

УДК 622.74: 621.928.23

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.233-242>

Г. Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, В. В. Пирогов, доц., канд. фіз.-матем. наук,
А. І. Гречка, доц., канд. техн. наук, Д. Г. Герасимович

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: filimonikhink@ukr.net

Збудники двочастотних коливань у яких тіла кочення розганяються силами опору коченню

Запропоновані збудники двочастотних коливань, що працюють на ефекті Зомерфельда, у яких тіла кочення у вигляді куль чи роликів розганяються силами опору коченню. Віброзбудники складаються з корпусу, у якому є кільцева порожнина з біговою доріжкою і отвір для насадження на вал, дебалансної маси, встановленої на корпусі, тіл кочення, встановлених усередині кільцевої порожнини з можливістю кочення по біговій доріжці. Корпус віброзбудника насаджується на вал електродвигуна. Електродвигун з віброзбудником встановлюється на пружно-в'язко закріплену платформу, вібрації якої збуджуються. Запропоновані пристрої працюють як два незалежних інерційних віброзбудника, один з яких є резонансним. Більш швидкі зарезонансні коливання збуджує дебалансна маса на корпусі віброзбудника, яка обертається синхронно з валом електродвигуна. Маса є невеликою, що забезпечує розгін валу до заданої кутової швидкості обертання. Більш повільні, але інтенсивні навколорезонансні коливання збуджують тіла кочення, які застрягають на частоті, дещо меншу за резонансну через ефект Зомерфельда. Через розгін тіл кочення силами опору коченню виникають стабільні навколорезонансні вібрації, що не залежать від швидкості обертання корпусу віброзбудника. Збільшення сил опору коченню наближає частоту застрягання тіл кочення до резонансної. Швидкі вібрації залежать від швидкості обертання корпусу і тому ними можна керувати зміною за допомогою частотного перетворювача швидкості обертання корпусу віброзбудника. Запропоновані технічні рішення по збільшенню сил опору коченню. Запропонована практична методика визначення коефіцієнту опору коченню, яка реалізується в умовах, максимально наближених до умов експлуатації віброзбудника. Це забезпечує належну точність визначення коефіцієнту. Сама установка має просту конструкцію, а проведення на ній випробовувань не трудомістко. Запропоновані пристрої застосовні для використання у вібраційних машинах широкого призначення – грохотах, вібростях, вібростолах, вібробарабанах тощо, що можуть бути як одномасовими, так і балатомасовими.

вібраційна машина, резонанс, технологічний процес, грохот, вібростит, опір коченню, інерційний віброзбудник, кочення без ковзання

Постановка проблеми. Серед вібромашин типу грохотів, вібростит, сепараторів, вібростолів, вібробарабанів (віброфінішерів) тощо перспективними є машини із полічастотними віброзбудниками [1–3]. В них при коливаннях віброплатформи (барабану, сита, решета тощо) з меншою частотою відбувається основна робота з класифікації, просіювання, шліфування тощо. Коливання з більшою частотою підвищують продуктивність роботи вібромашини за рахунок самоочищення сита чи решета, зміни фізико-механічних властивостей сировини, що обробляється тощо.

Серед вібромашин різного призначення перспективними є резонансні [4–6]. У них віброзбудники меншої маси збуджують коливання з більшою амплітудою, що підвищує продуктивність, енергоефективність і надійність роботи вібромашини.

Найбільш перспективними вібромашинами є резонансні полічастотні. Вони суміщають у собі переваги цих двох типів вібромашин [7–9].

Розробка віброзбудників, які дозволяють збуджувати як полічастотні, так і резонансні вібрації, та відповідних вібромашин є актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш простий відомий спосіб збудження резонансних коливань заснований на ефекті Зомерфельда [10,11]. Так, при обертанні дебалансного маятника двигуном недостатньої потужності маятник не може розігнатися і застрягає на навколорезонансній частоті коливань віброплатформи. Цим збуджуються інтенсивні навколорезонансні вібрації, але перевантажується двигун. Для подолання перевантаження пропонувалося розганяти маятник не безпосередньо, а через повітря [12,13], гідродинамічну муфту [14]. Всі варіанти дозволяють створювати керовані резонансні віброзбудники, бо зі збільшенням швидкості обертання приводного валу збільшується сила, що розганяє маятник чим коливання віброплатформи наближаються до резонансних. Але такі віброзбудники і відповідні вібромашини резонансні одночастотні.

В [15] запропоновано використовувати пасивні автобалансири – кульові, роликові і маятникові у якості збудників двочастотних вібрацій.

Двочастотний віброзбудник складається з корпусу, дебалансу, встановленого на корпусі, вантажів, встановлених усередині кільцевої порожнини корпусу. Вантажі можуть бути кулями, роликами або маятниками. Корпус віброзбудника насаджується на вал електродвигуна. Електродвигун з віброзбудником встановлюється на пружно-в'язко встановлену платформу, вібрації якої збуджуються.

