

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ СТВОРЕННЯ БАГАТОМАСОВИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ СИНФАЗНИХ КОЛИВАНЬ

© Ланець О.С., 2006

Сформульовано принципи створення багатомасових (тримасових) вібраційних машин з електромагнітним приводом та синфазним рухом коливальних мас. За допомогою порівняльного аналізу з іншими конструкціями доводяться переваги саме такого обладнання.

In the article the principles of creation of multimass (three-masses) vibratory machines with an electromagnetic drive and co phased motion of the oscillating masses. By means comparative analysis with other constructions advantages of exactly such equipment there are.

Вступ. Вібротехнології завдяки своїм унікальним фізичним властивостям, що ґрунтуються на природних закономірностях, а саме на використанні процесів коливання, дають можливість ефективно застосовувати їх під час операцій транспортування, сепарування, дозування, орієнтування, зміцнення, фасування, полірування, шліфування, покриття деталей. З кожним роком використання вібраційної техніки набуває все більшого поширення на ділянках автоматизації орієнтування та завантаження обладнання штучними виробами, операціях виготовлення будматеріалів, технології змішування сипучих речовин у фармацевтиці і сільському господарстві, зміцнювальних і викінчувальних операціях в машинобудуванні.

На сучасному етапі розвитку промисловості виникає потреба в створенні високонадійного, високотехнологічного та не складного у виготовленні вібраційного обладнання, де використання дебалансних віброзбудників через рухомі з'єднання, що знижують їхні технологічні можливості, ускладнюється.

Виходом у цій ситуації є створення вібраційних машин на основі іншого приводу, який не має рухомих з'єднань. Так, все більшого поширення в багатьох галузях промисловості (від машинобудівної до харчової) на різних ділянках виробництва здобувають вібраційні машини (ВМ) з електромагнітним приводом. Однак сьогодні електромагнітні віброзбудники, зокрема, приводи великогабаритних ВМ, до яких належать вібраційні машини об'ємного оброблення, вібраційні притиральні машини, віброплощадки для ущільнення бетоносумішей, вібраційні сушарки, змішувачі кормів практично не застосовуються. Існуючі ВМ використовують переважно як малогабаритне обладнання на операціях транспортування, сепарування, фасування, орієнтування дрібних і середніх за розміром деталей та сипких матеріалів у невеликих дозах. Пов'язано це з тим, що електромагнітні віброзбудники за зусиллям і корисною потужністю для заданої ваги віброзбудника поступаються дебалансним (мають мале питоме зусилля); існує пряма залежність встановленого повітряного проміжку в електромагнітному віброзбуднику від амплітуди коливань робочого органу ВМ, внаслідок чого: а) сам електромагнітний віброзбудник має низький ККД, а отже, є енергоємним; б) робочі органи у таких ВМ розвивають значно менші амплітуди коливань порівняно з вібраційними дебалансними машинами.

Отже, причини малого поширення ВМ як великогабаритного обладнання закладені в них самих і насамперед обумовлюються можливостями електромагнітного приводу та існуючою кар-

тиною руху коливальних мас, де амплітуда коливань робочого органу прямо залежить від повітряного проміжку між якорем і осердям з котушкою електромагнітного вібробудника.

Постановка проблеми. Існуючі вібраційні машини на основі вібробудників, що містять рухомі з'єднання, сьогодні не задовольняють високих технічних вимог до технологічного обладнання і не в стані забезпечити повною мірою зростаючі виробничі потреби промисловості з одночасним підвищенням якості продукції. Для вирішення цієї проблеми необхідно здійснити технологічний крок для створення нового за принципом роботи обладнання.

Своєю чергою, передові за концепцією побудови та принципом роботи ВМ, вагомою перевагою яких є відсутність у приводі рухомих з'єднань, мають обмеження за габаритами, що в основному обумовлено силовими характеристиками електромагнітного приводу та закладеним ще на етапі проектування таких машин принципом антифазного руху коливальних мас. Тільки забезпечення якісно нової картини руху коливальних мас за принципом антифазного руху, дасть можливість отримати ВМ з енергоощадним приводом, що значно розширить сферу використання таких ВМ як великогабаритних установок. Це можливе лише за умови використання принципово нових розрахунків вібраційного обладнання.

Отже, впровадження енергоощадної технології на основі нової теорії в розрахунках та створенні ВМ обумовить не тільки створення великогабаритних машин цього класу за високими технічними вимогами виробництва, а й поширить енергоощадні принципи побудови на весь клас ВМ. Це, без сумніву, актуальне завдання, яке пов'язане з державною програмою України щодо створення та впровадження у виробництво енергоощадних технологій.

Аналіз останніх досліджень. Результати аналізу сучасного стану обладнання свідчать, що в промисловості вібромашини з дебалансним приводом найчастіше працюють на частотах $25 \dots 80$ Гц.

Постановка задачі. Автор статті на прикладі силових ВМ обґрунтовує необхідність переходу на багатомасові енергоощадні конструкції ВМ, окреслює концепцією створення та проектування таких машин, аналізує їхні переваги.

1. Обґрунтування вибору конструкцій вібраційних машин з електромагнітним приводом. Нагадаємо, що для приводу вібраційних машин найпоширенішими є дебалансні вібробудники завдяки їхній компактності та великій збурювальній силі. Недоліками вібромашин з дебалансними вібробудниками є:

- складність регулювання амплітуд коливань робочих органів під час роботи машин, що обмежує їхнє використання на автоматичних ділянках виробництва;
- значний час виходу на номінальні режими роботи зі стану спокою і тривалий час зупинки;
- недопустимість роботи в білярезонансних режимах у зв'язку з існуванням в дебалансних вібробудниках рухомих з'єднань (підшипників кочення), що може привести до їхнього руйнування.

