обох випадках виникає складність у забезпеченні резонансних коливань платформи.

У планетарних віброзбудниках сателіт (бігунок) приводиться в рух повідцем (водилом). Двохчастотні вібрації генеруються двома способами. У першому способі перша, більш низька частота збуджується повідцем і сателітом при обкатуванні сателіта по напрямній (при коченню сателіта по центральному колесу). Друга, більш висока частота, генерується сателітом, при його власному обертанні за рахунок виконання сателіта неврівноваженим (є отвори в сателіті). У другому способі перша, більш низька частота збуджується, як і в першому способі. Друга, більш висока частота, збуджується за рахунок виконання на напрямної виступів, об які б'ється сателіт під час кочення. Недоліками конструкцій є твердий зв'язок між двома частотами коливань і складність підстроювання нижчої частоти під резонансну частоту коливань платформи.

Відомі комбіновані бігармонійні збудники. Перша – робоча частота коливань платформи генерується інерційним віброзбудником, а друга – для очищення сита – генерується електромагнітним віброзбудником або вібратором імпульсного впливу. Розглянуті рішення мають ряд недоліків: складність конструкцій, відсутність автоматичного підстроювання частоти збурених сил під резонансну частоту коливань платформи.

Розглянуті в оглядах відомі конструкції віброзбудників мають складні конструкції, їх важко підбудувати під резонансну частоту коливань платформи і т.д. Тому актуально розробити новий спосіб збудження двохчастотних вібрацій у резонансних вібромашинах, що усуває ці недоліки.

Метою роботи є: розробка нового способу збудження двохчастотних вібрацій у резонансних вібромашинах з використанням пасивних

автобалансирів.

Задачі досліджень:

1. Розробити нові конструкції двохчастотних збудників вібрацій і привести приклади їх застосування;
2. Запропонувати кінематичні схеми машин з різним рухом платформи, на які можуть бути встановлені двохчастотні віброзбудники;
3. Перевірити працездатність одного із запропонованих технічних рішень із застосуванням комп'ютерного 3D моделювання.

Об'єктом дослідження є двохчастотні збудники вібрацій.

Предметом дослідження є спосіб збудження двохчастотних вібрацій пасивними авто балансирами.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному: комп'ютерним 3D моделюванням доведена можливість використання відомих пристроїв за новим призначенням.

Достовірність результатів досліджень. Для рішення першої й другої задачі досліджень використовуються результати теорії роторних систем з автобалансирами, теорія квазіперіодичних рухів таких систем, елементи теорії вібраційних машин. Для рішення третьої задачі досліджень використовується 3D моделювання в комп'ютерній САПР Solidworks із застосуванням модуля Cosmos Motion.

Практична цінність.

1. Розроблений спосіб збудження двохчастотних вібрацій.
2. Проведені за допомогою 3D моделювання дослідження підтвердили можливість використання автобалансирів для збудження двохчастотних коливань у резонансних вібраційних машинах .

Технічні рішення захищені патентами України.

3 Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва ЦНТУ.

1.2. Основні результати і висновки

1. У роботі запропоновано використовувати кульові, роликові й маятникові автобалансири в якості збудників двохчастотних вібрацій, розроблені відповідні конструкції.

2. Запропоновані кінематичні схеми машин з різним рухом платформи (плоский або прямолінійно поступальний, коливально-обертальний, плоскопаралельний і т.д.), на які можна встановлювати двохчастотні віброзбудники.

3. Проведені за допомогою 3D моделювання дослідження підтвердили можливість використання автобалансирів для збудження двохчастотних коливань у резонансних вібраційних машинах і можливість зміни в широких межах характеристик вібрацій зміною сумарної маси коригувальних вантажів, маси на корпусі автобалансира, частоти обертання вала, на який насаджений автобалансир.

1.3. Список опублікованих праць за темою розробки

Наукові статті у журналах, що входять до наукометричної бази даних Scopus:

1. Filimonikhin, G., Yatsun, V. (2015). Method of excitation of dual frequency vibrations by passive autobalancers. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 4(7(76)), 9–14. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47116>

Проведений огляд конструкцій двохчастотних збудників вібрацій. Запропоновано збуджувати такі вібрації пасивними автобалансирами з коригувальними вантажами у вигляді куль, роликів або маятників. Наведені приклади нових віброзбудників. Запропоновані кінематичні схеми машин з різним рухом платформи. Перевірено працездатність одного із запропонованих технічних рішень комп'ютерним 3D моделюванням

динаміки вібромашини у комп'ютерній САПР SolidWorks.

Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України:

1. Яцун В.В. О технологических преимуществах вибрационных машин с круговыми двухчастотными вибрациями [Текст] / В.В. Яцун, Г.Б. Филимоныхин // Міжнародна науково-технічна конференція. "Сталий розвиток промисловості та суспільства". - Кривий ріг: ДВНЗ КНУ, 2014.

2. Филимоныхин Г.Б. 3D моделирование возбуждения автобалансином двухчастотных колебаний платформы грохота с использованием Solidworks и Cosmos motion [Текст] / Г.Б. Филимоныхин, В.В. Яцун // Дев'ята міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем" МОДС 2014. – Чернігів: ЧДІЕУ, 2014. – с. 218-221.

3. Філімоніхін Г.Б. Механізм збудження двохчастотних вібрацій пасивними автобалансирами [Текст] / Г.Б. Філімоніхін, В.В. Яцун // Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛДТ. – 2015. – С.26-27.

Патенти:

1. Пат. на корисну модель № 92337 У Україна. Застосування пасивного автобалансира як збудника кругових двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б.Філімоніхін, В.В.Яцун (Україна); КНТУ - № u201402718; Заявл. 18.03.2014; Опубл. 11.08.2014, Бюл.№15.

2. Пат. на корисну модель № 132928 Україна. Збуджувач двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун (Україна); ЦНТУ - №a201703021; Заявл. 25.09.2017; Опубл. 25.03.2019, Бюл.№6.

3. Пат. на корисну модель № 133639 Україна. Збудник двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун, А.В. Шиндер (Україна); ЦНТУ - №u201812268; Заявл. 11.12.2018; Опубл. 10.04.2019, Бюл.№7.

4. Пат. на винахід № 119678 Україна. Спосіб збудження двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун (Україна); ЦНТУ

- №a201703804; Заявл. 18.04.2017; Опубл. 25.07.2019, Бюл.№14.

5. Пат. на винахід № 119679 Україна. Спосіб збудження двочастотних ударно-коливальних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун (Україна); ЦНТУ - № a201703914; Заявл. 20.04.2017; Опубл. 25.07.2019, Бюл.№14.

6. Пат. на корисну модель № 137093 Україна. Спосіб збудження двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун (Україна); ЦНТУ - № a201703497; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 10.10.2019, Бюл.№19.

7. Пат. на корисну модель № 140801 Україна. Збудник двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун, В.С. Давидов (Україна); ЦНТУ - №u201908899; Заявл. 23.07.2019; Опубл. 10.03.2020, Бюл.№5.

8. Пат. на корисну модель № 140803 Україна. Збуджувач тричастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун, О.В. Пух (Україна); ЦНТУ - u201908908; Заявл. 23.07.2019; Опубл. 10.03.2020, Бюл.№5.

9. Пат. на корисну модель № 140805 Україна. Збудник двочастотних вібрацій [Текст] / Г.Б Філімоніхін, В.В. Яцун, В.М. Носик (Україна); ЦНТУ - u201908913; Заявл. 23.07.2019; Опубл. 10.03.2020, Бюл.№5.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЗАСТРЯГАННЯ ВАНТАЖІВ В РАМКАХ ПЛОСКОЇ МОДЕЛІ РОТОРА З АВТОБАЛАНСИРОМ

2.1. Загальна характеристика розробки

Актуальність теми. Для балансування на ходу швидкооберткових роторів застосовуються пасивні автобалансири – кульові (роликові), маятникові тощо. Ці ж пристрої з одним і більше вантажами можна використовувати у вібраційних машинах для збудження вібрацій.

Застосування автобалансирів за різними призначеннями можливо через те, що роторна машина з вантажами і вигляді куль (роликів), маятників може здійснювати різні усталені режими руху, що відповідають:

- автобалансуванню чи синхронному обертанню вантажів разом з ротором (стаціонарні рухи);
- застряганню вантажів (викликаною ефектом Зомерфельда);
- параметричним і іншим коливанням вантажів.

Для створення чисто резонансних вібраційних машин треба, щоб ротор був збалансований, а вантажі застрягали на резонансній швидкості обертання ротора. Найпростішим резонансним віброзбудником є один вантаж (маятник, куля, ролик), встановлений на зрівноважений ротор з можливістю руху центра мас вантажу по колу з центром на подовжній осі ротора.

Теоретично система роторна машина – автобалансир може здійснювати різні усталені рухи. Серед всіх можливих усталених рухів з часом система буде здійснювати тільки стійкі рухи. Тому при побудові аналітичної теорії таких машин розшукують всі можливі усталені рухи системи і досліджують їх стійкість.

Найбільш повну інформацію про зародження, зникнення, умови

існування і стійкість різних режимів руху системи надає біфуркаційна теорія. Як правило, за біфуркаційний параметр приймається швидкість обертання ротора. При цьому на певних швидкостях обертання ротора автобалансир може балансувати ротор, а на певних – збуджувати вібрації. Для побудови біфуркаційної теорії необхідно знайти і дослідити всі можливі усталені рухи системи, але це складна математична проблема.

На сьогодні найбільше аналітичних результатів отримано в рамках плоскої моделі ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах, що несе автобалансир з однаковими вантажами. Але при цьому недостатньо вивчені режими застрягання вантажів, викликані ефектом Зомерфельда. Так, знайдені і досліджені тільки ті режими застрягання, у яких вантажі зібрані разом.

Дослідження тільки такого режиму застрягання, у якому вантажі зібрані разом пояснюється наступним чином. Обчислювальними чи натурними експериментами можна виявити тільки стійкі усталені режими руху системи. Саме так були виявлені режими застрягання, у яких вантажі зібрані разом. Тому аналітична теорія будувалася саме для такого режиму, а питання про існування інших режимів застрягання не піднімалися.

Слід відзначити, що роторна система з автобалансиром може здійснювати і параметричні (усталені) коливання. Такі коливання, наприклад, були виявлені і досліджені у випадках:

– одномасної вібромашини з віброзбудником у вигляді кульового автобалансира, встановленого на ротор з ексцентриситетом;

– плоскої моделі ротора на ізотропних опорах з двохкульовим автобалансиром.

Описані результати показують, що поки побудувати аналітичну біфуркаційну теорію для розглядуваної системи неможливо, бо аналітично виявлені і досліджені не всі можливі усталені режими руху системи. Необхідним етапом побудови аналітичної біфуркаційної теорії

розглядуваної системи є дослідження всіх можливих режимів застрягання вантажів.

Актуально в рамках зазначеної моделі ротора і автобалансера аналітично знайти всі можливі режими застрягання вантажів. Це важливо для побудови аналітичних теорій як пасивного автобалансування, так і резонансних вібраційних машин, у яких автобалансер застосовується як віброзбудник.

Метою роботи є:

1. Пошук всіх можливих режимів застрягання вантажів в пасивному автобалансирі з багатьма однаковими вантажами в рамках плоскої моделі зрівноваженого ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах. Це дозволить як уникати такі режими при автоматичному балансуванні роторів, так і забезпечувати такі режими в вібраційних машинах.

2. Пошук і оцінка стійкості всіх усталених режимів руху системи, складеної з ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах і вантажу (маятника, кулі чи ролика), встановленого в роторі з можливістю відносного руху. Це дозволить з'ясувати, як використовувати подібні вантажі в вібраційних машинах для збудження резонансних коливань, надасть методи і підходи досліджень, придатні для випадку багатьох вантажів.

3. Розробка на прикладі зазначеної вібромашини методики дослідження можливих усталених режимів руху та оцінки їх стійкості. Це дозволить розв'язувати подібні задачі для інших вібромашин, зокрема – одномасних і багатомасних, з різною кінематикою руху віброплатформ.

Задачі досліджень:

1. Описати механіко-математичну модель системи ротор-автобалансер, записати диференціальні рівняння руху і рівняння стаціонарних рухів в рухомій системі координат.

2. За умови застрягання вантажів в автобалансирі знайти всі можливі рішення диференціальних рівнянь руху системи і перевірити знайдені

режими застрягання обчислювальним експериментом.

3. Знайти всі усталені режими руху зазначеної системи, умови їх зародження, існування і зникнення.