Пристрій працює таким чином. Під час пуску валу вантажі зібрані разом. При розгоні валу вантажі також зібрані разом, захоплюються в рух і починають розганятися, але відстають від валу. Коли вал розганяється до робочої зарезонансної швидкості обертання ω вантажі через ефект Зомерфельда не можуть наздогнати вал і застрягають на навколорезонансній частоті Ω , дещо меншій за резонансну. Цим вантажі створюють інтенсивні повільні навколорезонансні вібрації з навколорезонансною частотою коливань платформи Ω . Дебаланс на корпусі віброзбудника також створює вібрації, але швидкі з частотою обертання валу ω . Вантажі автоматично підлаштовуються під резонансну частоту коливань платформи. Причому ця частота може змінюватися залежно від того, як завантажена платформа. Двочастотний віброзбудник можна встановлювати на платформи з різною кінематикою руху в одномасових і багатомасових вібромашинах.

Таким чином, пристрій працює як два інерційні віброзбудники, один з яких – резонансний.

Динаміка запропонованих віброзбудників і одно- та багатомасових вібромашин з цими віброзбудниками досліджена в роботі [9].

Відомі технічні рішення [16], у яких порожнина у корпусі віброзбудника заповнена повністю чи частково мастилом. У такому пристрої кулі чи ролики розганяються силами в'язкого опору Ньютона, які створює мастило усередині корпусу [9]. При цьому, чим швидше обертається корпус, тим більша сила розганяє кулі чи ролики, тим ближче частота застрягання тіл кочення до резонансної частоти вібромашини. Тому, зміною робочої частоти обертання валу (через частотний перетворювач) можна змінювати інтенсивність повільних, навколорезонансних вібрацій. Але при цьому змінюються і швидкі вібрації.

В [9] побудована загальна теорія таких віброзбудників у випадку, коли вантажі розганяються силами в'язкого опору, утвореними мастилом. Такі віброзбудники дозволяють створювати універсальні вібромашини широкого призначення. Наприклад, один вібростол можна використовувати як для ущільнення будівельних сумішей (малоінтенсивні вібрації), так і для сепарації, класифікації, просіювання (інтенсивні вібрації із створенням киплячого шару).

Але одночасна зміна повільних і швидких вібрацій при зміні швидкості обертання корпусу обмежує використання вібромашини на великих частотах обертання вала, наприклад, в вібростолах при ущільненні будівельних сумішей.

Відомий збудник двочастотних вібрацій, який відрізняється тим, що з метою забезпечення розгону вантажів під час пуску вібромашини в порожнину віброзбудника заливається мастило так, щоб нижні вантажі були повністю занурені у мастило при нерухомому корпусі, а на доріжці виконано паз, у який уходить мастило на робочих швидкостях обертання валу [18].

Перевага – мастило після розгону корпусу віброзбудника уходить у паз і не створює в'язких сил опору, що намагаються розігнати вантажі. Вантажі розганяються силами опору коченню, а останні не залежать від швидкості кочення вантажів по біговій доріжці. Через це у розглянутих пристроїв повільні навколорезонансні коливання стають стабільними [18]. Вони на великих швидкостях обертання корпусу майже не залежать від швидкості обертання корпусу. Це дозволяє створювати вібромашини з незалежною змінною частотою швидких вібрацій.

Недоліками пристроїв є поганий розгін куль (роликів), збудження кулями (роликами) недостатньо інтенсивних повільних навколорезонансних вібрацій. Недоліки викликані тим, що кулі (ролики) розганяються невеликими силами опору коченню. Ці сили виникають при коченні куль (роликів) по біговій доріжці, коли корпус вже розігнався, а кулі (ролики) від нього відстають. Невелика розгінна сила не може достатньо наблизити частоту застрягання куль (роликів) до резонансної частоти вібромашини. Тому повільні навколорезонансні вібрації, які збуджують кулі (ролики), віддалені від резонансу і недостатньо інтенсивні.

Для розгону куль і роликів можна використовувати збільшені сили опору коченню. Це дозволить створювати віброзбудники, які при швидкому обертанні вала будуть збуджувати інтенсивні навколорезонансні вібрації, які не залежать від швидкості обертання вала. Тоді, зміною частоти обертання вала можна буде змінювати швидкі вібрації платформи не змінюючи навколорезонансну складову коливань.

Отже, теорія двочастотних інерційних віброзбудників, що працюють на ефекті Зомерфельда і у яких тіла кочення розганяються силами опору коченню має істотну неповноту [9]. Так, немає методики визначення розганяючих сил, частоти застрягання тіл кочення, немає технічних рішень по збільшенню сил опору коченню.