Сьогодні електромагнітні вібробудники як приводи потужних силових машин практично не використовують. Існуючі ВМ переважно є малогабаритними, оскільки вони за зусиллям і корисною потужністю, за заданої ваги вібробудника, поступаються дебалансним. Крім цього, поширення ВМ обмежують такі чинники:

- не існує досконалого розрахунку електромагнітних вібробудників за збурювальним зусиллям;
- складність їхнього розрахунку порівняно з вібромашинами з дебалансними збудниками, яка полягає в тому, що необхідно точно розраховувати пружну систему на жорсткість за умови резонансного налагоджування механічної коливної системи (МКС) на певну власну частоту коливань. Це пов'язано з тим, що усі існуючі ВМ налагоджують в білярезонансних режимах, за що відповідає пружна система. У разі відхилення резонансного налагоджування від заданого значення МКС не розвиватиме необхідних амплітуд коливань робочого органу;
- складність виготовлення порівняно з вібромашинами з дебалансними вібробудниками, що в основному пов'язано з точністю виготовлення та позиціонування пружних систем;

– у всіх існуючих ВМ амплітуда коливань робочого органу прямо залежить від повітряного проміжку між якорем і осердям з котушкою електромагнітного вібробудника, а тому робочі органи у таких ВМ розвивають значно менші амплітуди коливань порівняно з вібромашинами з дебалансними вібробудниками.

Однак, ВМ порівняно з найпоширенішими вібромашинами з дебалансами мають і суттєві переваги:

- легкість регулювання амплітуди коливань робочого органу під час роботи;
- відсутність рухомих з'єднань в механізмах приводу підвищує надійність та довговічність, а також значно знижує шумові характеристики під час роботи;
- сили інерції, що виникають під час роботи ВМ у білярезонансних режимах, перевищують статичні сили, які розвивають електромагнітні вібробудники, більш ніж у 10 разів. Тим самим компенсується недолік малого питомого зусилля електромагнітних вібробудників.

Вищенаведені переваги ВМ необхідно пов'язувати саме з електромагнітним приводом. Цей привід є простим, позбавленим підшипників і передавальних механізмів, має тривалий, практично необмежений термін служби, а тому його пріоритетне використання є обґрунтованим і переконливим. Проведемо структурний порівняльний аналіз конструкцій ВМ.

2. Варіант № 1. Створення традиційної двомасової конструкції ВМ з антифазним рухом коливальних мас. Під час проектування ВМ насамперед необхідно з'ясувати і обґрунтувати її структуру для досягнення таких конструктивних параметрів та властивостей машини:

- усунення суттєвого впливу маси завантаження на резонансне налагодження з МКС;
- зниження металомісткості конструкції, збільшення ККД електроприводу, ефективного використання віброізоляції для великих габаритів ВМ та високих частот коливань.

Щоб привести досліджувані конструкції до однакових початкових умов, приймемо, що сумарна маса коливальних систем повинна становити 400 кг, амплітудне значення вимушеного зусилля $P = 20000 \text{ Н}$, а решту необхідних параметрів підбиратимемо так, щоб розвивалась задана амплітуда коливань робочого органу 0,25 мм.

Сформовану задачу частково можна розв'язати з використанням класичної двомасової конструкції з електромагнітним приводом (рис.1, а) [1]. Недоліками таких конструкцій є те, що повітряний проміжок δ між якорем і електромагнітом повинен враховувати коливання як активної m_1 , так і реактивної m_2 мас, за рахунок чого знижується ККД приводу ВМ. Маса завантаження m_{load} робочого органу (маси m_1) прямо впливатиме на величину повітряного проміжку δ за рахунок того, що пружні елементи жорсткістю c_1 просідатимуть.

Дотримуючись класичного принципу побудови двомасових ВМ, конструкції яких є найпоширенішими на виробництві, передбачаємо співвідношення активної до реактивної маси в межах $2 \div 3$. Така МКС погано утримує резонансне налагодження із зміною маси завантаження на активній коливальній масі. Для стабілізації налагодження можна передбачити створення адаптивної системи керування, яка б налагоджувала частоту вимушених коливань під власну частоту МКС, яка змінюється від завантаження. Однак, такий шлях не є вдалим, оскільки вартість розробки такого пульта буде високою, надійність ВМ зменшуватиметься.

Іншим шляхом поліпшення стабілізації резонансного налагодження може бути збільшення маси робочого органу (активної маси) відносно реактивної маси. Справді, за значної переваги в масі робочого органу відносно реактивної маси резонансне налагодження буде досить стабільним із зміною завантаження на активній коливальній масі. У такому випадку реактивна маса повинна бути масою того ж порядку, що і маса завантаження, а робочий орган у кілька разів важчий ніж реактивна маса. Але у такому випадку зазор між якорем і електромагнітом повинен бути великим, враховуючи у декілька разів вищу амплітуду коливань реактивної маси. Це призведе до значних витрат енергії.

Ще одним шляхом покращання стабілізації роботи машин, можливо найоптимальнішим, є використання конструкцій, у яких застосовується далеке від резонансу налагодження з МКС. Хоча

МКС матиме менший динамічний коефіцієнт, за рахунок того, що маси менші, амплітуди можуть залишатися того ж порядку.

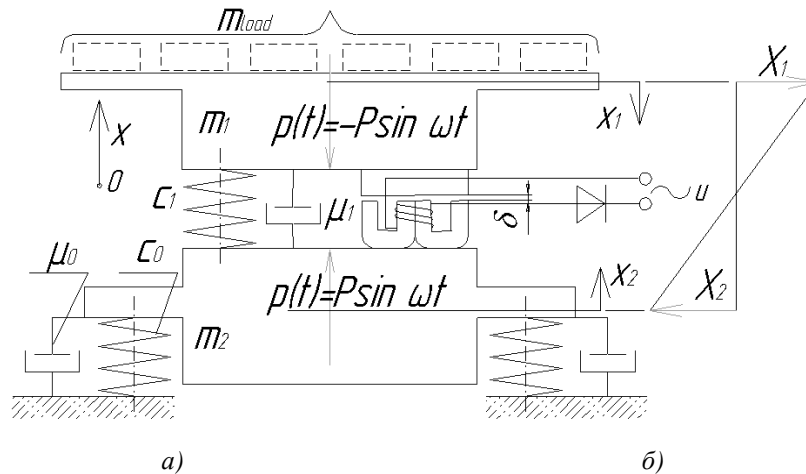


Рис. 1. Принципова схема двомасової ВМ (а) та відповідна їй картина розподілу амплітуд коливальних мас (б), де: c_i, μ_i – відповідно коефіцієнт жорсткості та дисипації i -ї пружної системи; m_i – маса i -го коливного тіла; $p(t)$ – гармонійне збурювальне зусилля

Так, для таких наперед заданих параметрів двомасової МКС $z=0,75$, $m_1=200$ кг, $m_2=200$ кг, колової частоти вимушених коливань $\omega=628$ рад/с, $c_1=7,018 \cdot 10^7$ Н/м, $c_0=0$ Н/м, $\mu_0=\mu_1=0$ кг/с на рис. 2. побудовано теоретичну характеристику роботи двомасової МКС.