4. Аналітично дослідити стійкість усталених режимів руху.

5. Доповнити результати аналітичних досліджень обчислювальним експериментом.

6. Розробити методику дослідження усталених рухів конкретної вібромашини.

7. З використанням методики знайти всі усталені режими руху вібромашини при конкретних значеннях її параметрів, оцінити стійкість різних режимів.

8. Визначити застосовність різних режимів застрягання маятника для збудження вібрацій платформи.

Об'єктом дослідження є режими застрягання вантажів в рамках плоскої моделі ротора з автобалансиром.

Предметом дослідження є: методи дослідження режимів застрягання вантажів в рамках плоскої моделі ротора з автобалансиром.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблені основні припущення і підходи наближеної теорії вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів;

- знайдені майже двохчастотні режими руху одномасної вібромашини.

Достовірність результатів досліджень. Для побудови механіко-математичної моделі системи ротор-автобалансиром використовуються елементи теорій роторних машин з пасивними автобалансиром, класичної механіки, збурень, біфуркацій рухів.

Диференціальні рівняння руху системи записуються щодо системи координат, що обертається з постійною кутовою швидкістю. У такій системі координат:

- рух механічної системи описується системою звичайних нелінійних

автономних диференціальних рівнянь;

– всі режими застрягання вантажів є стаціонарними рухами за умови, що швидкість обертання рухомої системи координат збігається з кутовою швидкістю застрягання вантажів.

Пошук всіх можливих режимів застрягання вантажів зводиться до вирішення нелінійної системи алгебраїчних рівнянь. При цьому одночасно розшуковуються всі можливі частоти застрягання вантажів (кутові швидкості обертання рухомої системи координат), положення вантажів щодо обертової системи координат, відповідні відхилення ротора.

Для вирішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь використовується метод розкладання коренів рівнянь за ступенями малого параметра. При цьому розглянуті різні співвідношення малості між параметрами системи.

За біфуркаційний параметр прийнята кутова швидкість обертання ротора. Одержані результати теоретичних досліджень перевірені конкретними числовими розрахунками.

Практична цінність.

2. Розроблений спосіб збудження двочастотних вібрацій.
3. Одержані результати дозволяють як зменшувати області існування режимів застрягання, так і збільшувати. Це може бути використано при проектуванні автобалансирів для балансування роторів чи віброзбудників у вигляді авто балансирів
4. Режим застрягання вантажу з найменшою кутовою швидкістю (близька до резонансної) можна використовувати для збудження резонансних коливань в вібраційних машинах. Найбільша частота застрягання вантажу близька до швидкості обертання ротора. Цей режим можна використовувати для збудження нерезонансних коливань в вібраційних машинах.

Технічні рішення захищені патентами України.

4. Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва ЦНТУ.

5. Практичну цінність НДР підтверджує виконання двох госпдоговорів з:

- департаментом інфраструктури та промисловості КОДА на виконання науково-дослідної роботи “Забезпечення сепарації насіння зернових культур за рахунок розробки та впровадження енергозберігаючої, ресурсозберігаючої, енергоефективної, інноваційно-нової, універсальної вібростанини широкого призначення” (науковий керівник – канд. техн. наук, доц. Яцун В.В., відповідальний виконавець к.т.н., доц. Невдаха А.Ю. 2018 р.), термін виконання всієї роботи: 20.12.2018 р. – 31.12.2018 р., обсяг фінансування – 50 тис. грн.;

- Селянським (фермерським) господарством «Личук» на виконання науково-дослідної роботи “Дослідження можливостей зменшення вібрацій сільськогосподарської техніки шляхом зменшення незрівноваженостей обертових частин” (науковий керівник – д-р техн. наук, проф. Філімоніхін Г.Б., відповідальні виконавці – к.ф.-м.н., доц. Гончаров В.В. 2016, 2017 р.р. та к.т.н., доц. Яцун В.В. 2018 р.), термін виконання всієї роботи: 04.04.2016 р. – 30.09.2018 р., обсяг фінансування – 60 тис. грн.

Взаємодія з підприємствами України підтверджується 3-а актами впровадження:

- ТОВ "АЛЬЯНСБУДСЕРВІС", м. Кропивницький – при розробці нових і для модернізації вже випущених вібраційних сит;
- ПП "Центрвійськбуд", м. Кропивницький – при розробці нових і для модернізації вже випущених вібраційних столів;
- ПП "ДІАЛОГБУД" м. Кропивницький – при модернізації вже випущених вібраційних столів.

2.2. Основні результати і висновки

1. В рамках плоскої моделі динаміку зрівноваженого ротора на ізотропних опорах і кульового (роликового) чи маятничкового автобалансира описує автономна система диференціальних рівнянь.

Відносно системи координат, що обертається синхронно з вантажами, як режими застрягання вантажів, так і режими синхронного обертання вантажів з ротором є стаціонарними розв'язками системи диференціальних рівнянь. Отже, будь-який такий режим є станом відносної рівноваги механічної системи відносно рухомої системи координат.

2. Режими застрягання вантажів в системі ротор-автобалансир є однопараметричними сім'ями усталених рухів.

Кожен режим застрягання характеризується певною конфігурацією вантажів і відповідною частотою застрягання.

В системі координат, що синхронно обертається з вантажами:

- переміщення ротора є сталим;
- параметром є кут, що визначає напрямок вектора переміщення ротора;
- вантажі займають певні фіксовані положення відносно вектора переміщення ротора і ці положення залежать від швидкості обертання ротора.

У автобалансира з n_b однаковими вантажами різних конфігурацій вантажів n_b+1 . Загальна кількість різних режимів застрягання вантажів:

- $2(n_b+1)$, якщо n_b непарне;
- $2n_b+1$, якщо n_b парне.

Загальна кількість різних частот застрягання:

- $3(n_b+1)/2$, якщо n_b непарне;
- $3n_b/2+1$, якщо n_b парне.

Загальна кількість різних характерних швидкостей – n_b+2 . Характерні

швидкості є точками біфуркацій рухів, бо при їх переході зароджуються чи зникають однопараметричні сім'ї рухів, що відповідають певному режиму застрягання. В цих точках режими застрягання можуть набувати або втрачати стійкість.

3. Аналітично досліджені усталені режими руху системи, складеної зі зрівноваженого ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах, і вантажу (кулі, ролика, маятника), встановленого усередині ротора з можливістю відносного руху. При цьому маятник вільно насаджений на вал ротора, а куля чи ролик котяться без ковзання по кільцевій доріжці з центром на подовжній осі ротора.

4. Знайдено всі усталені режими руху системи, в яких вантаж обертається з постійною кутовою швидкістю. В системі координат, що синхронно обертається з вантажем, ці рухи стаціонарні, і:

– за відсутністю сил опору в системі вантаж синхронно обертається з ротором;

– за наявністю сил опору в системі вантаж відстає від ротора.

Режими застрягання вантажу є однопараметричними сім'ями усталених рухів. Кожен режим застрягання характеризується відповідною частотою застрягання.

В залежності від параметрів системи і швидкості обертання ротора можуть існувати одна чи три можливі швидкості застрягання вантажу.

5. Якщо на будь-якій швидкості обертання ротора існує тільки одна кутова швидкість застрягання вантажу, то відповідний режим руху (однопараметрична сім'я) глобально асимптотично стійкий. Якщо кількість швидкостей застрягання змінюється в залежності від кутової швидкості обертання ротора, то асимптотично стійкими є:

– єдиний існуючий режим застрягання (глобально стійкий, коли інших немає);

– режими застрягання з найменшою і найбільшою швидкостями.

6. Режим застрягання вантажу з найменшою кутовою швидкістю (близька до резонансної) можна використовувати для збудження резонансних коливань в вібраційних машинах. Найбільша частота застрягання вантажу близька до швидкості обертання ротора. Цей режим можна використовувати для збудження нерезонансних коливань в вібраційних машинах.

7. Із застосуванням методики для конкретної системи знайдені всі усталені режими руху, в яких маятник обертається з постійною кутовою швидкістю. Встановлено, що це – режими застрягання маятника.

В залежності від швидкості обертання вала можуть існувати одна чи три можливі швидкості застрягання маятника. Коли існує тільки одна кутова швидкість застрягання маятника, відповідний режим руху глобально асимптотично стійкий. Коли існують три швидкості застрягання локально асимптотично стійкі режими з найменшою і найбільшою швидкостями застрягання маятника.

2.3. Список опублікованих праць за темою розробки

Наукові статті у журналах, що входять до наукометричної бази даних Scopus, Web of Science:

1. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Filimonikhina, I., Ienina, I., Munshtukov, I. (2019). Studying the load jam modes within the framework of a flat model of the rotor with an autobalancer. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 5(7 (101)), 51-61. doi : <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177418>.

Аналітично досліджені режими застрягання вантажів (куль, роликів, маятників) в рамках плоскої моделі врівноваженого ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах, що несе автобалансир з багатьма однаковими вантажами.

Описана фізико-математична модель системи ротор-автобалансир. Записані диференціальні рівняння руху системи щодо системи координат, що обертається з постійною швидкістю обертання. Знайдено всі усталені режими руху, в яких вантажі застряють на постійній швидкості обертання. В системі координат, що синхронно обертається з вантажами, ці рухи стаціонарні.

2. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Podoprygora, N., Pirogov, V. (2019). Studying the excitation of resonance oscillations of an isotropic-supported rotor, induced by a pendulum, a ball, and a roller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 6, N 7 (102), 32-43. doi : 10.15587/1729-4061.2019.182995.

Аналітично досліджені усталені режими руху системи, складеної зі збалансованого ротора на ізотропних пружно-в'язких опорах, і вантажу (кулі, ролика, маятника), встановленого усередині ротора з можливістю відносного руху. При цьому маятник вільно насаджений на вал ротора, а куля чи ролик котяться без ковзання по кільцевій доріжці з центром на подовжній осі ротора. Описана фізико-математична модель системи. Записані диференціальні рівняння руху системи щодо системи координат, що обертається з постійною швидкістю обертання у безрозмірному вигляді. Знайдено всі усталені режими руху системи, в яких вантаж обертається з постійною кутовою швидкістю. В системі координат, що синхронно обертається з вантажем, ці рухи стаціонарні.

3. Filimonikhin G., Yatsun V., Filimonikhina I. (2020). Investigation of oscillations of platform on isotropic supports excited by a pendulum. *E3S Web Conf.* 168, 00025, 11. doi: <https://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016800025>. – Scopus.

В рамках плоскої моделі досліджені усталені режими руху системи, складеної з платформи на ізотропних пружно-в'язких опорах, вала на платформі і маятника, вільно насадженого на вал. У дослідженнях

використана розроблена методика, що ґрунтується на енергетичному методі, теорії біфуркацій рухів і ідеї параметричного розв'язання задачі.

Із застосуванням методики для конкретної системи знайдені всі усталені режими руху, в яких маятник обертається з постійною кутовою швидкістю. Встановлено, що це – режими застрягання маятника. Вони є однопараметричними сім'ями усталених рухів. Кожен режим характеризується відповідною частотою застрягання.

4. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Віртуальне визначення характеристик потоку в піщовому жолобі односпірального класифікатора / В.О. Кондратець, А.М. Мацуй // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2017. № 1, Р. 24-32. – Web of Science.

Розв'язана задача віртуального визначення характеристик піщового потоку на виході з механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром – висотою піщового тіла, яку можливо достатньо просто, точно і безконтактно виміряти порівняно недорогим технічним засобом в межах зміни циркулюючого навантаження циклу подрібнення-класифікації

Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України:

1. Matsui A.N. Research and neutralizing of spiral deterioration impact to the accuracy of measuring of the volume of sand classifier / V.A. Kondratets, A.N.Matsui, W.Surtel, Y.Amirgaliyev, V.Kovalenko, A. Iskakova // Proceeding of SPIE, Vol. 10445. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 1044565, 9 pages. doi: 10.1117/12.2280955

2. Філімоніхін Г.Б. Способи збудження двочастотних вібрацій пасивними автобалансирами [Текст] / Г.Б. Філімоніхін, В.В. Яцун // Тринадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛДТ. – 2017. – С. 80–83.

3. Філімоніхін, Г.Б. Идентификация закона колебаний короба грохота, возбужденных пассивным автобалансиром [Текст] / Г.Б. Філімоніхін, В.В. Яцун // Дванадцята міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем" МОДС 2017. – Чернігів: ЧНТУ, – 2017. – С. 154–157.