В роботах [19-21] запропоновані аналітичні залежності для визначення коефіцієнта опору кочення при коченні кулі і циліндра по різних поверхнях, проаналізовані фактори, що впливають на величину сил опору кочення. Огляд, проведений в [19] показує, що сили опору кочення залежать від багатьох факторів, таких як форми тіл кочення і бігової доріжки, шорсткостей поверхонь, твердості матеріалів, наявності змащення, сил тиску між тілами тощо. Але одержані аналітичні формули мають чисто теоретичне значення і незастосовні на практиці, бо містять коефіцієнти, що визначаються тільки експериментально. Тому на практиці сили опору кочення визначаються експериментальними методами в умовах, наближених до експлуатаційних.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування конструкції віброзбудника двочастотних коливань, який працює на ефекті Зомерфельда і у якому тіла кочення розганяються силами опору коченню.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1) запропонувати технічні рішення по збільшенню сил опору коченню в кульових і роликових збудниках двочастотних вібрацій, що працюють на ефекті Зомерфельда;

2) розробити методику визначення розгінних сил, утворених силами опору коченню.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо технічні рішення по збільшенню сил опору коченню в кульових і роликівих збудниках двочастотних вібрацій, що працюють на ефекті Зомерфельда

Запропоновані тіла кочення з підвищеним коефіцієнтом опору коченню (рис. 1).

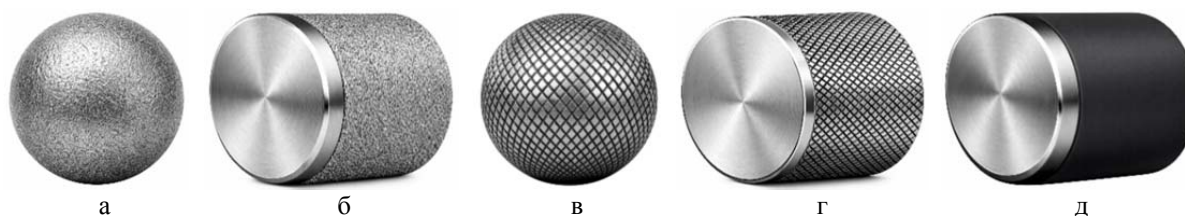


Рисунок 1 – Тіла кочення з підвищеним коефіцієнтом опору коченню:

а – шорстка куля; б - шорсткий ролик; в – рифлена куля; в - рифлений ролик;

г – ролик у гільзі з в'язко-пружного матеріалу

Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 представлені ескізи нових віброзбудників з запропонованими тілами кочення.