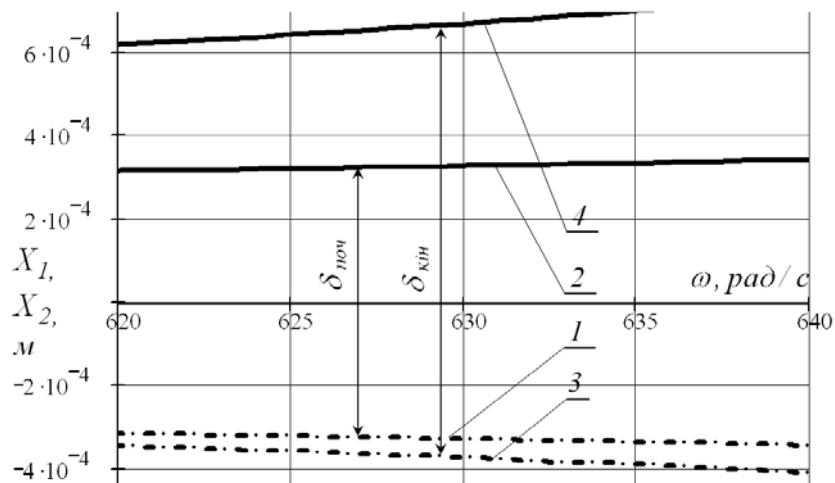


Рис.2. Амплітудно-частотна характеристика двомасової ВМ з антифазним рухом коливальних мас, де: 1, 2 – амплітудні значення коливань відповідно активної X_1 та реактивної X_2 мас без навантаження активної маси m_1 додатковою масою m_{load} ; 3, 4 – їхні амплітуди після навантаження

Із залежностей спостерігаємо, що мінімальний проміжок δ_{noch} між якорем і осердям з котушкою електромагнітного вібробудника до завантаження корисного вантажу m_{load} та після завантаження δ_{kin} суттєво залежить від маси вантажу, а найголовніше – він дорівнює сумі амплітуд

коливань реактивної та активної мас. Така пряма залежність повітряного проміжку від суми амплітуд коливальних мас і є головним недоліком таких конструкцій.

3. Варіант № 2. Створення традиційної тримасової конструкції ВМ з антифазним рухом коливальних мас. Частково вищеперераховані недоліки двомасової ВМ можуть бути усунені введенням в конструкцію третьої коливальної маси m_3 , яка виконуватиме функцію вузькочастотного динамічного демпфера, що гасить коливання проміжної маси m_2 (рис.3, а). Зазначимо, що тримасову конструкцію з динамічним демпфером виконують так, щоб збурення коливань маси m_3 відбувалось кінематично. За відповідного підрахунку сумарних жорсткостей c_1 та c_2 пружних елементів проміжна маса m_2 під час роботи буде нерухомою [1]. Тому зазор між якорем і осердям з котушкою теоретично буде регламентуватися тільки амплітудою коливань активної маси m_1 , яка в нашому випадку є малою (до 0,25 мм).

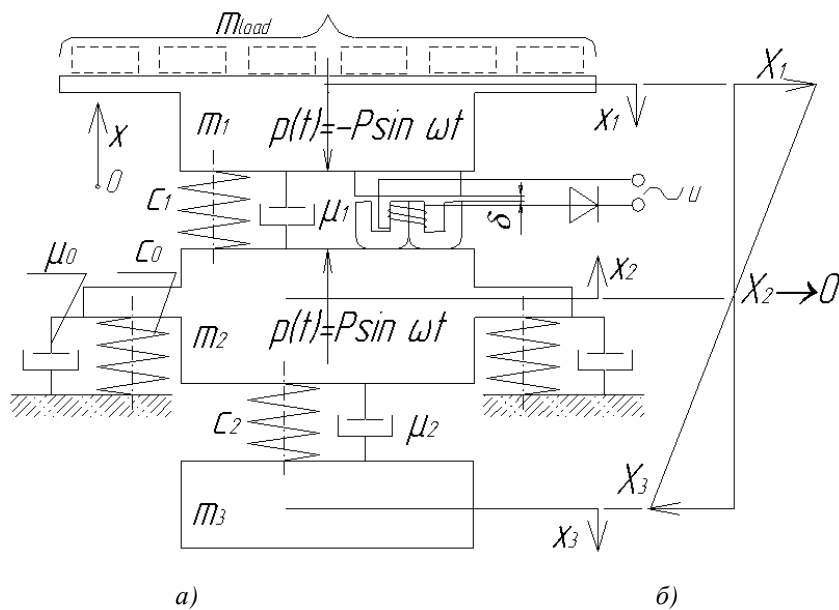


Рис. 3. Принципова схема традиційної тримасової ВМ (а) та відповідна їй картина розподілу амплітуд коливальних мас (б)

Для наступних наперед заданих параметрів тримасової МКС $z = 0,92$, $m_1 = 300$ кг, $m_2 \rightarrow 0$ кг, $m_3 = 100$ кг $\omega = 628$ рад/с, $c_1 = 1,399 \cdot 10^8$ Н/м, $c_2 = 4,554 \cdot 10^7$ Н/м, $c_0 = 0$ Н/м, $\mu_0 = \mu_1 = 0$ кг/с, де сумарне значення коливальних мас таке саме, як і для двомасової конструкції за значення маси m_2 , що прямує до нуля, на рис.4 побудовано теоретичну характеристику роботи такої тримасової МКС.