4. Яцун В.В. Двухчастотные режимы движения вибромашины с вибровозбудителем в виде пассивного автобалансира / В.В. Яцун, Г.Б. Филимонихин // II международная научно-техническая интернет-конференция «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли», 14 декабря 2017 г. Кривой Рог. – С. 293.

РОЗДІЛ 3. ОДНОМАСОВІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМИ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА

3.1. Загальна характеристика розробки

Актуальність теми. Серед вібромашин типу грохотів, вібросит, сепараторів перспективними є машини із двочастотними збудниками вібрацій [1-8]. У таких машинах при коливаннях короба (решета, сита й т.п.) з більш низькою частотою виконується основний техпроцес у вигляді сепарації, просіювання й т.п. Коливання з більш високою частотою забезпечують самоочищення короба і зміну механічних властивостей оброблюваного матеріалу для збільшення інтенсивності основного технологічного процесу.

Однак серед вібромашин найбільше енергоефективними є резонансні вібромашини. Тому актуально створити вібромашини, що поєднують переваги двочастотних і резонансних машин.

Для збудження двочастотних резонансних вібрацій авторами запропоновано використовувати пасивні автобалансири – кульові, роликові, маятникові. Для проектування вібромашин з новим віброзбудником необхідно досліджувати їх динаміку.

З одного боку, двочастотні вібрації забезпечують більш ефективний поділ по крупності мінеральної сировини, зневоднювання вугілля або фракціонування піску. Ефективність двочастотних вібрацій підтверджена для одномасної інерційної вібромашини.

З іншого боку, резонансні машини більш енергоефективні. Їх віброзбудники меншої маси збуджують коливання платформи з більшою амплітудою. Резонансні режими коливань платформи широко

застосовуються як для вібраційних млинів, грохотів, столів і т.д.

З вищесказаного випливає, що об'єднання двочастотних машин з резонансними дозволить поліпшити технологічно процеси обробки сировини й знизити енерговитрати.

Розглянуті способи збудження резонансних коливань вібротомашин, засновані на ефекті Зомерфельда. Відомий спосіб, у якому маятник насаджений на вал електродвигуна. Номінальна частота обертання ротора електродвигуна трохи менше резонансної частоти коливань платформи. Через ефект Зомерфельда маятник не може розігнатися до номінальної швидкості обертання ротора й застряє на резонансній частоті коливань платформи. Недолік методу полягає в тому, що електродвигун при цьому перевантажений. Відомий спосіб, у якому замість електродвигуна використовується вітрове колесо, сполучене з дебалансом. На колесо подається потік стисненого повітря. Колесо поступове розганяється до резонансної частоти коливань платформи. Недолік методу полягає в низькому коефіцієнті корисної дії системи « стиснене повітря – вітрове колесо – платформа». Відомий спосіб, у якому на вали малопотужних електродвигунів насаджені маятники. Згодом рух маятників синхронізується й вони застряють на резонансній частоті коливань платформи. Недолік способу – перевантаження електродвигунів.

Запропоновано збуджувати двочастотні резонансні вібрації платформи віброзбудником у вигляді кульового, роликового або маятничового автобалансира. Для цього використовується особливий режим руху маятників, куль або роликів, що виникає при малих силах опору руху вантажів щодо корпусу автобалансира. У цьому режимі вантажі збираються разом, не можуть наздогнати вал, на який насаджений автобалансир і застряють на резонансній частоті коливань платформи. Передбачається, що віброзбудник у вигляді пасивного автобалансира застосовний для одно-, дво-, тримасних вібротомашин з різною кінематикою руху платформ.

Для обґрунтування працездатності нового способу збудження вібрацій актуально для одномасної вібромашини встановити закон коливань її платформи й виявити вплив параметрів вібромашини на характеристики вібрацій.

Мета досліджень – теоретичне й експериментальне дослідження працездатності способу збудження двочастотних вібрацій пасивними автобалансирами для одномасної вібромашини з поступальним прямолінійним рухом віброплатформи.

Задачі досліджень.

1. Описати узагальнену модель одномасної вібромашини з віброзбудником у вигляді кульового, роликового, маятникового автобалансира й вивести її диференціальні рівняння руху;

2. Аналітично дослідити отриману модель, для чого:

– за умови застрягання вантажів в автобалансири знайти наближений розв'язок диференціальних рівнянь руху вібромашини й оцінити величини неврахованих (відкинутих) складових розв'язку;

– знайти частоти, на яких застряють вантажі залежно від швидкості обертання ротора.

3. Експериментально дослідити працездатність нового способу, для чого:

– створити стенд вібромашини;

– експериментально визначити характеристики стенда вібромашини, апробувати методи досліджень вібрацій платформи й установити тип її руху;

– підібрати коефіцієнти в передбачуваному законі зміни вібропришвидшень платформи грохоту з використанням методів статистичного аналізу;

– порівняти закон зміни віброприскорень платформи, знайдений

експериментально, із двочастотним законом, ідентифікованим методами статистичного аналізу;

4. Обчислювальним експериментом дослідити стійкість двочастотних режимів руху платформи, для чого:

– оцінити діапазони зміни безрозмірних параметрів, що впливають на динаміку вібромашини;

– обчислювальним експериментом дослідити стійкість раніше знайдених методами малого параметра двочастотних режимів руху платформи;

– оцінити точність наближених законів руху віброплатформи;

– обчислювальним експериментом оцінити вплив безрозмірних параметрів на критичну швидкість, по перевищенню якої двочастотний режим втрачає стійкість;

– обчислювальним експериментом знайти аналітичну функцію, для наближеного обчислення цієї критичної швидкості.

Об'єктом дослідження є процес збудження двочастотних вібрацій пасивними автобалансирами для одномасної вібромашини з поступальним прямолінійним рухом віброплатформи.

Предметом дослідження є методи дослідження двочастотних вібрацій пасивними автобалансирами для одномасної вібромашини з поступальним прямолінійним рухом віброплатформи.

Методи досліджень.

1. Для побудови механіко-математичної моделі вібромашини використовуються елементи теорії вібромашин і елементи теорії роторних машин з пасивними автобалансирами.

Для виведення диференціальних рівнянь руху використовуються основні теореми динаміки й рівняння Лагранжа II роду.

2. Для пошуку наближеного розв'язку системи диференціальних рівнянь руху й частот застрягання вантажів використовуються методи збурювань,

елементи теорії нелінійних коливань.

Синхронні режими руху шукаються при різних співвідношеннях між параметрами в актуальних для практики випадках:

- коли малі сили зовнішнього й внутрішнього опору;
- маса вантажів набагато менше маси платформи.

3. При розробці стенда грохоту використовуються основні відомості з теорії вібраційних машин.

Рух платформи вібромашини вивчається по рухові її рами. Рама розглядається як тверде тіло. Рух вивчається по вібропришвидженням. Це пов'язане з тим, що вібропереміщення (віброшкідкості) повільних коливань платформи значно більші вібропереміщень (віброшкідкостей) швидких коливань. Порівнянними є тільки вібропришвидження.

Вібропришвидження виміряються двома ідентичними датчиками акселерометрами MMA6231Q 2AX 1,5. Діапазон вимірів датчиків 1,5g. Для оцифровки сигналу використовується аналогово-цифрова плата ADXL202EB-232A з USB інтерфейсом фірми Motorola. Датчики з'єднуються із платою, а вона – з персональним комп'ютером.

Плата працює в 3-х режимах:

1) У режимі осцилографа на екран комп'ютера виводяться два графіка декількох коливань двох сигналів, захоплованих платою. Сигнали можна порівнювати по величині, фазі. Можна визначати їхні амплітуди й частоти.

2) У режимі спектрального аналізатора на екран комп'ютера виводиться графік спектра коливань.

3) У режимі самописа захоплюються й оцифровуються сигнали, що знімаються із двох датчиків.

Поступальний прямолінійний рух платформи перевіряється двома способами:

У першому – використовується лазерний нівелір. Він послідовно встановлюється на коротку й довгу сторони платформи. Відсутність кутових

коливань платформи перевіряється по рухові горизонтальної лінії, утвореної лазерним променем. Для цього лінія проектується на спеціальний екран з горизонтальними лініями.

У другому – використовуються два однакові датчики вібропришвидшень. Вони встановлюються на протилежних довгих (коротких) сторонах платформи, друг напроти друга. Плата використовується в режимі осцилографа. Порівнюються графіки вібропришвидшень, знятих із двох датчиків. При поступальному русі платформи показання датчиків практично ідентичні. При чисто кутових коливаннях платформи показання датчиків перебувають у протифазі.

Вид збуджуваних вібрацій платформи пропонується визначати з використанням елементів теорії коливань.

Спектр частот збуджуваних вібрацій визначається в режимі спектрального аналізатора.

Оцифрований і записаний у режимі самописа закон зміни вібропришвидшень інтерпретується як сигнал. Отримані дані зберігаються у вигляді таблиці.

На підставі проведених експериментів робиться припущення, що коливання платформи двочастотні. Коефіцієнти в законі зміни вібропришвидшень при двочастотних коливаннях ідентифікуються з використанням методу найменших квадратів, реалізованого в програмному пакеті для статистичного аналізу Statistica.

Порівнюються закони зміни вібропришвидшень, отримані експериментально й методами статистичного аналізу.

Додаткові деталі проведення експериментів описані при викладі результатів експериментів.

4. Методика дослідження стійкості двочастотних режимів руху.

Методика визначення настання двочастотного режиму руху.

Настання двочастотного режиму руху визначається по кутових

швидкостях обертання центрів мас вантажів. На двочастотному режимі руху ці швидкості повинні бути майже однаковими величинами, меншими швидкості обертання ротора.

Додатково двочастотний режим визначається по характерному виду графіка вібропришвидшень платформи.

Методика оцінки точності наближених формул.

Під «точними» законами руху вантажів і платформи будемо розуміти закони, отримані шляхом інтегрування диференціальних рівнянь руху. Точні й наближені закони руху порівнюються на певному інтервалі часу. На цьому інтервалі система робить усталений рух, і платформа робить трохи (3-5) повільних коливань.

Методика оцінки стійкості двочастотних режимів руху.

Безрозмірні параметри системи фіксуються. З точністю до 0,05 шукається найбільше значення безрозмірної швидкості обертання ротора – $n_{ст}$, на якій ще стійкий двочастотний режим руху. При її перевищенні на 0,05 цей режим втрачає стійкість.

Методика пошуку функції, що наближає критичну швидкість.

Вид функції встановлюється виходячи з результатів дослідження впливу різних параметрів на критичну швидкість. Коефіцієнти у функції визначаються методом найменших квадратів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше побудована узагальнена модель одномасної вібромашини з поступальним рухом платформи й віброзбудником у вигляді кульового, роликівого або маятникового автобалансира.

2. Виведені диференціальні рівняння руху вібромашини. Рівняння наведені до виду, що не залежить від типу автобалансира. Отримані рівняння застосовні як для аналітичного дослідження динаміки відповідних вібромашин, так і для проведення обчислювальних експериментів

3. Виконано оцінку впливу різних параметрів на критичну швидкість.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів.

Проведені теоретичні дослідження підтверджують, що одномасна вібромашина із прямолінійним поступальним рухом платформи й віброзбудником у вигляді пасивного автобалансира має усталені режими руху, близькі до двочастотних. На цих рухах вантажі в автобалансирі створюють постійну неврівноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті. Цим вантажі працюють як перший віброзбудник, що збуджує вібрації із частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою, на корпусі автобалансира. Маса обертається із частотою обертання ротора й збуджує більш швидкі вібрації.

Незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двочастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин вони не перевищують 2 %.

Практичне значення полягає у тому, що результати роботи можна використовувати на етапах проектування і розрахунку вібраційних машин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів. За результатами досліджень одержані 5 патентів на винаходи, у яких пропонуються різні конструкції віброзбудників і методів збудження двочастотних вібрацій.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва ЦНТУ.

3.2. Основні результати і висновки

1. Проведені теоретичні дослідження.

1.1. Побудована узагальнена модель одномасної вібромашини з поступальним рухом платформи й віброзбудником у вигляді кульового,

роликового або маятникового автобалансира.

1.2. Виведені диференціальні рівняння руху вібромашини. Рівняння наведені до виду, що не залежить від типу автобалансира. Отримані рівняння застосовні як для аналітичного дослідження динаміки відповідних вібромашин, так і для проведення обчислювальних експериментів.

2. У результаті аналізу отриманих диференціальних рівнянь руху встановлено наступне.