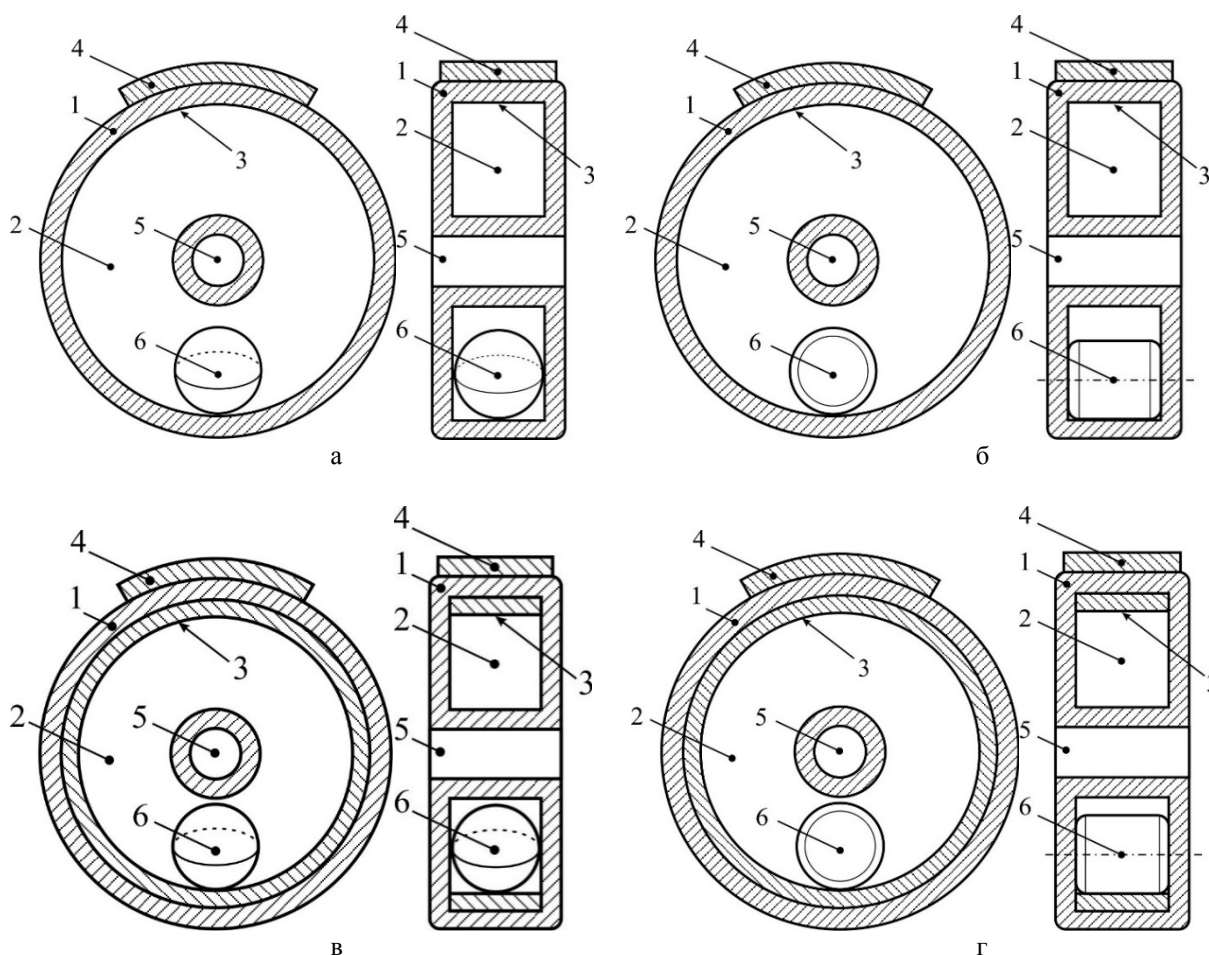


Рисунок 2. – Варіанти двочастотних віброзбудників:

а – кульового; б – роликівого;

в – кульового з окремою доріжкою; г – роликівого з окремою доріжкою

Джерело: розроблено авторами

Вібробудники мають корпус 1, який має кільцеву порожнину 2 з біговою доріжкою 3, дебалансну масу 4, отвір для насадження на вал 5, тіло кочення 6, установлене у порожнині з можливістю кочення по біговій доріжці. Бігова доріжка може бути частиною корпусу (рис. 2, а, б), або бути виконана окремо у вигляді вкладки з більш м'якого матеріалу (рис. 2, в, г).

На рис. 2.3 зображено збудник двочастотних вібрацій 1 насаджений на вал 7 двигуна 8. Двигун встановлений опорами 9 на платформу 10. Платформу підтримують пружно-в'язкі опори 11, а напрямні 12 дозволяють платформі коливатися поступально вертикально.

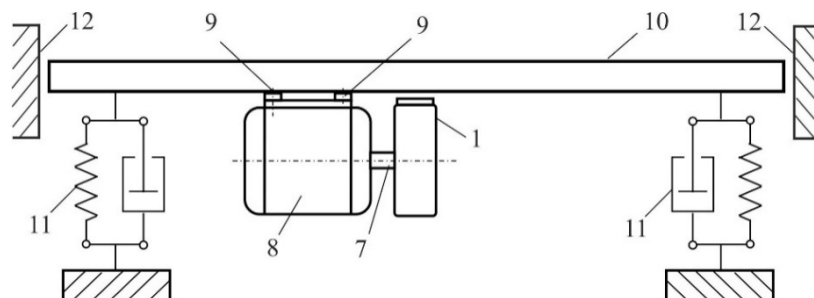


Рисунок 3 – Одномасова вібромашина з прямолінійним поступальним рухом платформи
Джерело: розроблено авторами

Збудник двочастотних вібрацій може встановлюватися і на багатомасові вібромашини з різною кінематикою руху платформ. Незалежно від завантаження вібромашини тіло кочення буде автоматично підстроюватися під поточну резонансну частоту вібромашини.

Розглянемо особливості роботи нових пристроїв. Розгін тіла кочення у вібробуднику силами сили опору коченню принципово змінює роботу вібробудника. При обертанні корпусу з дорезонансними швидкостями тіло кочення обертається з корпусом (після розгону) синхронно. Це дозволяє керувати повільними дорезонансними вібраціями шляхом зміни швидкості обертання корпусу.

При перевищенні швидкості обертання корпусу швидкості застрягання тіла кочення, тіло кочення починає котитися по доріжці і при цьому застряє на сталій навколорезонансній швидкості. Цим збуджуються стабільні навколорезонансні вібрації, які не залежать від швидкості обертання корпусу.

На рис. 4 представлена амплітудно-частотна характеристика повільних коливань платформи.