За наведеними залежностями мінімальний початковий проміжок $\delta_{поч}$ та кінцевий $\delta_{кін}$ між якорем і осердям з котушкою електромагнітного вібробудника до та після завантаження корисного вантажу m_{load} також залежать від маси завантаження і дорівнюють сумі амплітуд коливань реактивної та проміжної мас. Як бачимо, в таких конструкціях тільки частково усунений вплив амплітуд коливальних мас на повітряний проміжок. Прослідковується пряма залежність повітряного проміжку від амплітуди коливань активної маси та часткова залежність від проміжної маси, амплітуда якої теоретично повинна прямувати до нуля. Амплітуда коливань реактивної маси практично не впливає на повітряний проміжок. Це і є головною перевагою таких конструкцій.

Аналізуючи сказане, можна зробити висновки, що, застосовуючи таку конструкцію ВМ на виробництві, можна:

- значно збільшити ККД приводу ВМ в зв'язку з тим, що повітряний проміжок регламентуватиметься тільки амплітудою коливань активної маси;
- максимально усунути вібрацію на фундамент через те, що кріплення ВМ здійснюватиметься через проміжну умовно нерухому масу;
- значно стабілізувати резонансне налагодження, оскільки тримасова конструкція набагато краще утримує резонансне налагодження. Це пов'язано з тим, що в тримасовій моделі робочий орган та реактивна маса ВМ працюють за одномасовою схемою, де робочий орган формує частоту власних коливань власною вагою, яка є значно важча ніж приведена маса у двомасовій конструкції. Тому маса завантаження матиме менший вплив. За рахунок зменшення повітряного зазору зросте ККД;
- крім того, робочий орган у декілька разів може бути більшим за реактивну масу, що було не бажаним в двомасових конструкціях. За рахунок цього можна стабілізувати амплітуди коливань робочого органу під час його завантаження.

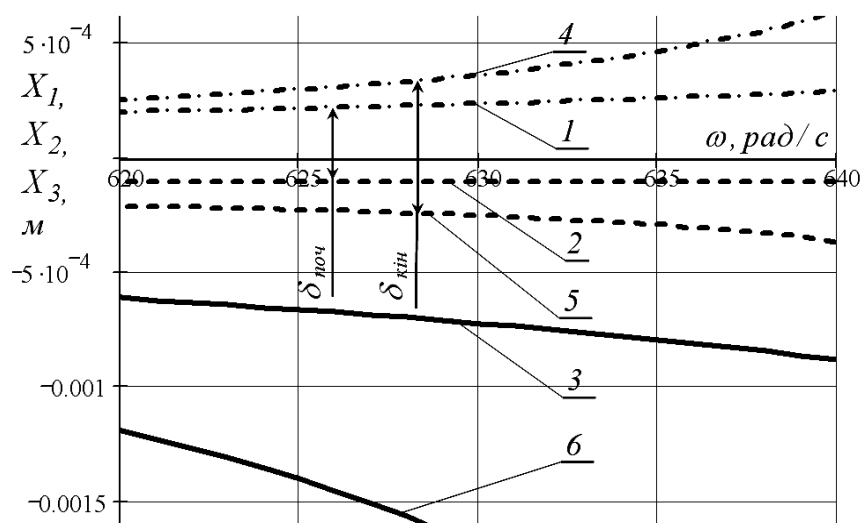


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика тримасової ВМ з антифазним рухом коливальних мас, де:
 1, 2, 3 – амплітудні значення коливань відповідно активної X_1 , проміжної X_2 та реактивної X_3 мас без навантаження активної маси m_1 додатковою масою m_{load} ; 4, 5, 6 – їхні амплітуди після навантаження

- Отже, тримасова конструкція ВМ повинна задовольняти такі вимоги:
- активна маса повинна бути у декілька разів вищою від реактивної маси;
 - конструкція виготовляється так, щоб проміжна маса залишалась нерухомою за рахунок динамічного гасіння коливань реактивною масою, тобто значення жорсткостей c_1 та c_2 підбирають за умови коливань активної та реактивної мас з парціальною коловою частотою коливань, що дорівнює коловій частоті вимушених коливань [1];
 - робочий орган робиться якомога легшим, проте жорстким, щоб не входив в резонанс на частоті 100 Гц ;
 - необхідно відходити якомога далі від резонансу для більшої стабільності в роботі. Хоча в такому випадку зменшиться динамічний коефіцієнт та за рахунок можливості використовувати менші маси можна вийти на ті самі амплітуди.

Отже, для втілення на практиці придатні як дво-, так і тримасові конструкції. У кожній є свої переваги та недоліки. Так, тримасова конструктивно складніша, проте в неї проміжна маса “умовно нерухома”, а тому вібрації на фундамент практично не передаються; повітряний проміжок між якорем і

електромагнітом не залежить від амплітуди коливань реактивної маси, а тому його можна робити меншим (регламентувати тільки амплітудою коливань активної маси), істотно піднімаючи ККД ВМ.

Двомасова конструкція простіша, мала б менше споживати енергії за рахунок того, що за двомасовою схемою розрахункова приведена маса є набагато меншою ніж активна маса за розрахунком тримасової конструкції за одномасовою схемою. Однак, за рахунок збільшення повітряного проміжку між якорем і електромагнітом у зв'язку з коливаннями реактивної маси, значно зростає споживання електроенергії. Тому вищесказане про менше споживання електроенергії у двомасовій схемі порівняно з тримасовою можна поставити під сумнів, оскільки із зростанням зазору споживання електроенергії зростає квадратично, як це видно з формули для визначення потужності приводу $N = A^2 \cdot \omega^3 \cdot M / 2 \cdot \xi$, де A – відносна амплітуда руху коливальних мас; M – приведена маса; ξ – динамічний коефіцієнт.