2.1. Одномасна вібромашина має режими усталеного руху, близькі до двочастотних. На цих рухах вантажі в автобалансирі створюють постійну неврівноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті. Цим вантажі працюють як перший віброзбудник що збуджує вібрації із частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою, на корпусі автобалансира. Маса обертається із частотою обертання ротора й збуджує більш швидкі вібрації із цією частотою.

2.2. Незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двочастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин вони не перевищують 2 %.

2.3. Коли малі сили зовнішнього й внутрішнього опору, маса вантажів набагато менше маси платформи існують три характерні швидкості обертання ротора. Ці швидкості більше резонансної частоти коливань платформи. При цьому:

- на швидкостях обертання ротора, менших першої характерної швидкості, існує єдина частота застрягання вантажів, причому вона менше резонансної частоти коливань платформи;

- на зарезонансних швидкостях обертання ротора, розташованих між першою й другою характерними швидкостями, існують три частоти застрягання вантажів, серед яких тільки одна дорезонансна;

– на зарезонансних швидкостях обертання ротора, розташованих між другою і третьою характерними швидкостями, існують три частоти застрягання вантажів, причому всі вони зарезонансні;

– на зарезонансних швидкостях обертання ротора, що перевищують третю характерну швидкість, існує єдина частота застрягання вантажів, причому вона зарезонансна й близька до швидкості обертання ротора.

Тільки на швидкостях обертання ротора, менших другої характерної швидкості, завжди існує, причому тільки одна, дорезонансна частота застрягання вантажів.

3. Обчислювальними експериментами встановлене наступне.

3.1. У реальних й енергоефективних вібромашинах повинні бути малими сили зовнішнього й внутрішнього опору, і маса вантажів набагато менше маси платформи. У цих умовах безрозмірні параметри, що визначають динаміку вібромашини, лежать в інтервалах $\varepsilon=0.005\div 0.05$; $\beta=0.1\div 0.6$; $\delta=0\div 1$; $h=0.01\div 0.07$. У цій області зміни параметрів у вібромашини існують три характерні швидкості обертання ротора (п. 3.3).

3.2. У стійкому двочастотному режимі руху вантажі: створюють найбільшу неврівноваженість, обертаються синхронно як одне ціле, застряють на найменшій можливій частоті застрягання й тільки якщо вона дорезонансна.

Існує критична швидкість, по перевищенню якої двочастотний режим руху втрачає стійкість. Ця швидкість менша другої характерної швидкості.

3.3. Підтверджено, що автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення точного розв'язку (знайденого інтегруванням) від наближеного (знайденого раніше методом малого параметра) еквівалентно відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин відхилення не перевищують 2 %.

3.4. Критична швидкість суттєво залежить від усіх безрозмірних параметрів системи. У розглянутій області зміни безрозмірних параметрів

критична швидкість монотонно змінюється по кожному параметру.

При зменшенні відношення маси куль до маси всієї системи (ε) критична швидкість прямує до другої характерної швидкості. Однак друга характерна швидкість не може бути використана для обчислення критичної швидкості. Це викликано тим, що навіть при незначному збільшенні ε критична швидкість стрімко відхиляється від характерної швидкості.

Для збільшення області стійкості двочастотного режиму руху необхідно:

- збільшувати масу вантажу або сумарну масу вантажів;
- зменшувати силу в'язкого опору, що перешкоджає руху вантажу;
- зменшувати силу в'язкого опору, що перешкоджає руху платформи;
- збільшувати частоту власних коливань платформи.

3.5. Другу характерну швидкість ефективно використовувати для пошуку виду функції, що наближає критичну швидкість. Коефіцієнти в цій функції визначаються за результатами обчислювального експерименту методом найменших квадратів. У розглянутій області зміни параметрів знайдена функція дає погрішність не більш 6%.

4. У результаті натурних експериментів, проведених на створеному стенді одномасної вібромашини встановлено наступне.

4.1. Ефективним методом одержання закону зміни вібропришвидчень окремих точок платформи вібромашини в числовому виді є проведення натурних експериментів. Експерименти були проведені на створеному стенді вібромашини й можуть бути повторені на інших вібромашинах, у яких двочастотні вібрації збуджуються кульовим автобалансиром.

4.2. У створеному стенді вібромашини платформа має три резонансні частоти й три відповідні форми коливань. При цьому кулі застряють на щонайнижчій резонансній частоті, чим збуджують першу форму коливань платформи. У результаті платформа робить чисті поступальні прямолінійні коливання по вертикалі, кутових складових немає.

Автобалансир працює як два окремі віброзбудника. У першому – кулі

щільно притиснуті друг до друга й практично рівномірно обертаються з резонансною частотою коливань платформи. При цьому кулі автоматично підбудовуються під цю частоту, незалежно від завантаження платформи, чим збуджують повільні резонансні коливання платформи (9,5 Гц) з великою амплітудою. У другому – маса на корпусі автобалансира збуджує швидкі коливання платформи з поточної зарезонансною частотою обертання ротора (48,8 Гц).

4.3. У припущенні, що платформа робить двочастотні коливання, у програмному пакеті для статистичного аналізу Statistica були підібрані коефіцієнти в законі зміни вібропришвидчень платформи. При цьому було встановлено, що:

- процес визначення величин коефіцієнтів стійкий (робастний), коефіцієнти практично не міняються від зміни інтервалу часу;
- амплітуда повільних коливань прямопропорційна сумарній масі куль;
- амплітуда швидких коливань прямопропорційна масі дебаланса на корпусі автобалансира.

4.4. Як на великих, так і невеликих інтервалах часу (за час декількох повільних коливань платформи), розбіжності між законами зміни вібропришвидчень платформи, знайденими експериментально й методом статистичного аналізу не перевищують 1%.

5. Створений дослідний зразок нової вібромашини. Перевірена її працездатність в умовах виробництва. Встановлено, що у порівнянні зі звичайною інерційною вібромашиною нова машина має на 15-25% більшу продуктивність при меншому на 10-40% споживанні енергії. При цьому дебалансні маси у новому віброзбуднику менші у 4-6 разів дебалансних мас у звичайному інерційному віброзбуднику.

3.3. Список опублікованих праць за темою розробки

Монографії, що публікуються за рішенням Вченої ради ЦНТУ
(підготовлена до друку):

Філімоніхін Г.Б., Філімоніхіна І.І. Автоматичне балансування роторів пасивними автобалансирами: конструкція, принцип дії, умови настання автобалансування. – Кропивницький: ЦНТУ, 2019. – 266 с.

Викладена емпірична (наближена) теорія пасивних АБ з твердими КГ, як систем, у яких КГ рухаються, принаймні, навколо однієї точки на поздовжній осі ротора. Досліджено геометричні масо-інерційні характеристики КГ, кінематика їх рухів, різні схеми балансування ними роторів. Розроблено емпіричні методи визначення умов настання автобалансування, і з їх застосуванням знайдені умови настання автобалансування як для жорстких роторів при різному пружному закріпленні, так і для гнучких роторів. Робота призначена для фахівців в області автоматичного балансування роторів, інженерно-технічних працівників і аспірантів.

Наукові статті у журналах, що входять до наукометричної бази даних SCOPUS:

1. Yatsun, V. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer / V. Yatsun, G. Filimonikhin, K. Dumenko, A. Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, N 1 (87). – P. 23–29. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101798

На створеному стенді грохота досліджені усталені вібрації короба, збуджені кульовим автобалансиром. Оцифрован закон зміни вібропришвидшень короба грохоту на усталено му русі. За допомогою програмного пакета для статистичного аналізу Statistica вібрації ідентифіковані як двочастотні. Розбіжність між законами зміни вібропришвидшень короба грохоту, знайденими експериментально і методами статистичного аналізу, не перевищує 1-го відсотка.

2. Yatsun, V. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer / Volodymyr Yatsun, Gennadiy Filimonikhin, Kostyantyn Dumenko, Andrey Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - Vol. 5, N 1 (89). - P. 19-25. doi : 10.15587/1729-4061.2017.111216

Побудовані узагальнені моделі одно-, двох- і трьохмасних вібромашин з пря молінійним поступальним рухом плат форм і віброзбудником у вигляді шарового, роликового або маятникового автобалансира. Виведені диференціальні рівняння руху. Рівняння приведені до вигляду, що не залежить від типу автобалансира. З узагальнених моделей можна отримувати частині, шляхом відкидання частини зовнішніх або внут рішніх пружно-в'язких опор.

3. Yatsun, V. Search for two-frequency motion modes of single-mass vibratory machine with vibration exciter in the form of passive auto-balancer / Volodymyr Yatsun, Gennadiy Filimonikhin, Kostyantyn Dumenko, Andrey Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - Vol. 6, – N 7(90). - P. 58-66. doi: 10.15587/1729-4061.2017.117683

Досліджено двочастотні режими руху одномасної вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформи і віброзбудником у вигляді кульового, роликового або маятникового автобалансира. Методом малого параметра наближено знайдені частоти, на яких можуть застрягати вантажі і відповідні закони двочастотних вібрацій платформи. Оцінені величини неврахованих в законах складов их.

4. Yatsun V. On stability of the dual-frequency motion modes of a single-mass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer / Volodymyr Yatsun, Gennadiy Filimonikhin, Antonina Haleeva, Andrey Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 2, N 7(92). – P. 59–67. doi: 10.15587/1729-4061.2018.128265 – Scopus, фахове видання.

Обчислювальними експериментами досліджена стійкість двочастотних режимів руху одномасної вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформи і вібробудником у вигляді двокульового автобалансира. Оцінена точність закону руху системи, раніше знайденого методами малого параметра. Знайдена функція, яка наближує критичну швидкість обертання ротора, при переході через яку зникає стійкість двочастотного режиму руху.

5. Yatsun V. Motion equations of the single-mass vibratory machine with a rotaryoscillatory motion of the platform and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer / V. Yatsun, I. Filimonikhina, N. Podoprygora, O. Hurievska // Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 6, N 7(96). – P. 58–67. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150339> – Scopus, фахове видання.

Описані механічні моделі одномасової вібромашини з поворотно-коливальним рухом платформи і вібробудником у вигляді пасивного автобалансира. Побудовані моделі застосовні як для аналітичного дослідження динаміки відповідних вібромашин, так і для проведення обчислювальних експериментів. В аналітичних дослідженнях моделі призначені для пошуку усталених режимів руху вібромашини, визначення умови їх існування і стійкості.

Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України:

1. Яцун, В.В. Динаміка одномасної вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформи і вібробудником у вигляді пасивного автобалансира / В.В. Яцун, Г.Б. Філімоніхін // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Київ, 19-22 червня 2018 року : тези доповідей. — 2018. — С. 49-52.

2. Yatsun, V. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a vibrator platform by a ball autobalancer /V. Yatsun // Міжнародна науково-

технічна інтернет-конференція «Інноваційний розвиток ресурсозберігаючих технологій видобутку та переробки корисних копалин», University of Petroşani, Румунія. — 2018. — С. 193-194.

3. Matsui, A. Analysis of the operation of a mechanical single-spiral classifier as a control object /A. Matsui, V. Kondratets // Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Інноваційний розвиток ресурсозберігаючих технологій видобутку та переробки корисних копалин», University of Petroşani, Румунія. — 2018. — С. 165-168.

4. Мацуй А. М., Кондратець В. О., Абашина А. А. Дослідження енергоефективності кульового завантаження млинів при подрібненні вихідної руди на збагачувальних фабриках. Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2019): матеріали XX Міжнародної конференції (Херсон, 16-20 вересня 2019 р.). Херсон, 2019. С. 71.

5. Yatsun, V. Studying the load jam modes within the framework of a flat model of the rotor with an auto-balancer /V. Yatsun, G. Filimonikhin // 2nd International scientific and technical internet conference “Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing”, Petroşani, Romania. November 15, 2019, Book of abstracts, P. 201-204.

РОЗДІЛ 4. ДВОХМАСНІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА

4.1. Загальна характеристика розробки

Актуальність теми. В розділі 2 аналітично досліджена працездатність описаного способу для одномасної вібромашини із прямолінійним поступальним рухом платформ. Там же проведений огляд літератури.

У данному розділі працездатність способу досліджується для двомасної вібромашини із прямолінійним поступальним рухом платформ.

Актуальність проведення таких досліджень пов'язана й тим, що двомасні вібромашини мають ряд переваг перед одномасними. У двомасних вібромашинах:

- частоти коливань платформ менш залежні від маси навантаження;
- можливе збудження антирезонансних коливань, при яких коливання платформ не передаються на фундамент;
- резонансні режими руху мають більші області існування й стійкості;
- можливе збудження комбінованих (полічастотних) резонансних коливань платформ із власними частотами коливань вібромашини;
- антирезонансний режим роботи вібраційної машини реалізується в широкій області параметрів, менше залежить від маси навантаження і т.д.