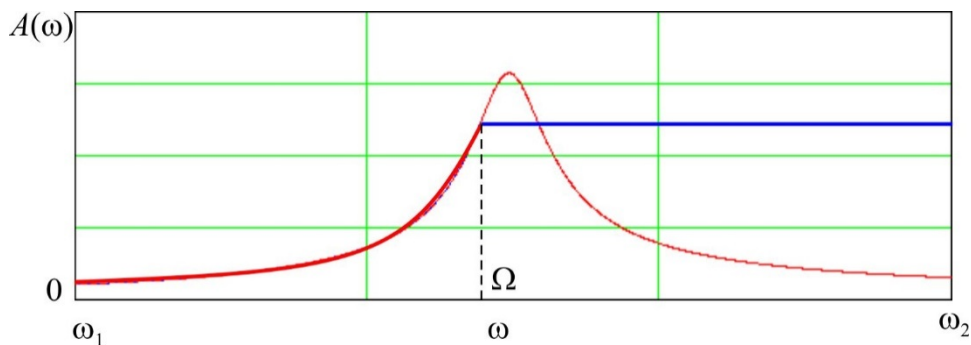


Рисунок 4 – Амплітуда частотна характеристика повільних коливань платформи
Джерело: розроблено авторами

Використання у якості розганяючих сил – сил опору коченню дозволяє обмежувати потужність повільних навколорезонансних вібрацій при підході до резонансу (рис. 4). А саме, кулі перестають розганятися синхронно з корпусом і застрягають на сталій дорезонансній кутовій швидкості. Це розвантажує двигун і дозволяє йому розігнатися до заданої швидкості обертання.

Слід відзначити, що розглянуті способи збільшення моменту опору кочення застосовні на практиці і дозволяють збільшувати цей момент у широких межах. Але чисто теоретично розраховувати момент опору коченню з належною точністю неможливо [19-21]. Тому розглянемо експериментальну методику визначення зазначеного моменту.

Будемо визначати коефіцієнт моменту опору коченню експериментальними методами в умовах, наближених до експлуатаційних. На рис. 5 показана схема для визначення статичного і динамічного коефіцієнтів опору коченню експериментальним методом.

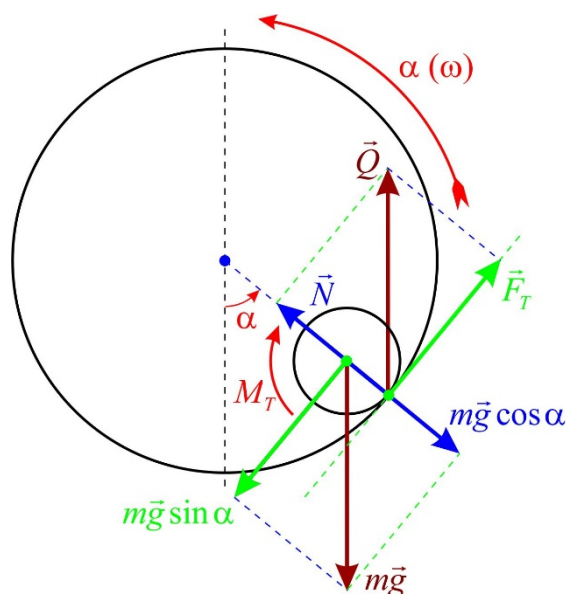


Рисунок 5 – Схема для визначення статичного і динамічного моменту опору коченню
Джерело: розроблено авторами

Використовується корпус вібробудника і куля чи ролик. Корпус розташовується вертикально, усередину вставляється куля.

Для визначення статичного коефіцієнту опору коченню корпус повільно повертається на граничний кут α_{cm} , при якому куля перестане рухатися з корпусом як одне ціле і не почне котитися.

З рис. 4 знаходимо

$$M_T = F_T r = mgr \sin \alpha_{cm}. \quad (1)$$

З іншого боку

$$M_T = \delta_{cm} N = \delta_{cm} mg \cos \alpha_{cm}. \quad (2)$$

Тоді

$$\delta_{cm} mg \cos \alpha_{cm} = mgr \sin \alpha_{cm}.$$

Звідки знаходимо

$$\delta_{cm} = r \tan \alpha_{cm} \approx r \alpha_{cm}. \quad (3)$$

Для визначення динамічного коефіцієнту опору коченню корпус обертається зі сталою кутовою швидкістю ω . Замірюється кут α , на який відхилиться кулька від вертикалі під час кочення по доріжці. Коефіцієнт опору коченню дорівнюватиме

$$\delta = r \tan \alpha \approx r\alpha. \quad (4)$$

Для більш точного визначення кутів α_{cm} , α можна використовувати цифрові фотографії. Кути визначаються шляхом графічної обробки фотографій.