Узагальнюючи вищесказане, можна зробити такий висновок: багатомасові (тримасові) конструкції ВМ мають значні переваги порівняно з двомасовими, а тому їхнє впровадження на практиці є перспективним і матиме більший ефект за продуктивністю порівняно з двомасовими. Своєю чергою, втілення багатомасових конструкцій у виробництві обумовлюється подальшим удосконаленням їхніх конструкцій і методів розрахунку.

4. Варіант № 3. Створення тримасової конструкції ВМ на основі теорії синфазних коливань. Основною проблемою, яка залишається невирішеною у вищенаведених дво- та тримасових ВМ, є те, що у таких конструкціях, порохованих за принципом антифазного руху коливальних мас, амплітуда коливань робочого органу пропорційно залежить від повітряного проміжку між якорем та осердям з котушкою електромагнітних вібробудників. Так, з одного боку необхідність конструктивно закласти у ВМ вищі амплітуди коливань робочого органу вимагає збільшення повітряного проміжку у вібробудниках, що непропорційно, приблизно за гіперболічною залежністю, знижує їхнє тягове зусилля і призводить до значного споживання електроенергії. З іншого боку, прогнозовано малий повітряний проміжок між якорем та осердям з котушкою вібробудника, як у випадку 100-герцових вібраційних площадок, де амплітуда робочого органу не має бути більшою за 0,25 мм, може викликати явище прилипання. В такому випадку для існуючих ВМ, в яких маси коливаються в протифазі, рух буде неможливий або нестійкий. Для розв'язання цієї проблеми автором статті було розроблено теорію вібраційних машин з електромагнітним приводом та синфазним рухом коливальних мас, що базується на ефекті нульової жорсткості пружної системи і яку детально викладено в [2]. Запропонована теорія придатна до апробації на будь-якому типі вібраційних машин з електромагнітним приводом.

Результатом розрахунку за запропонованою теорією є те, що аналітично встановлюють параметри тримасової МКС, а саме інерційні і жорсткісні показники, виконання яких забезпечить таку картину руху коливальних мас. Дві суміжні маси, а саме активна m_1 та проміжна m_2 (рис. 5, а), які з'єднані між собою за допомогою пружної системи з сумарною жорсткістю пружних елементів на згин c_1 , рухатимуться синфазно (як одне ціле з однаковими амплітудами коливань) завдяки прикладеному між ними періодично змінному збуджувальному зусиллю $p(t)$. Активна коливальна маса m_3 , кінематично збуджуючись від проміжної маси 2 через пружну систему 4 з сумарною жорсткістю на згин c_2 , рухатиметься в протифазі до двох суміжних мас (рис. 5, б).

Завдяки наявності синфазного руху повітряний проміжок в електромагнітному вібробуднику можна робити мінімальним, оскільки в такому випадку відсутні відносні амплітуди коливань між двома суміжними масами. Це дасть можливість значно знизити величину струму, що протікає в обмотці вібробудника, а отже, і споживану потужність.

Для таких наперед заданих параметрів тримасової МКС $z = 5$, частки жорсткості c_1 , що дорівнює $\eta = 0,55$ і введена в запропонованій теорії [2], $m_1 = 295 \text{ кг}$, $m_2 = 57 \text{ кг}$, $m_3 = 50 \text{ кг}$; $\omega = 628 \text{ рад/с}$, $c_1 = 0 \text{ Н/м}$, $c_2 = 1.728 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$, $c_0 = c'_0 = 0 \text{ Н/м}$, $\mu'_0 = \mu_0 = \mu_1 = 0 \text{ кг/с}$, побудовано теоретичну характеристику роботи тримасової МКС (рис. 6).

Аналізуючи залежності, бачимо, що активна та проміжна коливальні маси без навантаження теоретично рухаються як одне ціле на частоті збурення коливань $\omega = 628 \text{ рад/с}$. Необхідно з'ясувати, яку коливальну масу раціональніше навантажувати. З рис. 6, а видно, що додаткове навантаження активної маси викликає зменшення амплітуди, що є недопустимим. Згідно з рис. 6, б додаткове навантаження проміжної маси, навпаки, викликає зростання її амплітуди коливань. Через це повітряний проміжок зростає практично від 0 до різниці амплітуд коливань активної та проміжної мас.

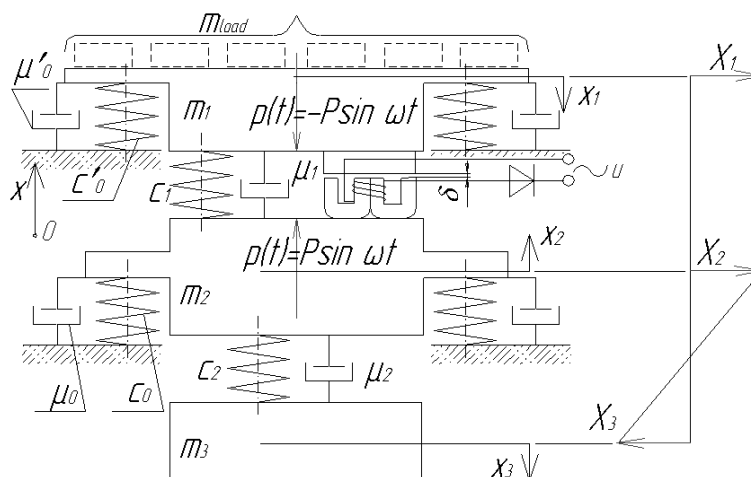


Рис. 5. Структурна схема (а) та розподіл амплітуд коливань мас (б) для тримасової ВМ, що розрахована згідно із запропонованою теорією [2]

Однак, враховуючи те, що якір і осердя вібробудника, що відповідно кріпляться до цих мас, за рахунок явища прилипання частково “схоплюються”, а також те, що маси взаємно впливають одна на одну, їхні амплітуди коливань вирівнюються, і повітряний проміжок зводиться до мінімуму, що буде доведено нижче. Це дає змогу стверджувати, що краще навантажувати проміжну коливальну масу.