Об'єкт дослідження: двочастотні двохмасні резонансні вібромашини різного призначення з віброзбудниками у вигляді пасивних авто балансирів.

Предмет дослідження: Принципи конструювання, закономірності функціонування та працездатність двочастотних двохмасних резонансних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Мета досліджень: створення основ теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з інерційними віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Завдання, на вирішення яких спрямовано проект:

1) розробка технічних рішень з конструкції нових віброзбудників та вібромашин різного призначення (вібростолів, вібросит, грохотів, вібротранспортерів тощо);

2) розробка узагальнених теоретико-механічних моделей двомасних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних АБ, визначення у їх рамках: умов існування і стійкості двочастотних режимів руху віброплатформ; вигляду закону двочастотних коливань; впливу параметрів АБ і вібромашини на характеристики вібрацій віброплатформ; енергоефективності.

3) розробка наближеної теорії нових вібраційних машин, визначення меж її застосування;

Методи досліджень. Для виведення диференціальних рівнянь руху вібромашин використовуються основні теореми динаміки і рівняння Лагранжа II роду. Для пошуку двочастотних режимів руху використовуються методи збурень. Стійкість цих режимів вивчається аналітично, обчислювальними і натурними експериментами. Отримані результати перевіряються експериментально на стендах чи дослідних зразках вібромашин в умовах виробництва.

Наукова новизна.

Уперше створені основи теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних АБ, зокрема:

1) запропоновані технічні рішення з конструкції нових віброзбудників та вібромашин різного призначення (вібростолів, вібросит, грохотів, вібротранспортерів тощо);

2) розроблені узагальнені теоретико-механічні моделі однобагатомасних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних АБ;

3) визначені умови працездатності різних вібромашин, зокрема: умови існування і стійкості двочастотних режимів руху віброплатформ; вигляд закону двочастотних коливань; вплив параметрів АБ і вібромашини на характеристики коливань віброплатформ.

4) розроблена наближена теорія нових вібраційних машин, відповідно до якої АБ працює як два незалежних інерційних віброзбудника, визначені межі її застосування;

5) розроблені технічні рекомендації з конструювання нових вібромашин, та забезпечення їх працездатності.

Практичну цінність роботи.

Для практики актуальні конструкції нових віброзбудників і вібромашин різного призначення (грохотів, вібросит, вібромлинів, вібротранспортерів, вібросепараторів тощо), технічні рекомендації з конструювання і забезпечення працездатності нових вібромашин.

Самі резонансні двочастотні вібромашини дозволяють підвищити енергонезалежність держави та продуктивність праці. Вони затребувані у багатьох галузях виробництва, зокрема, у видобувній, сільськогосподарській, будівельній, машинобудівельній тощо.

Нові вібромашини мають переваги над світовими аналогами – найпростішу конструкцію, можливість регулювання параметрів вібрацій в широких межах. Це може привабити іноземних інвесторів. Також технічні рішення захищені патентами України, що дає можливість випускати такі вібромашини вітчизняними підприємствами без ліцензійних виплат закордонним підприємствам.

Результати розробки використовуються у навчальному процесі кафедр деталей машин та прикладної механіки, та будівельних, дорожніх машин і будівництва ЦНТУ.

4.2. Основні результати і висновки

1. Двомасна вібромашина із прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбудником у вигляді пасивного автобалансира завжди має режими усталеного руху, близькі до двочастотних. На цих рухах вантажі в автобалансирі створюють постійну неврівноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті. Цим вантажі працюють як перший віброзбудник, що збуджує вібрації із частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою на корпусі автобалансира. Маса обертається із частотою обертання ротора й збуджує більш швидкі вібрації із цією частотою.

Незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації платформ. Відхилення від двочастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин вони не перевищують 2 %.

2. У двомасній вібромашині дві власні частоти коливань. Вантажі можуть застрявати тільки на швидкостях, близьких до власних частот коливань вібромашини або до частоти обертання ротора.

У вібромашини завжди існує, причому тільки одна, частота застрягання вантажів, небагато менша швидкості обертання ротора.

При малих швидкостях обертання ротора існує єдина частота застрягання вантажів.

У випадку малих сил в'язкого опору в опорах у вібромашини зі збільшенням швидкості обертання ротора кількість частот застрягання вантажів збільшується, спочатку до 3-х, потім до 5-ти. При цьому нові частоти застрягання вантажів:

- з'являються парами біля кожної власної частоти коливань вібромашини;

- одна із частот трохи менша, а інша – трохи більша власної частоти коливань вібромашини.

Довільні сили в'язкого опору в опорах можуть заважати появі нових частот застрягання вантажів. Тому в найбільш загальному випадку таких частот може бути 1, 3 або 5, залежно від швидкості обертання ротора й величин сил в'язкого опору в опорах.

3. Проведені дослідження показують ефективність розробленої методики дослідження режимів застрягання вантажів у системах, подібних розглянутої. Методика ґрунтується на ідеї параметричного розв'язку завдання пошуку частот застрягання вантажів і теорії біфуркацій рухів. У методиці використовується те, що швидкість обертання ротора входить у рівняння частот застрягання вантажів лінійно. Тому конкретній частоті застрягання вантажів відповідає одна й тільки одна швидкість обертання ротора. Це дозволяє знайти всі можливі режими застрягання вантажів у параметричному виді, біфуркаційні точки, у яких ці режими з'являються або зникають. Теорія біфуркацій рухів дозволяє оцінити стійкість різних режимів застрягання.

4. У двомасової вібромашини дві резонансні частоти обертання ротора й дві відповідні форми коливань платформ. Застосування методики показало, що у випадку малих сил опору у вібромашини:

– п'ять можливих режимів застрягання вантажів, причому перша форма резонансних коливань платформ збуджується на режимах 1 і 2, друга – 3 і 4, а на 5-м режимі частота застрягання вантажів близька до частоти обертання ротора;

– стійкими є непарні режими застрягання (1,3,5);

– для збудження резонансних коливань платформ і промислового застосування підходять режими застрягання 1 і 3;

– зі збільшенням швидкості обертання ротора амплітуди коливань платформ, відповідні до певного режиму застрягання, монотонно зростають;

– амплітудою резонансних коливань платформ можна управляти зміною швидкості обертання ротора.

5. Сили в'язкого опору, що діють на першу платформу впливають на перший діапазон швидкостей обертання ротора, на якому збуджується перша резонансна форма коливань платформ. Зі зростанням сил опору перший діапазон зменшується аж до повного зникнення.

Внутрішні сили в'язкого опору, що діють між платформами, впливають на другий діапазон швидкостей обертання ротора, на якому збуджується друга форма резонансних коливань платформ. Зі зростанням сил опору другий діапазон зменшується аж до повного зникнення.

Сили в'язкого опору, що діють на вантажі при русі відносно автобалансира впливають на обидва діапазони. Зі збільшенням сил опору два діапазони зменшуються.

6. Установлено, що в розглянутій двомасовій вібромашини дві резонансні частоти й дві відповідні форми коливань платформ. При відсутності сил опору в системі:

– існує така швидкість застрягання вантажів, при якій здійснюється режим руху, на якому платформи 1 і 2 коливаються в протифазу, а збурена сила, що діє на станину з боку податливих опор дорівнює нулю;

– можливо підібрати такі значення параметрів опор, при яких частота коливань платформ у протифазному режимі збігається з більшою резонансною частотою.

У синтезованій вібромашини протифазний режим буде наступати за рахунок ефекту Зомерфельда при застряганні вантажів біля другої резонансної частоти. Однак для настання ефекту Зомерфельда потрібні сили в'язкого опору.

7. При наявності сил в'язкого опору в системі протифазний режим руху платформ не є ідеальним. Збурена сила, що діє з боку опор на станину не дорівнює нулю.

8. Чисельними методами досліджені динамічні характеристики вібромашини. Установлено що у випадку малих внутрішніх і зовнішніх сил

опору:

- теоретично існують п'ять можливих режимів застрягання вантажів;
- протифазна (друга) форма коливань платформ теоретично реалізується на 3-у і 4-у режимах застрягання;
- локально асимптотично стійким є 3-й режим застрягання, а 4-й – нестійкий;
- для застрягання вантажів біля другої резонансної частоти потрібно забезпечувати вібромашині початкові умови, близькі до 3-го режиму застрягання або плавно розганяти ротор до робочої частоти.

Противфазний режим руху платформ більш виражений на зарезонансних швидкостях обертання ротора.

Амплітуду противфазних коливань платформ можна збільшувати:

- збільшенням швидкості обертання ротора;
- одночасним збільшенням числа вантажів і сил в'язкого опору, що перешкоджають руху вантажів.

4.3. Список опублікованих праць за темою розробки

Наукові статті, що індексуються у наукометричній базі даних Scopus

1. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. (2018) Search for the dualfrequency motion modes of a dualmass vibratory machine with a vibration exciter in the form of passive autobalancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 1, – N 7 (91). – P. 47–54. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121737>

Аналітично знайдені двочастотні режими руху двомасної вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбудником у вигляді кульового, роликового або маятникового автобалансира. Із застосуванням методу малого параметра знайдені закони двочастотних вібрацій платформ і отримано рівняння для пошуку частот застрягання вантажів в автобалансирі.

Оцінені величини складових, не врахованих в законах двочастотних вібрацій

2. Yatsun, V. (2020). Studying the steady-state vibrations of a two-mass vibratory machine excited by a passive autobalancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 3, N 7 (105), 79-87. doi: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204882>

Аналітично-числовими методами досліджені усталені вібрації двомасової вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбуджувачем у вигляді кульового, роликового або маятникового автобалансира. Розроблено методику дослідження режимів застрягання вантажів в системах, подібних розглянутої. Методика ґрунтується на ідеї параметричного рішення задачі пошуку частот застрягання вантажів і теорії біфуркацій рухів.

Встановлено, що у двомасової вібромашини дві резонансні частоти обертання ротора і дві відповідні форми коливань платформ.

3. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Kyrychenko, A., Hrechka, A., Shcherbyna, K. (2020). Synthesizing a resonance antiphase two-mass vibratory machine whose operation is based on the sommerfeld effect. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies. – Vol. 6, – N 7 (108). – P. 58–67. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217628>

Синтезовано резонансну протифазну двомасову вібромашину з віброзбудником у вигляді пасивного автобалансира й досліджено її усталені вібрації.

Тези конференцій:

1. Яцун, В.В. Двочастотні режими руху двомасової вібромашини з віброзбудником у вигляді пасивного автобалансиру / В.В. Яцун, Г.Б. Філімоніхін // V Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 22-25 травня 2018 року : тези доповідей. — 2018. — С. 264-267.

2. Yatsun, V. Studying the load jam modes within the framework of a flat model of the rotor with an auto-balancer /V. Yatsun, G. Filimonikhin // 2nd International scientific and technical internet conference “Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing”, Petroşani, Romania. November 15, 2019, Book of abstracts, P. 201-204.

РОЗДІЛ 5. ТРЬОХМАСОВІ ВІБРОМАШИНИ З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ПЛАТФОРМ І ВІБРОЗБУДНИКОМ У ВИГЛЯДІ ПАСИВНОГО АВТОБАЛАНСИРА

5.1. Загальна характеристика розробки

Актуальність теми. Трьохмасові резонансні вібромашини широко використовуються в різних галузях виробництва. До таких машин відносяться: віброполірувальні і вібропритирочні машини; вібростоли віброконвеєри; вібромлини; вібротранспортери; і т.д. При цьому багатомасові вібромашини мають ряд переваг перед одномасовими:

- частоти коливань платформ менш залежні від маси навантаження;
- можливе збудження антирезонансних коливань, при яких коливання платформ не передаються на фундамент.

Відомі конструкції коли резонансні коливання збуджуються електромеханічними віброзбудниками. Частота коливань віброзбудників підбирається автоматично. Тому основним розв'язком задачі при проектуванні таких вібромашин є добір параметрів трьохмасової коливальної системи, що забезпечують необхідні закони руху мас (платформ).

В пасивному автобалансирі вантажі можуть застрягати на декількох швидкостях. Тому основним завданням досліджень динаміки таких вібромашин є пошук усіх можливих режимів усталеного руху. Для розв'язку цих завдань були розроблені узагальнені моделі одно-, дво- і трьохмасових вібромашин з поступальним рухом віброплатформ і віброзбудником у вигляді кульового, роликового або маятникового автобалансира. Виведені диференціальні рівняння руху вібромашин. Також аналітично досліджена працездатність описаного способу для одно масової і для двомасової вібромашини із прямолінійним поступальним рухом платформи.