Слід відзначити, що розглянуті методики майже не застосовні у випадку кочення кулі чи ролика у підшипнику. Через малі моменти опору коченню кути відхилень α_{cm} , α будуть майже непомітні. У нових віброзбудниках моменти опору коченню спеціально значно підвищуються – у десятки, навіть сотні разів. Це зробить кути відхилень α_{cm} , α значними і помітними.

В подальшому планується провести дослідження з визначення частоти застрягання тіл кочення при відомих силах опору коченню. Це дозволить підбирати сили опору коченню так, щоб тіла кочення гарантовано розганялися, застрягали достатньо близько до резонансної частоти для збудження інтенсивних навіколорезонансних вібрацій, не мали змоги розігнатися до швидкості обертання корпусу.

Висновки.

1. Розгін тіла кочення у віброзбуднику силами сили опору коченню принципово змінює роботу віброзбудника. При обертанні корпусу з дорезонансними швидкостями тіло кочення обертається з корпусом (після розгону) синхронно. Це дозволяє керувати повільними дорезонансними вібраціями шляхом зміни швидкості обертання корпусу.

При перевищенні швидкості обертання корпусу швидкості застрягання тіла кочення, тіло кочення починає котитися по доріжці і при цьому застряє на сталій навіколорезонансній швидкості. Цим збуджуються стабільні навіколорезонансні вібрації, які не залежать від швидкості обертання корпусу.

Використання у якості розганяючих сил – сил опору коченню дозволяє обмежувати потужність повільних навіколорезонансних вібрацій при підході до резонансу. А саме, кулі перестають розганятися синхронно з корпусом і застрягають на сталій дорезонансній кутовій швидкості. Це розвантажує двигун і дозволяє йому розігнатися до заданої швидкості обертання.

2. Запропонована практична методика визначення коефіцієнту опору коченню реалізується в умовах, максимально наближених до умов експлуатації віброзбудника. Це забезпечує належну точність визначення коефіцієнту. Сама установка має просту конструкцію, а проведення на ній випробовувань не трудомістко.

Список літератури

1. Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Аналіз стану розвитку вібраційного грохочення при зневодненні мінеральної сировини. *Геотехнічна механіка: міжвід. сб. наук. праць*. 2012. Вип. 101. С. 84–104.
2. Застосування вібраційної техніки з бігармонійним режимом коливальних при збагаченні вугілля / Е. Е. Гарковенко, Е. И. Назимко, С. Л. Букин та ін. *Вугілля України*. 2011. С. 41–44.
3. Булат, А.Ф., Шевченко, Г.А.: Вплив полічастотних коливальних просіваючих поверхонь вібраційних грохотів на розділення сипких матеріалів. *Науковий вісник НГУ*. 2010. № 4. С. 92–97.
4. Крюков, Б.І.: Динаміка вібраційних машин резонансного типу. К.: Наукова думка, 1967.
5. 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. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2014_788_7

6. Comparative analysis of energy efficiency in the use of vibration-type process machines in resonant and superresonant operating modes / I.P. Lyan, G.Y. Panovko, A.E. Shokhin. *Obogashcheine Rud.* 2019. № 6. P. 42-49.
7. Забезпечення двочастотних резонансних режимів роботи вібраційного стола для ущільнення бетоносумішей / 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.
8. Кузьо І.В., Ланець О.С., Гурський В.М. Обґрунтування технологічної ефективності двочастотних резонансних вібраційних машин з імпульсним електромагнітним збуренням. *Науковий вісник НГУ*. 2013. № 3. С. 71–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_3_23
9. Яцун В. В. Динаміка двочастотних резонансних вібромашин, що працюють на ефекті Зоммерфельда: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.09 – динаміка та міцність машин / МОН України, Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2024. 407 с. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/e49c1f95-5d4b-4651-97ad-def20fe2de57>
10. Sommerfeld A. Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre. *Phys. Z.* 1902. Band 3. S. 266–271.
11. Краснопольська Т.С. Ефект Зоммерфельда – Кононенко та його дослідження. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2018. Вип. 28. С. 89–109. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom_2018_28_10
12. Кузьо І. В., Ланець О. В., Гурський В. М. Синтез низькочастотних резонансних вібраційних машин з аероінерційним збуренням. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. № 2. С. 60–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11
13. Ланець О. В. Створення резонансних вібраційних машин з аероінерційним збуренням : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 – машинознавство Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2013. 20 с.
14. Kapalo, O. Lanets, O. Vambol, and I. Derevenko. Parameter development and analysis of the oscillatory system of a two-mass resonant vibrating table with an inertial drive” *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2025. Vol. 11. No. 4. Pp. 36–49. doi: <https://doi.org/10.23939/ujmems2025.04.036>
15. Застосування пасивного автобалансира як збудника кругових двочастотних вібрацій: пат. 92337 Україна: МПК F04D 29/66 (2006.01) / Філімоніхін Г.Б., Яцун В.В.; заявник та патентовласник Кіровоградський нац. техн. університет. № u201402718; заявл. 18.03.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. №15.
16. Збудник двочастотних вібрацій: пат. 140805 Україна: МПК B07B 1/40, B06B 1/10, G01M 1/32 (2006.01) / Філімоніхін Г.Б., Яцун В.В., Носик В.М.; № u201908913; заявл. 23.07.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. №5/2020.
17. Yatsun, V. Experimental study of resonance vibrations of the vibratory machine excited by a ball auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, N 1 (104). P. 32–40. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201105>
18. Збудник двочастотних вібрацій: пат. 140801 Україна: МПК B07B 1/40, B06B 1/16, G01M 1/32 (2006.01), / Філімоніхін Г.Б., Яцун В.В., Давидов В.С.; заявка № u201908899; заявл. 23.07.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. №5/2020.
19. Опір коченню в механізмах з точковими та лінійними схемами дотику. / Бондаренко Л. М., Дьомін Г. К., Буратинський А. П., Дорофєєва В. С. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. No.5 С.257–258. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.221019.19.517>
20. Бешун О. А., Меланченко Я. В. Аналіз факторів, які впливають на силу і коефіцієнт опору коченню колеса. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Київ: НУБіП України, 2018. Т. 9, № 4. С. 123–131. ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online). URL: <https://doi.org/10.31548/me2018.04.123>
21. Кроль Р.М., Бондаренко Л.М. Порівняння опору коченню кульки і циліндра при різних схемах контакту. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 10. С. 31-36. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11550>