Отже, запропоновані тримасові ВМ з синфазним рухом коливальних мас мають безсумнівну перевагу. В таких конструкціях за правильного вибору параметрів можна досягти відсутності повітряного проміжку між якорем та осердям з котушкою електромагнітного вібробудника, що максимально підвищить ККД вібробудників, а отже, і тягове їхнє зусилля. Із наближенням від міліметра до практично нульового повітряного проміжку тягове зусилля може зростати в десятки разів.

5. Імовірність існування синфазного руху коливальних мас у вібраційних машинах з електромагнітним вібробудником. З метою підтвердження існування синфазного руху коливальних мас було вирішено реалізувати дослідний зразок тримасової МКС з електромагнітним приводом згідно з розробленою структурною схемою (рис. 5) [3].

Для полегшення експериментального дослідження було вирішено використати масивну реактивну коливальну масу m_3 , наприклад, масивну плиту. Тоді не потрібно встановлювати тримасову МКС через віброізолятори. Недоліком такої тримасової МКС є те, що вібрація коливальних мас 1 та 2 передаватиметься на фундамент через раму зі станиною, однак для проведення експерименту це можна допустити. Для наперед заданих параметрів МКС $z = 3,98$, $m_3 = 1000 \text{ кг}$ (маса станини та

рами, на якій вона стоїть), $m_2 = 3 \text{ кг}$, $\omega = 141 \text{ рад/с}$ визначено такі параметри $m_1 = 7,2 \text{ кг}$, $c_2 = 2.027 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$, $c_1 = 9,511 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$.

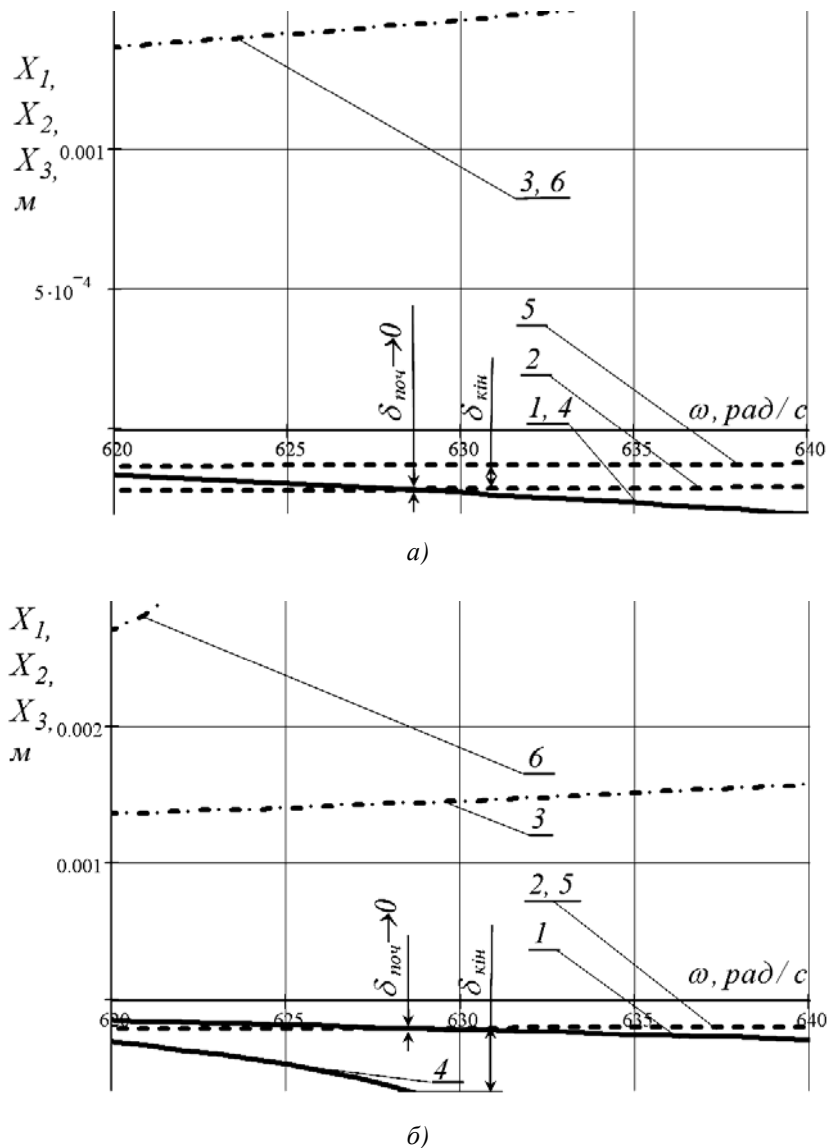


Рис.6. Амплітудно-частотна характеристика тримасової ВМ з синфазним рухом коливальних мас, де: 1, 2, 3 – амплітудні значення коливань відповідно активної X_1 , проміжної X_2 та реактивної X_3 мас без навантаження активної маси m_1 (а) та проміжної m_2 (б) додатковою масою m_{load} ; 4, 5, 6 – їхні амплітуди після навантаження

Під ці параметри підібрали тримасову МКС, експериментальну установку якої зображено на рис.7, де: 1, 2, 3 – відповідно активна, проміжна та реактивна коливальні маси; 4, 5 – пружні елементи, що з'єднують між собою попарно відповідно активну та проміжну, проміжну та реактивну коливальні маси; 6, 7 – відповідно осердя з котушкою та ярів електромагнітного вібробудника, що кріпляться до реактивної та проміжної коливальних мас. Роботу такої тримасової МКС, що освітлювалась з тахометра стробоскопічного $2ТС_Т 32-456$ з частотою синхронізації близько частоти збурення $\nu = 22,5 \text{ Гц}$, було зафіксовано за допомогою цифрової відеокамери (рис. 8).

Напругу на котушки вібробудників подавали із звукового генератора $ГЗ-33$ через підсилювач сигналу $LV 102$, завдяки чому налагоджували частоту вимушених коливань. Максимальна

вихідна потужність сигналу становила 50 Вт , можливі межі зміни частоти сигналу $16 \dots 20000 \text{ Гц}$ для звукового генератора та $3 \dots 20000 \text{ Гц}$ для підсилювача. Аналіз відеокадрів (рис. 8) показав, що під час роботи тримасової МКС повітряного проміжку між осердям 1 та якорем 2 електромагнітного вібробудника немає, а отже, амплітуда коливань активної 1 та проміжної 2 коливальних мас (рис.7) однакова (маси рухаються синфазно з однаковими амплітудами коливань), що підтверджує теоретичні припущення.