Багатомасова конструкція дозволяє проектувати вібромашини, що практично не передають вібрації на фундамент. До таких машин відносяться й антирезонансні вібромашини. У трьохмасових антирезонансних вібромашинах проміжна платформа пружно-в'язко прикріплена до фундаменту. До проміжної платформи пружно-в'язко прикріплені активна платформа (робоча) і реактивна (динамічний гасник коливань). Антирезонансний режим коливань так само є резонансним. Але параметри вібромашини підібрані так, що проміжна платформа практично нерухлива, а активна й пасивна платформи коливаються в протифазі.

Отже актуально аналітично дослідити працездатність описаного способу для трьохмасової вібромашини із прямолінійним поступальним рухом платформи.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є пошук можливих двочастотних режимів руху віброплатформ трьохмасової вібромашини з поступальним прямолінійним рухом платформ, збуджені пасивним автобалансиром. Це необхідно для подальшого проектування подібних машин, чисельного дослідження режимів усталеного руху вібромашини.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- за умови застрягання вантажів в автобалансирі знайти наближено двочастотні режими руху вібромашини й оцінити величини неврахованих (відкинутих) складових;
- одержати рівняння для пошуку частот застрягання вантажів, провести його загальний аналіз;
- синтезувати трьохмасову антирезонансну вібромашину;
- чисельними методами дослідити динамічні властивості вібромашини при певних параметрах.

Об'єкт дослідження: двочастотні трьохмасні резонансні вібромашини різного призначення з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Предмет дослідження: Принципи конструювання, закономірності функціонування та працездатність двочастотних трьохмасних резонансних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

Методи дослідження. Для виведення диференціальних рівнянь руху вібромашин використовуються основні теореми динаміки і рівняння Лагранжа II роду. Для пошуку двочастотних режимів руху використовуються методи збурень. Параметри вібромашини підбираються з умов (існування антирезонансної частоти):

- існування деякої граничної частоти обертання дебалансного ротора, на якій амплітуда коливань проміжної платформи мінімальна;
- співпадіння граничної частоти з однієї із власних (резонансних) частот коливань вібромашини.

Вібромашина буде працювати на швидкостях обертання ротора, які перевищують граничну частоту. При цьому вантажі у віброзбуднику (за певних умов) будуть застрягати на відповідній резонансній частоті, чим будуть збуджувати антирезонансний режим руху платформ.

Числовий експеримент будемо проводити з використанням методики, заснованої на ідеї параметричного розв'язку завдання пошуку частот застрягання вантажів і теорії біфуркацій рухів.

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше створені основи теорії і конструювання резонансних двочастотних вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних АБ, зокрема:

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому що:

1. Розроблена наближена теорія нових вібраційних машин, відповідно до якої АБ працює як два незалежних інерційних віброзбудника, визначені межі її застосування
2. Розроблені підходи і методи дозволяють ефективно досліджувати динаміку і працездатність нових вібраційних машин, що розробляються в

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Спільно з ТОВ "Сервіс-Канон", м. Кропивницький, створено дослідний зразок вібростолу з розміром робочої поверхні 1000х600мм для виробництва будівельних матеріалів та дослідний зразок вібросита з розміром робочої поверхні 1000х600мм для просіювання будівельних матеріалів. Проведені їх виробничі випробування.

2. Результати досліджень використані в ТОВ "Кіровоградський будівельний альянс" при виготовленні композитних блоків з пінобетоном.

Модернізована конструкція вібраційного сита «СО-50» на підприємствах ПП «Діалогбуд» та ТОВ «Альянсбудсервіс». Модернізована конструкція вібраційного стола «2УВ» – ПП «Центрвійськбуд»

5.2. Основні результати і висновки

Розробка є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень **вирішена актуальна наукова задача**, що полягає у створенні основ теорії і конструювання резонансних двочастотних вібротомашин з інерційними віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів.

1. Трьохмасова вібротомашина із прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбудником у вигляді пасивного автобалансира завжди має усталені режими руху, близькі до двочастотних. На цих рухах вантажі в автобалансири створюють постійну невірноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті. Цим вантажі працюють як перший віброзбудник, що збуджує вібрації із частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою на корпусі автобалансира. Маса обертається із частотою обертання ротора й збуджує більш швидкі вібрації із цією частотою.

Незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації платформ. Відхилення від

двочастотного закону не перевищують 5 %.

2. У трьохмасовій вібромашини три власні частоти коливань. Вантажі можуть застрягати тільки на швидкостях, близьких до власних частот коливань вібромашини або до частоти обертання ротора.

У вібромашини завжди існує, причому тільки одна, частота застрягання вантажів, небагато менша швидкості обертання ротора.

У випадку малих сил в'язкого опору в опорах у вібромашини зі збільшенням швидкості обертання ротора нові частоти застрягання вантажів:

– з'являються парами біля кожної власної частоти коливань вібромашини;

– одна із частот трохи менше, а інша – трохи більше власної частоти коливань вібромашини.

Довільні сили в'язкого опору в опорах можуть заважати появі нових частот застрягання вантажів. Тому в найбільш загальному випадку таких частот може бути 1, 3, 5 або 7, залежно від швидкості обертання ротора й величин сил в'язкого опору в опорах.

3. Теоретичні дослідження показали, що в трьохмасовій вібромашині присутні три резонансні частоти й три відповідні форми коливань платформ. Для такої вібромашини можна підібрати значення параметрів опор, що забезпечують існування антирезонансного режиму руху. На антирезонансному режимі платформа 3, в'язко-пружно прикріплена до землі, практично не коливається, а платформи 1 і 2, приєднані до платформи 3, коливаються в протифазах.

В антирезонансній вібромашині активною (робочою) може бути платформа 1, тоді платформа 2 буде реактивною (динамічним віброгасником) і навпаки. При цьому вібромашина буде працювати при установці автобалансира як на платформі 1, так і на платформі 2.

Антирезонансний режим буде наступати при застряганні вантажів біля

другої резонансної частоти коливань платформ.

4. Числові розрахунки показали, що у випадку малих сил опору у вібромашини:

- теоретично існують сім можливих режимів застрягання вантажів;
- друга (антирезонансна) форма коливань платформ теоретично реалізується на 3-у і 4-у режимах застрягання вантажів;
- локально асимптотично стійким є 3-й режим застрягання, а 4-й - нестійкий;
- для застрягання вантажів біля другої резонансної частоти потрібно забезпечувати вібромашині початкові умови, близькі до 3-го режиму застрягання або плавно розганяти ротор до робочої частоти;
- динамічними характеристиками вібромашини можна управляти в широких межах зміною швидкості обертання ротора й сил в'язкого опору.

5.3. Список опублікованих праць за темою розробки

Захищена дисертація:

Олійніченко Л.С. Зменшення вібрацій осьових вентиляторів балансуванням звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – Динаміка і міцність машин. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2018. Науковий керівник – д.т.н., проф. Філімоніхін Г.Б.

Доведена можливість статичного і динамічного балансування звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки осьового вентилятора, як до початку експлуатації – коригуванням мас, так і під час роботи вентилятора – пасивними АБ. Розроблена методика розрахунку аеродинамічної незрівноваженості. Вироблені рекомендації з балансування незрівноваженостей осьового вентилятора коригуванням мас і пасивними АБ. Натурним експериментом встановлено, що при статичному балансуванні

віброшвидкості в площині крильчатки зменшуються не менше, ніж на 42 % від максимально допустимої величини, а при динамічному – не менше, ніж на 54 %. Встановлено, що при динамічному балансуванні на вибігу при переході ротора через резонансні швидкості величина віброшвидкостей зменшується не менше, ніж на 80%. Встановлено, що приєднання додаткових мас до захисного кожуха вентилятора зменшує його вібрації, але не знижує навантаження на підшипники. Комп'ютерне моделювання динаміки вентилятора підтвердило якісні результати раніше проведеного натурного експерименту. Багатофакторним віртуальним експериментом підібрані оптимальні параметри вентилятора і АБ для динамічного балансування крильчатки з ротором електродвигуна.

Опубліковані статті у журналах, що індексуються у наукометричній базі даних Scopus:

1. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Haleeva, A., Krivoblotsky, L., Machok, Yu., Mezitis, M., Podoprygora, N., Sadovyi, M., Strautmanis, G. (2020). Searching for the two-frequency motion modes of a three-mass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 4, N 7 (106), 103-111. <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209269>.

Аналітично досліджено динаміку трьохмасової вібромашини з прямолінійним поступальним рухом платформ і віброзбуджувачем у вигляді кульового, роликового або маятникового автобалансира.

Встановлено існування усталених режимів руху вібромашини, близьких до двочастотних. На цих рухах вантажі в автобалансирі створюють постійну невірноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті. Цим вантажі працюють як перший віброзбудник, що збуджує резонансні вібрації з частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою на корпусі автобалансира. Маса обертається з частотою обертання ротора і збуджує швидші вібрації з цією

частотою. Автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двухчастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси платформи, на якій знаходиться автобалансир і не перевищують 5 %.

У трьохмасової вібромашини три резонансні (власні) частоти коливань – q_1, q_2, q_3 ($q_1 < q_2 < q_3$) і три відповідні форми коливань платформ. Вантажі можуть застряти тільки на швидкостях, близьких до: резонансних (власних) частот коливань вібромашини; частоті обертання ротора.

У вібромашини завжди існує, причому тільки одна, частота застрягання вантажів, трохи менша швидкості обертання ротора.

У разі малих сил в'язкого опору в опорах у вібромашини зі збільшенням швидкості обертання ротора нові частоти застрягання вантажів:

– з'являються парами в околі кожної власної частоти коливань вібромашини;

– одна з частот дещо менше, а інша – дещо більше власної частоти коливань вібромашини.

Довільні сили в'язкого опору в опорах можуть заважати появи нових частот застрягання вантажів. Тому в найбільш загальному випадку таких частот може бути 1, 3, 5 або 7, в залежності від швидкості обертання ротора і величин сил в'язкого опору в опорах.

Одержані результати застосовні для проектування нових вібромашин та для числового моделювання їх динаміки.

2. V. Yatsun, G. Filimonikhin, V. Pirogov, V. Amosov, P. Luzan. Research of anti-resonance three-mass vibrating machine with a vibration exciter in the form of a passive autobalancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, N 7 (107), 89-97. <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213724>.

Аналітично синтезована трьохмасова антирезонанса вібромашина з віброзбудником у вигляді пасивного автобалансира. У вібромашини

платформи 1 і 2 пружно-в'язко прикріплені до платформи 3. Платформа 3 пружно-в'язко прикріплена до фундаменту. Руху вантажів щодо корпусу автобалансира перешкоджають сили в'язкого опору.

Теоретичні дослідження показали, що у вібронашини три резонансні частоти і три відповідні форми коливань платформ. Аналітично підібрані значення параметрів опор, що забезпечують існування антирезонансного режиму руху. На антирезонансному режимі платформа 3 практично не коливається, а платформи 1 і 2 коливаються в протифазі.

У вібронашини активної (робочої) може бути платформа 1, тоді платформа 2 буде реактивної (динамічним віброгасником) і навпаки. При цьому вібронашина буде працювати при установці віброзбудника як на платформі 1, так і на платформі 2.

Антирезонансний режим буде наступати при застряганні вантажів в околі другої резонансної частоти коливань платформ.

При конкретних параметрах вібронашини, чисельними методами досліджені її динамічні характеристики. Числові розрахунки показали, що в разі малих внутрішніх і зовнішніх сил опору у вібронашини:

- теоретично існують сім можливих режимів застрягання вантажів;
- друга (антирезонансна) форма коливань платформ теоретично реалізується на 3-му і 4-му режимах застрягання вантажів;
- локально асимптотично стійким є 3-й режим застрягання, а 4-й - нестійкий;
- для застрягання вантажів в околі другої резонансної частоти потрібно забезпечувати вібронашині початкові умови, близькі до 3-о режиму застрягання чи плавно розганяти ротор до робочої частоти;
- динамічними характеристиками вібронашини можна управляти в широких межах зміною як швидкості обертання ротора, так зовнішніх і внутрішніх сил в'язкого опору.

Отримані результати застосовні при проектуванні трьохмасових

антирезонансних машин широкого призначення.

Опубліковані тези конференцій:

1. Matsui, A. Loading device for ball mills with different sized grinding bodies /A. Matsui, V. Kondratets, A. Abashina // 2nd International scientific and technical internet conference “Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing”, Petroşani, Romania. November 15, 2019, Book of abstracts, P. 150-153.