References

1. Lapshin, E. S., & Shevchenko, A. I. (2012). Analiz stanu rozvytku vibratsiinoho hrokhochennia pry znevodnenni mineralnoi syrovyny. Heotekhnichna mekhanika: Mizhviddilovy zbirnyk naukovykh prats, (101), 84–104. [in Ukrainian].
2. Harkavenko, E. E., Nazymko, E. I., Bukin, S. L., et al. (2011). Zastosuvannia vibratsiinoi tekhniky z biharmoniynym rezhymom kolyvan pry zbahachenni vuhillia. Vuhillia Ukrainy, 41–44. [in Ukrainian].
3. Bulat, A. F., & Shevchenko, H. A. (2010). Vplyv polichastotnykh kolyvan prosiuiuchykh poverkhon vibratsiinykh hrokhativ na rozdilennia sypkykh materialiv. Naukovyi visnyk NHU, (4), 92–97. [in Ukrainian].
4. Kriukov, B. I. (1967). Dynamika vibratsiinykh mashyn rezonansnogo typu. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian].
5. Lanets, O. S., Hurskyi, V. M., Lanets, O. V., & Shpak, Ya. V. (2014). Obgruntuvannia konstruktsii ta modeliuvannia roboty rezonansnogo dvomasovoho vibrostola z inertsynym pryvodom [Elektronnyi resurs]. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i pryladiv, (788), 28–36. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2014_788_7 [in Ukrainian].
6. Lyan, I. P., Panovko, G. Y., & Shokhin, A. E. (2019). Comparative analysis of energy efficiency in the use of vibration-type process machines in resonant and superresonant operating modes. Obogashchenie Rud, (6), 42–49.
7. Hurskyi, V. M., Kuzyo, I. V., & Lanets, O. S. (2010). Zabezpechennia dvochastotnykh rezonansnykh rezhymiv roboty vibratsiinoho stola dlia ushchilnennia betonosumishei. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i pryladiv, (678), 44–51. [in Ukrainian].
8. Kuzyo, I. V., Lanets, O. S., & Hurskyi, V. M. (2013). Obgruntuvannia tekhnolohichnoi efektyvnosti dvochastotnykh rezonansnykh vibratsiinykh mashyn z impulsnym elektromahnitnym zburenniam. Naukovyi visnyk NHU, (3), 71–77. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_3_23 [in Ukrainian].
9. Yatsun, V. V. (2024). Dynamika dvochastotnykh rezonansnykh vibromashyn, shcho pratsuiut na efekti Zommerfelda (Doctoral dissertation). Centralnoukrainskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet, Kropyvnytskyi. Retrieved from <https://ena.lpnu.ua/items/e49c1f95-5d4b-4651-97ad-def20fe2de57> [in Ukrainian].
10. Sommerfeld, A. (1902). Beitrage zum dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre. Physikalische Zeitschrift, 3, 266–271. [in German].
11. Krasnopol'ska, T. S. (2018). Efekt Zommerfelda–Kononenka ta yoho doslidzhennia. Problemy obchysliuvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruktzii, (28), 89–109. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom_2018_28_10 [in Ukrainian].
12. Kuzyo, I. V., Lanets, O. V., & Hurskyi, V. M. (2013). Syntez nyzkhochastotnykh rezonansnykh vibratsiinykh mashyn z aeroinertsijnym zburenniam. Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu, (2), 60–67. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11 [in Ukrainian].
13. Lanets, O. V. (2013). Stvorennia rezonansnykh vibratsiinykh mashyn z aeroinertsijnym zburenniam (Abstract of candidate dissertation). Lvivska politekhnika, Lviv. [in Ukrainian].
14. Kapalo, O., Lanets, O., Vambol, I., & Derevenko, I. (2025). Parameter development and analysis of the oscillatory system of a two-mass resonant vibrating table with an inertial drive. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 11(4), 36–49. <https://doi.org/10.23939/ujmems2025.04.036>
15. Filimonikhin, H. B., & Yatsun, V. V. (2014). Patent UA 92337. Zastosuvannia pasyvnoho avtobalansyrya yak zbudnyka kruhovykh dvochastotnykh vibratsii. Kirovohradskyi NTU. [in Ukrainian].
16. Filimonikhin, H. B., Yatsun, V. V., & Nosyk, V. M. (2020). Patent UA 140805. Zbudnyk dvochastotnykh vibratsii. [in Ukrainian].
17. Yatsun, V. (2020). Experimental study of resonance vibrations of the vibratory machine excited by a ball auto-balancer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(1), 32–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201105>
18. Filimonikhin, H. B., Yatsun, V. V., & Davydov, V. S. (2020). Patent UA 140801. Zbudnyk dvochastotnykh vibratsii. [in Ukrainian].
19. Bondarenko, L. M., D'omin, H. K., Buratynskyi, A. P., & Dorofieieva, V. S. (2019). Opir kochennia v mekhanizmach z tochkovymy ta liniinymy skhemamy dotyku. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi