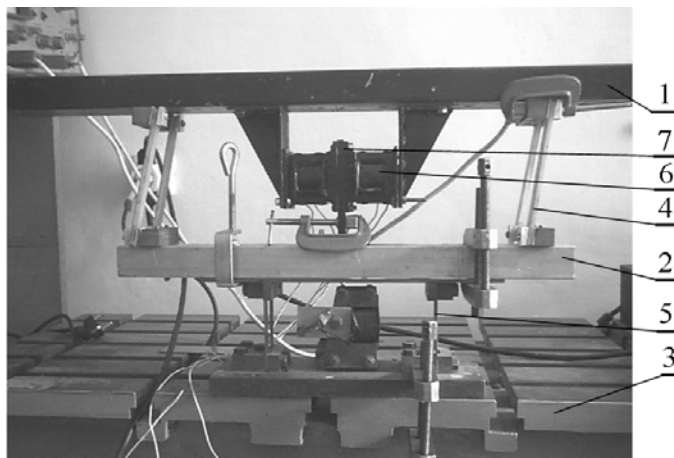


Рис. 7. Тримасова МКС з прямолінійними коливаннями

Аналізуючи динаміку роботи тримасової МКС, можна зазначити:

1. Тримасова МКС, підібрана за вищенаведеними параметрами, маючи налагодження, далеке від резонансу, утримує практично сталі амплітуди коливань активної та проміжної мас під час їхнього навантаження додатковою масою. Так, без значного впливу на амплітуду коливань до цих коливальних мас можна прикладати навантаження, еквівалентне їхнім масам. Однак необхідно зазначити, що найкраще сприймає додаткове навантаження проміжна маса m_2 , про що свідчать теоретичні та практичні дослідження, де за певних параметрів до проміжної маси можна прикладати навантаження, значення якого становить $(2 \dots 3) \cdot m_2$. Найгірше сприймає навантаження реактивна коливальна маса, що збуджується кінематично, а тому використовувати її як робочий орган силових вібротрибун не доцільно.

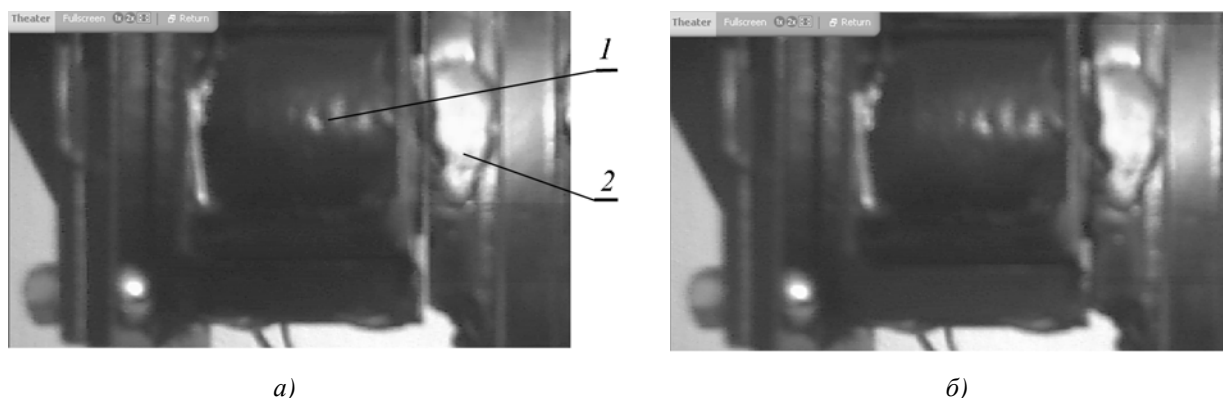


Рис. 8. Відеокадри роботи тримасової МКС:
а) у неробочому стані; б) під час роботи

2. Виявилось, що збудження коливань у таких тримасових МКС від одноконтурного електромагнітного вібробудника деякою мірою краще, ніж від двоконтурного. Це пов'язано з тим, що під час роботи тримасової МКС як і осердя вібробудника за рахунок явища прилипання частково "схоплюються", звівши до мінімуму повітряний проміжок, і рухи якоря і осердя між собою

практично відсутні, що знижує шум під час роботи тримасової МКС. Працюючи з двотактним вібробудником, кожне з осердь по черзі “намагається перетягнути” якір на себе, тим самим, відриваючись від одного з осердь, якір вдаряється об друге. Виникає биття, а отже, шум під час вібрації. Однак необхідно зазначити, що з використанням двотактного вібробудника розвивається більша амплітуда коливань, а шум під час биття можна усунути, ввівши гумові демпфери у вигляді тонких прокладок, які розташовуватимуться між полюсами осердя та якорем.

3. За рахунок того, що експериментальна конструкція тримасової МКС не віброізована, під час її роботи передається вібрація на фундамент, що є досить шкідливо, а тому усі конструкції необхідно реалізовувати за структурною схемою (рис. 5), де тримасова МКС зв'язана з фундаментом через віброізолятори.

4. Моделювання тримасової МКС вказує на те, що до пружної системи 4 (рис.7) можна не висувати високих вимог щодо значення сумарної жорсткості c_1 , яке може наближатися і до 0 , не впливаючи суттєво на динаміку руху МКС.

5. За частоту вимушених коливань, на якій експлуатуватиметься тримасова МКС, відповідає пружна система 5, яка повинна бути підібрана точно. Тому реактивну коливальну масу 3 разом із пружною системою 5 запропоновано називати резонатором.

Теоретичні характеристики роботи тримасової МКС, використовуючи значення вимушеного зусилля $P = 500 \text{ Н}$, наведено на рис.9. Спостерігаємо рівність амплітуд коливань X_1 та X_2 відповідно активної та проміжної мас на частоті збурення коливань $\omega = 141 \text{ рад/с}$ ($22,5 \text{ Гц}$). Амплітуда коливань X_3 реактивної коливальної маси наближається до 0 , де ця маса виконує функцію умовно нерухомої основи.