2. Мацуй А. М., Кондратець В. О., Абашина А. А. Обґрунтування вибору діаметра кулі перетворювача енергоефективності подрібнення руди в кульовому млині. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 01-03 квітн. 2020 р.). Івано-Франківськ, 2020. С.106-108.*

3. Мацуй А. М., Кондратець В. О., Абашина А. А. Математичне моделювання зв'язку середньогармонічної зваженої крупності та середньозваженої крупності в технологічних процесах рудопідготовки. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 25-28 трав. 2020 р.). Кам'янське, 2020. С.68-70.*

4. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.В. Рівні завдань та структура функціонування системи технічного сервісу транспортних машин. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції 25-27 березня 2020 р. Рівне : НУВГП, 2020. С. 123-125.

5. А.М. Мацуй, В.О. Кондратець, А.А. Абашина. Віртуальне оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина, що подрібнює руду збагачувальних фабрик. Міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток промисловості та суспільства», Україна, Кривий Ріг, 2020. – С. 252.

6. A.N. Matsui, V.A. Kondratets, A.A. Abashina. Energy efficiency

optimization of ore grinding by ball mills in a closed cycle with a single-spiral classifier. International Scientific and Practical Conference «Modeling, Control and Information Technologies», М. РИВН, 2020. – С. 96-99. doi:10.31713/MCIT.20

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Уперше запропонований новий спосіб використання пасивних автобалансирів (кульових, роликівих й маятникових) в якості збудників двохчастотних вібрацій, розроблені відповідні конструкції віброзбудників.

2. Спосіб застосовний для одно- і багатомасових вібромашин з різною кінематикою руху платформ. Запропоновані кінематичні схеми вібромашин з різним рухом платформи (плоский або прямолінійно поступальний, коливально-обертальний, плоскопаралельний і т.д.), на які можна встановлювати двохчастотні віброзбудники.

3. Уперше розроблені аналітико-числові методи дослідження динаміки вібромашин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів. Методи ґрунтуються на елементах теорії біфуркацій рухів, методі малого параметра, ідеї параметричного розв'язання рівняння частот, яке призначене для пошуку можливих частот застрягання вантажів.

4. Аналітичними дослідженнями, 3D моделюванням і натурними експериментами доведена працездатність способу для одно-, дво- і трьохмасових вібромашин з прямолінійним поступальним рухом платформ.

Уперше встановлено:

- 1) Автобалансир працює як два незалежних інерційних збудника вібрацій. Вібромашина має режими усталеного руху, близькі до двохчастотних. На цих рухах вантажі в автобалансири створюють постійну неврівноваженість, не можуть наздогнати ротор і застряють на певній частоті, близької до резонансної. Цим вантажі працюють як перший – резонансний віброзбудник, що збуджує вібрації із частотою застрягання вантажів. Другий віброзбудник утворюється дебалансною масою, на корпусі автобалансира. Маса обертається із частотою обертання ротора й збуджує більш швидкі вібрації із цією частотою.

- 2) Незважаючи на сильну асиметрію опор, автобалансир збуджує практично ідеальні двочастотні вібрації. Відхилення від двочастотного закону пропорційні відношенню маси вантажів до маси всієї машини. Тому для реальних машин вони не перевищують 2 %.
 - 3) У вібротомашини завжди існує непарна кількість кутових швидкостей застрягання вантажів. Одна швидкість застрягання вантажів близька до швидкості обертання ротора. Інші – народжуються і зникають парами в околі певної резонансної частоти коливань вібротомашини. Кожному режиму застрягання вантажів відповідає свій діапазон кутових швидкостей застрягання, причому діапазони, що відповідають різним режимам не перетинаються.
 - 4) Локально асимптотично стійкими є тільки непарні режими застрягання, якщо пронумерувати їх в порядку зростання кутових швидкостей застрягання вантажів.
 - 5) Параметри вібрацій платформ можна змінювати у широких межах шляхом зміни зовнішніх і внутрішніх сил опор, сумарної маси вантажів, кутової швидкості обертання ротора.
5. При збудженні певних резонансних коливань системи виникає відповідна форма резонансних коливань платформ. Це можна використовувати наступним чином:
- 1) У випадку одномасової вібротомашини для виникнення відповідної форми коливань платформи не потрібні додаткові кінематичні обмеження, що накладаються на рух платформи, достатньо, щоб при резонансі вона здійснювала потрібні коливання.
 - 2) У випадку двомасової вібротомашини можна спроектувати протифазну вібротомашину, у якій платформи коливаються у протифазі, а головний вектор сил, що діють на станину з боку опор (майже) дорівнює нулю. Така вібротомашина майже не передає вібрації на фундамент.

3) У випадку трьохмасової вібромашини можна спроектувати антирезонансну вібромашину. У такій вібромашині робоча платформа (активна) коливається у протифазі з реактивною платформою, а платформа, що встановлена на станину майже не коливається. Така вібромашина майже не передає вібрації на фундамент і на станину.

6. Створені дослідні зразки нових вібромашин. Перевірена їх працездатність в умовах виробництва. Встановлено, що у порівнянні зі звичайними інерційними вібромашинами нові машини мають на 8-20% більшу продуктивність при меншому на 10-25% споживанні енергії. При цьому дебалансні маси у новому віброзбуднику менші у 4-6 разів дебалансних мас у звичайному інерційному віброзбуднику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**До розділу 2**

1. Thearle, E. L. (1950). Automatic dynamic balancers (Part 2 – Ring, pendulum, ball balancers). *Machine Design*, 22 (10), 103–106.
2. Філімоніхін, Г. Б. (2004). Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами. Кіровоград: КНТУ, 352. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5667>
3. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Ienina, I., Rahulin, S. (2019). A procedure of studying stationary motions of a rotor with attached bodies (auto-balancer) using a flat model as an example. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (99)), 43–52. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169181>
4. Green, K., Champneys, A. R., Lieven, N. J. (2006). Bifurcation analysis of an automatic dynamic balancing mechanism for eccentric rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 291 (3-5), 861–881. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.06.042>
5. Артюнин, А. И. (1993). Исследование движения ротора с автобаланси́ром. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1, 15–19.
6. Sommerfeld, A. (1904). Beitrage zum dynamischen Ausbay der Festigkeislehre. *Zeitschrift des Vereins Deutsher Ingenieere*, 48, 631–636.
7. Artyunin, A. I., Eliseyev, S. V. (2013). Effect of “Crawling” and Peculiarities of Motion of a Rotor with Pendular Self-Balancers. *Applied Mechanics and Materials*, 373-375, 38–42. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.373-375.38>
8. Artyunin, A. I., Eliseev, S. V., Sumenkov, O. Y. (2018). Experimental Studies on Influence of Natural Frequencies of Oscillations of Mechanical System on Angular Velocity of Pendulum on Rotating Shaft. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 159–166. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_17

9. Ryzhik, B., Sperling, L., Duckstein, H. (2004). Non-synchronous Motions Near Critical Speeds in a Single-plane Autobalancing Device. *Technische Mechanik*, 24, 25–36.
10. Lu, C.-J., Tien, M.-H. (2012). Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 32, 251–268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.06.001>
11. Jung, D., DeSmidt, H. A. (2016). Limit-Cycle Analysis of Planar Rotor/Autobalancer System Influenced by Alford's Force. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138 (2). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4032511>
12. Jung, D., DeSmidt, H. (2017). Nonsynchronous Vibration of Planar Autobalancer/Rotor System With Asymmetric Bearing Support. *Journal of Vibration and Acoustics*, 139 (3). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4035814>
13. Jung, D. (2018). Supercritical Coexistence Behavior of Coupled Oscillating Planar Eccentric Rotor/Autobalancer System. *Shock and Vibration*, 2018, 1–19. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4083897>
14. Yaroshevich, M. P., Zabrodets, I. P., Yaroshevich, T. S. (2015). Dynamics of vibrating machines starting with unbalanced drive in case of bearing body flat vibrations. *Naukovyi visnyk NHU*, 3, 39–45.
15. Кузьо, І. В., Ланець, О. В., Гурський, В. М. (2013). Синтез низькочастотних резонансних вібраційних машин з аероінерційним збуренням. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 2, 60–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11
16. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Dumenko, K., Nevdakha, A. (2017). Search for two-frequency motion modes of single-mass vibratory machine with vibration exciter in the form of passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (90)), 58–66. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117683>
17. Антипов, В. И., Денцов, Н. Н., Кошелев, А. В. (2014). Динамика параметрически возбуждаемой вибрационной машины с изотропной упругой

системой. *Фундаментальные исследования*, 8, 1037–1042. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34713>

18. Gorbenko, A., Strautmanis, G., Filimonikhin, G., Mezitis, M. (2019). Motion modes of the nonlinear mechanical system of the rotor autobalancer. *Vibroengineering PROCEDIA*, 25, 1–6. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.20699>

19. Strauch, D. (2009). *Classical Mechanics: An Introduction*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73616-5>

20. Nayfeh, A. H. (1993). *Introduction to Perturbation Techniques*. Wiley-VCH, 536.

21. Ruelle, D. (1989). *Elements of Differentiable Dynamics and Bifurcation Theory*. Academic Press, 196. doi: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11426-2>

До розділу 3

1. Filimonikhin, G., Yatsun, V. (2015). Method of excitation of dual frequency vibrations by passive autobalancers. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4(7(76)), 9–14. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47116>

2. Filimonikhin G., Yatsun V., Filimonikhina I., Ienina I., Munshtukov I. Studying the load jam modes within the framework of a flat model of the rotor with an autobalancer / Gennadiy Filimonikhin, // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, N 7 (101). P. 51–61. doi : 10.15587/1729-4061.2019.177418

3. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Podoprygora, N., Pirogov, V. (2019). Studying the excitation of resonance oscillations in a rotor on isotropic supports by a pendulum, a ball, a roller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7 (102)), 32-43. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.182995>

4. Лавендела, Э. Э. *Вибрации в технике*. [Текст] Т. 4.

Вибрационные процессы и машины / Э. Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.

5. Булат, А. Ф. Влияние поличастотных колебаний просеивающих поверхностей вибрационных грохотов на разделение сыпучих материалов [Текст] / А. Ф. Булат, Г. А. Шевченко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – Вип. 4. – С. 137–143.

6. Мамонов, С. В. Условия самоочистки просеивающей поверхности грохота для тонкого гидравлического грохочения [Текст] / С. В. Мамонов, Е. Ф. Цыпин, Е. В. Братыгин // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – №5. – С. 106–111

7. Лапшин, Е. С. Анализ состояния развития вибрационного грохочения при обезвоживании минерального сырья [Текст] / Е. С. Лапшин, А. И. Шевченко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – 2012. – Вип. 101. – С. 84–104.

8. Гаркавенко, Е. Е. Применение вибрационной техники с бигармоническим режимом колебаний при обогащении углей [Текст] / Е. Е. Гарковенко, Е. И. Назимко, С. Л. Букин и др. // Уголь Украины. – 2011. – С. 41–44.

9. Репин, С. В. Теоретическое и экспериментальное исследования виброударного грохота для фракционирования песка [Текст] / С. В. Репин, С. А. Сизиков, А. П. Скрипилов // Вестник гражданских инженеров : науч.-техн. журн. – 2013. – №5. С. 188–193.

10. Букин, С. Л. Исследования четырехвибраторной инерционной одномассовой вибромашины в стационарном режиме [Текст] / С. Л. Букин, С. Г. Маслов, Р. А. Шолда // Прогресив. технології і системи машинобуд. : міжнар. зб. наук. пр. – 2014. – Вип. 1. – С. 49–60.

11. Беловодский, В. Н. Возбуждение полигармонических колебаний в вибромашине с нелинейной упругой связью подвижных масс нового типа [Текст] / В. Н. Беловодский, С. Л. Букин // Прогрессивные технологии и

системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. ДонНТУ. – 2015. – Вып.1(51). – С. 32–41.

12. Букин, С. Л. Инновационные проекты вибрационных транспортно-технологических машин с полигармоническим режимом работы [Текст] / С. Л. Букин, В. П. Кондрахин // Инновационные перспективы Донбасса: материалы междунар. научн.-практ. конф. – Донецк, 2015. – С. 5–11.

13. Лапшин, Е. С. Пути совершенствования вибрационного разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья [Текст] / Е. С. Лапшин, А. И. Шевченко, А. В. Буров // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 3. – С. 45–51.