- akademii budivnytstva ta arkhitektury, (5), 257–258.
<https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.221019.19.517> [in Ukrainian].
20. Beshun, O. A., & Melanchenko, Ya. V. (2018). Analiz faktoriv, yaki vplyvaiut na sylu i koefitsient oporu kochennia koleasa. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research, 9(4), 123–131. <https://doi.org/10.31548/me2018.04.123> [in Ukrainian].
21. Krol, R. M., & Bondarenko, L. M. (2014). Porivniannia oporu kochennia kulky i tsylindra pry riznykh skhemakh kontaktu. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, (10), 31–36. Retrieved from <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/11550> [in Ukrainian].

Gennadiy Filimonikhin, Prof., DSc, **Volodymyr Pirogov**, Assoc. Prof., PhD Physical and Mathematical sci, **Andrii Hrechka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Denys Gerasymovych**, student.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Exciters of Two Frequency Oscillations in Which the Rolling Elements are Accelerated by Rolling Resistance Forces

Dual-frequency vibration exciters operating on the Sommerfeld effect are proposed, in which rolling bodies in the form of balls or rollers are accelerated by rolling resistance forces. The vibration exciters consist of a housing with an annular cavity with a raceway and a hole for mounting on the shaft, an unbalanced mass mounted on the housing, and rolling bodies mounted inside the annular cavity with the ability to roll on the raceway. The vibration exciter housing is mounted on the shaft of an electric motor. The electric motor with the vibration exciter is mounted on an elastically-viscous fixed platform, the vibrations of which are excited. The proposed devices operate as two independent inertial vibration exciters, one of which is resonant. Faster super-resonant vibrations are excited by the unbalanced mass on the vibration exciter housing, which rotates synchronously with the electric motor shaft. The mass is small, which ensures acceleration of the shaft to a given angular speed of rotation. Slower but intense near-resonant vibrations excite the rolling elements, which get stuck at a frequency slightly lower than the resonant frequency due to the Sommerfeld effect. Due to the acceleration of the rolling elements by the rolling resistance forces, stable near-resonant vibrations arise that do not depend on the speed of rotation of the vibration exciter housing. An increase in the rolling resistance forces brings the rolling element jamming frequency closer to the resonant frequency. Fast vibrations depend on the speed of rotation of the housing and therefore can be controlled by changing the speed of rotation of the vibration exciter housing using a frequency converter. Technical solutions are proposed to increase the rolling resistance forces. A practical method for determining the rolling resistance coefficient is proposed, which is implemented in conditions that are as close as possible to the operating conditions of the vibration exciter. This ensures the proper accuracy of determining the coefficient. The installation itself has a simple design, and conducting tests on it is not laborious. The proposed devices are applicable for use in vibrating machines of wide purpose - screens, vibrating screens, vibrating tables, vibrating drums, etc., which can be both single-mass and multi-mass.

vibrating machine, resonance, technological process, screen, vibrating screen, rolling resistance, inertial vibrator, rolling without slipping

Одержано (Received) 17.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2026