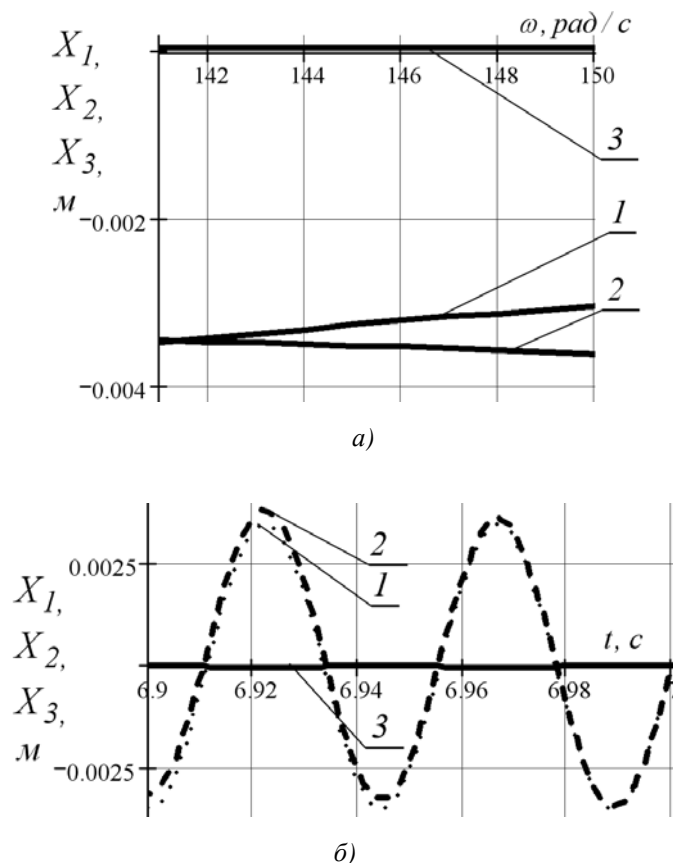


Рис. 9. Залежності амплітудно-частотних характеристик (а) та миттєвих значень амплітуд коливань в часовій області (б) експериментальної установки тримасової МКС, де: 1, 2, та 3 – амплітуди коливань відповідно активної, проміжної та реактивної мас

На основі запропонованої теорії розроблено технічну документацію установки тримасової вібраційної площадки, просторову модель якої наведено на рис. 10.

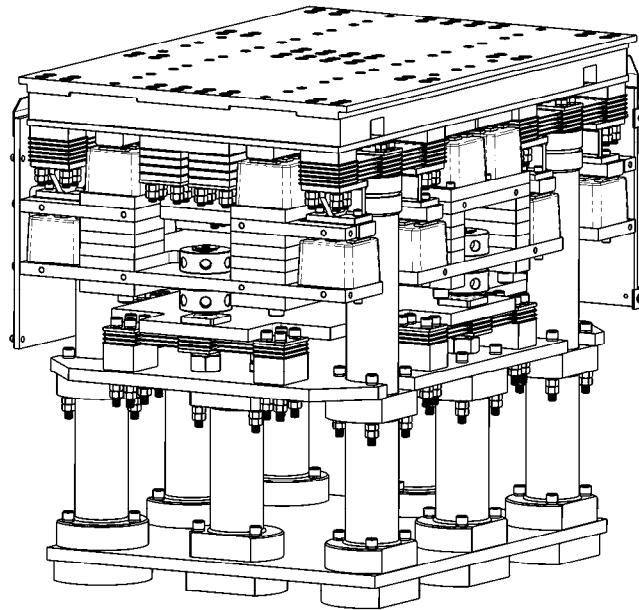


Рис. 10. Просторова модель вібраційної площадки з електромагнітним приводом, створеної за теорією синфазних коливань

Зазначимо, що просторова модель площадки побудована за структурною схемою, наведеною на рис. 5, де проміжна 2 та активна 3 коливальні маси окремо кріпляться до фундаменту через віброізолятори 5. Таке конструктивне рішення забезпечує незалежне позиціонування цих коливальних мас незалежно одна від однієї у випадку, коли жорсткість пружної системи 4 (див. рис. 8) прямуватиме до 0 . Крім того, це унеможливує «просідання» проміжної коливальної маси на активну, що може спричинити до порушення принципів розрахунку динамічної моделі, а отже, до недієздатності конструкції. Реактивна коливальна маса 1 через пружну систему 4 знизу підвішується до проміжної маси. Нагадаємо, що під час розрахунків таких площадок жорсткостями віброізоляторів, значення яких $c_0 \ll m_2\omega^2$ та $c'_0 \ll m_1\omega^2$, нехтуємо, а їхній вплив на загальну картину руху і параметри системи зокрема, що буде нижче доведено, є незначним.

6. Висновок. Отже, викладені переваги нових тримасових ВМ з синфазним рухом коливальних мас вказують на їхню перспективність та безсумнівну перевагу порівняно з традиційними моделями з закладеним антифазним рухом коливальних мас. Базуючись на проведених експериментальних дослідженнях, підтверджених математичним моделюванням, картина руху коливальних мас для тримасової МКС, порохованих за запропонованою теорією, така, що дві суміжні маси, між якими прикладається зусилля, рухаються як одне ціле в протифазі до третьої коливальної маси з кінематичним збудженням, що обумовлює використання цієї теорії у створенні конструкцій енергоощадних вібраційних машин з електромагнітним приводом. Спектр використання таких машин розшириться; вони зможуть зайняти нішу силових вібраційних машин з дебалансним приводом.

1. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2004. – 248 с. 2. Ланець О.С. Теорія синфазних коливань у вібраційних машинах з електромагнітним приводом // Вібрації в техніці та технологіях. – 2005. – № 2. 3. Ланець О.С. Експериментальне підтвердження положень теорії синфазних коливань у тримасових механічних системах з електромагнітним приводом // Вібрації в техніці та технологіях. – 2006. – № 1.