14. Букин, С. Л. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы [Текст]: наук.-техн. зб. / С. Л. Букин, С. Г. Маслов, А. П. Лютый, Г. Л. Резниченко // Обогащение полезных ископаемых. – 2009. – Вып. 36(77)–37(78). – С. 81–89.

15. Букин, С. Л. Сравнение результатов процесса измельчения в вибрационной мельнице с гармоническим и бигармоническим режимами работы / С. Л. Букин, П. В. Сергеев, А. С. Букина // Качество минерального сырья. – 2014. – С. 149–159.

16. Bukin, S.L. Excitation of Polyharmonic Vibrations in Single-Body Vibration Machine with Inertia Drive and Elastic Clutch [Text] / S.L. Bukin, V.P. Kondrakhin, V.N. Belovodsky, V.N. Khomenko // Journal of Mining Science. – 2014. – Volume 50, – Issue 1, – pp 101–107. doi: 10.1134/S1062739114010153.

17. Крюков Б.И. Динамика вибрационных машин резонансного типа. Киев: наук. думка, 1967. 210 с.

18. Ланець, О. С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення) [Текст]: монографія / О. С. Ланець. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. – 324 с.

19. Гурський, В. М. Забезпечення двочастотних резонансних режимів роботи вібраційного стола для ущільнення бетоносумішей [Текст] / В. М. Гурський, І. В. Кузьо, О. С. Ланець // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – Львів, 2010. – № 678. – С. 44–51.

20. Ланець О. В. Реалізація ефекту Зоммерфельда у вібраційному майданчику з інерційним приводом [Електронний ресурс] / О. В. Ланець, Я. В. Шпак, В. І. Лозинський, П. Ю. Леонович // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2013. – Вип. 47. – С. 12–28. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2013_47_4

21. Yaroshevich N.P. Dynamics of Starting of Vibrating Machines with Unbalanced Vibroexciters on Solid Body with Flat Vibrations / N.P. Yaroshevich, I.P. Zabrodets, T.S. Yaroshevich // Applied Mechanics and Materials, Vol. 849, pp. 36–45, 2016. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.849.36

22. Yongjun Hou Investigation for Synchronization of a Rotor-Pendulum System considering the Multi-DOF Vibration / Yongjun Hou, Pan Fang // Shock and Vibration, vol. 2016, Article ID 8641754, 22 pages, 2016. doi: 10.1155/2016/8641754

23. Артюнин А.И. Применение метода разделения движений для исследования динамики роторной системы с гибким ротором и маятниковым автобалансиром / А.И. Артюнин, Г.Г. Алхунсаев, К.В. Серебренников // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2005. № 9. С. 8–14.

24. Букин С. Л. Промышленные испытания многовибраторного инерционного виброгрохота сверхтонкого грохочения [Текст] / С. Л. Букин, С. Г. Маслов // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. – Вип.1(34). – С. 138–145.

25. Левченко, П. В. Экспериментальное определение зависимости эффективности классификации вертикального вибрационного грохота от комплекса доминирующих факторов [Текст] / П. В. Левченко // Науковий

вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С. 64–68.

26. Рудакова, Е.В. Преимущества использования винтового инерционного грохота [Текст] / Е. В. Рудакова // Ученые записки РГСУ. – 2011.– № 6. – С. 398–400.

27. Филимонихин, Г. Б. Дослідження процесу порушення двочастотних вібрацій кульовим автобалансиром гуркоту ГИЛ 42 [Текст] / Г. Б. Филимонихин, В. В. Яцун // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2016. - № 1/7 (79). - С. 17-23. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59881

28. Yatsun, V. Experimental research of rectilinear translational vibrations of a screen box excited by a ball balancer / V. Yatsun, G. Filimonikhin, K. Dumenko, A. Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, N 1 (87). – P. 23–29. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101798](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101798)

29. Филимонихин, Г. Б. Дослідження порушення кульовим автобалансиром двочастотних коливально-обертальних вібрацій короба гуркоту [Текст] / Г. Б. Филимонихин, В. В. Яцун, К.Н. Думенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2016. - № 3/7 (81). - С. 47-52. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72052

30. Филимонихин, Г. Б. Дослідження 3D моделюванням плоских поступальних вібрацій короба гуркоту, порушуваних кульовим автобалансиром [Текст] / Г. Б. Филимонихин, В. В. Яцун, М. В. Личук, І. І. Филимонихина // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2016. - № 6/7 (84). - С. 16-22. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85460

31. Filimonikhin G., Yatsun V. (2017). Conditions of replacing a single-frequency vibro-exciter with a dual-frequency. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1(157), p.61-68.

32. Yatsun, V. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive

auto-balancer / Volodymyr Yatsun, Gennadiy Filimonikhin, Kostyantyn Dumenko, Andrey Nevdakha // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - Vol. 5, N 1 (89). - P. 19-25. doi : 10.15587/1729-4061.2017.111216

33. Filimonikhin G.B. Stability of Steady-State Motion of an Isolated System Consisting of a Rotating Body and Two Pendulums / G.B. Filimonikhin, I.I. Filimonikhina, V.V. Pirogov // International Applied Mechanics, July 2014, Volume 50, Issue 4, pp 459-469. doi: 10.1007/s10778-014-0651-9

34. Blekhman, I. I. Synchronization in Science and Technology / I. I. Blekhman. - New York: ASME Press, NY, USA, – 1988. - 255 p.

35. Яблонский, А. А. Курс теорії коливань: учеб, посібник [Текст] / А. А. Яблонский, С. С. Норејко. - М.: Вища школа, 1966. - 255 с.

36. Халафян, А. А. STATISTICA 6. Статистичний аналіз даних. 3-е изд. Підручник [Текст] / А. А. Халафян. - М.: ТОВ « Біном-Пресс», 2007. - 512 с.

37. Федоренко И. Я. Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины / И. Я. Федоренко, А. А. Гнездилов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3 (137). – С. 179-183.

38. Ланець О. С. Обґрунтування конструкції та моделювання роботи резонансного двомасового вібростолу з інерційним приводом [Електронний ресурс] / О. С. Ланець, В. М. Гурський, О. В. Ланець, Я. В. Шпак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2014. – № 788. – С. 28–36. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2014_788_7

39. Макаренко, О. Ю. Асимптотическая устойчивость колебаний двухмассного резонансного грохота [Текст] / О. Ю. Макаренко // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77. – №3. – С. 398–409.

40. Antipov V.I., Palashova I.V. Dynamics of a two-mass parametrically

excited vibration machine / V.I. Antipov, I.V. Palashova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2010. – Т. 39. – № 3. – С. 238–243. doi: 10.3103/S1052618810030052

41. Zhao, J. "Influencing Factors of Anti-Resonant Inertial Resonant Machine Vibration Isolation System," / J. Zhao, L. Liu, M. Song and X. Zhang // 2015 3rd International Conference on Computer and Computing Science (COMCOMS), Hanoi, – 2015, – P. 61–64. doi: 10.1109/COMCOMS.2015.22

42. Xiaohao, L. Dynamic performance analysis of nonlinear anti-resonance vibrating machine with the fluctuation of material mass / Li Xiaohao, Shen Tao // Journal of Vibroengineering, – Vol. 18, – Issue 2, – 2016, – P. 978–988.

43. Gursky, V., Kuzio, I., Korendiy, V. Optimal synthesis and implementation of resonant vibratory systems. Universal Journal of Mechanical Engineering, 2018. Vol. 6, Issue 2, P. 38–46. doi: <https://dx.doi.org/10.13189/ujme.2018.060202>

44. Gursky, V.M., Kuzio, I.V., Lanets, O.S., Kisała, P., Tolegenova, A., Syzdykpayeva, A. Implementation of dual-frequency resonant vibratory machines with pulsed electromagnetic drive [Implementacja systemów rezonansowych o dwóch częstotliwościach z wieloma częstotliwościami drgań własnych], Przegląd Elektrotechniczny, 2019. Vol. 95, Issue 4, P. 41–46. doi: <https://dx.doi.org/10.15199/48.2019.04.08>

45. Ланець О. С., Гурський В. М., Ланець О. В., Шпак Я. В. Обґрунтування конструкції та моделювання роботи резонансного двомасового вібростолу з інерційним приводом. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2014. № 788. С. 28–36. <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/24646/1/6-28-36.pdf>

46. Makarenkov O. Yu. The asymptotic stability of the oscillations of a two-mass resonance sifter. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2013.

Vol. 77, Issue 3, P. 287-295. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2013.09.004>

47. Ярошевич Н. П., Силивонюк А. В. О некоторых особенностях динамики разбега вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибробудниками. Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту, 2013. № 4, С. 70–75. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_4_14

48. Artyunin, A.I., Barsukov, S.V., Sumenkov, O.Y. Peculiarities of Motion of Pendulum on Mechanical System Engine Rotating Shaft. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020. P. 649-657. doi: https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_70

До розділу 4

1. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Search for the dualfrequency motion modes of a dualmass vibratory machine with a vibration exciter in the form of passive autobalancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, N 7 (91). P. 47–54. doi: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121737>

2. Filimonikhin G., Yatsun V., Filimonikhina I. Investigation of oscillations of platform on isotropic supports excited by a pendulum. E3S Web Conf. 168. 2020. Article N 00025, 11 p. doi: <https://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016800025>

3. Zhao, C., He, B., Liu, J., Han, Y., & Wen, B. Design method of dynamic parameters of a self-synchronization vibrating system with dual mass. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. 2018. Vol. 232, Issue 1. P. 3–20. doi: <https://doi.org/10.1177/1464419316689643>

4. Shokhin, A.E., Panovko, G.Ya., Salamandra, K.B. On the choice of dynamic regimes for two-mass vibrating machine Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. P. 185-190. <https://www.jvejournals.com/article/17720>

5. Yaroshevich N., Puts V., Yaroshevich T., Herasymchuk O. Slow

oscillations in systems with inertial vibration exciters. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2020. Vol. 32. P. 20–25. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21509>

6. Ланець О., Шпак Я., Лозинський І., Леонович П. Реалізація ефекту Зомерфельда у вібраційному майданчику з інерційним приводом. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2013. Вип. 47. С. 12–28. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2013_47_4

До розділу 5

1. Yatsun V., Filimonikhin G., Haleeva A., Krivoblotsky L., Machok Y., Mezitis M., Podoprygora N., Sadovyi M., Strautmanis G. Searching for the two-frequency motion modes of a three-mass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 4, N 7 (106). P. 103–111. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209269>

2. Yatsun V., Filimonikhin G., Pirogov V., Amosov V., Luzan P. Research of antiresonance threemass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive Autobalancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 5, N 7 (107). P. 89–97. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213724>

3. Ярошевич Н.П., Силивонюк А. В. О некоторых особенностях динамики разбега вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями. *Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту*, 2013. № 4, С. 70–75. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_4_14

4. Korendiy V., Zakharov V. Substantiation of parameters and analysis of operational characteristics of oscillating systems of vibratory finishing machines. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. — Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2017. Vol. 3. N 2. P. 67–78. <https://doi.org/10.23939/ujmems2017.02.067>

5. Kuzio I., Zakharov V., Korendiy V. Substantiation of inertial, stiffness and excitation parameters of vibratory lapping machine with linear oscillations of laps. UJMEMS, 2018. Vol. 4, N 2. P. 26–39. <https://doi.org/10.23939/ujmems2018.02.026>

6. Gursky V., Lanets O. Modernization of high-frequency vibratory table with an electromagnetic drive: theoretical principle and modeling. Mathematical Models in Engineering, Vol. 1, Issue 2, 2015, p. 34–42. <https://www.jvejournals.com/article/16483>

7. Korendiy V. M., Kachur O. Yu., Novitskyi Yu. Ya., Mazuryk V. A., Sereda V. A. Substantiation of parameters and modelling the operation of three-mass vibratory conveyer with directed oscillations of the working element. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. Том 53. С. 84–100. <https://doi.org/10.23939/istcipa2019.53.084>

8. Solona O., Kupchuk I. Dynamic synchronization of vibration exciters of the three-mass vibration mill (Dynamiczna synchronizacja trzyosiowego młyna z czterema wibratorami). PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY | Rocznik 2020 – zeszyt 3. nr katalogowy: 125253. <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.35>

9. Neyman L. A., Neyman V. Y. Dynamic model of a vibratory electromechanical system with spring linkage, 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, 2016. P. 23–27, doi: <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884234>

10. Goncharov V., Filimonikhin G., Nevdakha A., Pirogov V. An increase of the balancing capacity of ball or roller-type auto-balancers with reduction of time of achieving auto-balancing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. Vol. 1, N 7 (85). P. 15–24. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92834>