



KAPITEL 1 / CHAPTER 1¹

VIBRATION PROTECTION OF INSTRUMENTS AND EQUIPMENT ON MOVING OBJECTS IN LOW-FREQUENCY SPECTRUM

DOI: 10.30890/2709-2313.2023-17-03-011

Вступ

Наразі серед пріоритетів соціально-економічного розвитку країни стоїть питання віброзахисту для сучасних транспортних засобів, в тому числі для авіації та ракетобудування, є одним з найбільш актуальних. Механічна дія на елементи конструкції рухомого об'єкта може бути як безпосередня (силова), так і опосередкована (кінематична) – внаслідок руху опори. Зменшення негативного впливу вібраційних навантажень можливо двома шляхами – вібропоглинанням і віброізоляцією. Перший напрямок інтенсивно розвивається, особливо на основі сучасних композиційних і спінених матеріалів, але він ефективний лише на високих частотах.

Віброізоляцію широко застосовують у різних галузях техніки. Особливо там, де навантаження особливо великі: автомобілебудування, суднобудування, аерокосмічна галузь. В одних випадках системи віброізоляції є «вбудованими» в комплексі з об'єктом, що захищається, як його невіддільна частина (підвіси автомобілів, силових установок кораблів тощо). В інших випадках одні й ті ж прилади та устаткування залежно від місць розташування піддаються досить різним за формою або інтенсивністю навантаженням. Отже, проектування віброзахисних систем має індивідуальний характер і виконують його за наслідками статичного і динамічного розрахунків.

У простій моделі віброзахисної системи, що дозволяє вивчити просторовий рух джерела й об'єкта, тіла вважаються абсолютно твердими. Сукупність віброізоляторів, що їх сполучають, утворює пружний підвіс тіла, що підлягає захисту.

Віброізоляційні системи, згідно з сучасним підходом, поділяється на активні та пасивні. Під активними розуміють системи, що мають у своїй структурі джерела енергії та ланцюги управління зі зворотним зв'язком. Основною перевагою активних віброзахисних систем є їх висока несуча здатність. Одночасно слід відзначити, що як правило, вони відрізняються складністю, дороговизною і відносно вузьким робочим діапазоном частот. Широкого використання в інженерній практиці вони поки що не знайшли та переважно мають дослідницький характер. Пасивні віброзахисні системи добре досліджені та мають декілька напрямків в ідеологічній і конструктивній реалізації. Переважна більшість з них розглядає питання віброзахисту в «лінійній» постановці задачі. Дослідження динаміки таких віброзахисних систем не викликає принципових труднощів ні з боку теорії, ні з точки зору адекватності практичної реалізації. Хоча навіть у цьому випадку виникають проблеми обумовлені тертям в вузлах, ударами в обмежувачах руху навіть за умови незначних переміщень.

¹Authors: Arkhypov Oleksandr, Korobko Ivan, Marinoshenko Oleksandr, Sukhov Vitalii, Stefurak Taras



Зважаючи на те, що задача захисту від вібрації часто одночасно вирішує і задачу захисту від ударів [1], це вимагає для переважної більшості «лінійних» захисних систем значних габаритів і необхідності використання елементів, які забезпечують дисипацію енергії. Більшість пасивних систем ефективно працює на частотах понад 10 Гц і вище. Зменшення нижньої границі робочих частот веде до непропорційного зростання габаритів. Особливо ускладнюється задача за умови захисту в діапазоні, так званих, сейсмічних частот – 5 Гц і нижче. Отже, виникає необхідність використання нелінійних віброзахисних систем з параметрами, що регулюються. А для систем установлених на рухомих об'єктах одночасно має вирішуватися задача оптимізації габаритів, часто стабілізації положення.

Ще більше ускладнень виникає за умови необхідності віброзахисту за декількома напрямками, тобто за необхідності використання систем з декількома ступенями вільності. Найпростіше реалізовується в цьому разі віброзахист в побудові каскадної віброзахисної системи, коли певному напрямку відповідає своя окрема захисна система, але є інші варіанти розв'язання такої непрості задачі [2]. Відповідно кожен рівень, що відповідає певному переміщенню, «вбудовується» конструктивно в інший. Зрозуміло, з точки зору мінімізації габаритів і маси такий підхід не є оптимальним.

Метою роботи є ознайомлення з конструкцією і принципом роботи пасивних віброзахисних систем з корекцією жорсткості (ВСКЖ), що працюють починаючи з низькочастотного спектра і просторових тросових конструкцій розроблених авторами.

1.1. Огляд віброзахисних систем з квазінульовою жорсткістю

Вібрація, якій підлягають прилади та апаратура, що встановлені на транспортних засобах в реальних умовах має складний і далекий від синусоїдального виду характер. Частіше за все вібраційне навантаження спрощують у вигляді суми гармонічних складових. Установка віброзахисної системи між об'єктом захисту та джерелом вібрації саме і спрямована на зменшення негативного впливу останнього. Згідно з статистичними даними [3], обладнання літаків експлуатується в діапазоні частот 3 - 400 Гц, кораблів 5 - 50 Гц, наземних транспортних засобів 3 - 200 Гц. При цьому прискорення можуть бути від 1 g до 10 g. Отже, віброзахист треба починати орієнтуючись на нижню границю діючих частот.

Відповідність розробленої віброзахисної системи поставленим задачам здійснюють шляхом проведення досліджень на вібростійкість, вібро- та удароміцність. Испити на вібростійкість ведуться з метою перевірки робоздатності обладнання або приладів за вібраційного навантаження в заданому діапазоні частот і прискорень. Испити на вібро- та ударостійкість дозволяють перевірити здатність об'єкта захисту виконувати свої функції та зберігати свої характеристики й параметри в діапазонах, що встановлені стандартами (іншими нормативними документами), після дії механічного



навантаження.

Небезпеку вібрації можна оцінити, наприклад, за допомогою коефіцієнта перевантаження. Приймаючи, що коливальний рух описується синусоїдою, останній можна визначити за формулою:

$$n = \frac{\omega^2 * A}{g}, \quad (1)$$

де ω і A – колова частота і амплітуда збурюючого навантаження, g – прискорення вільного падіння.

В інженерній практиці частіше користуються для визначення коефіцієнта перевантаження іншою формулою:

$$n = \frac{A * f^2}{250} = 4A * f^2 * 10^{-3}, \quad (2)$$

де A – амплітуда виміряна в мм, f – частота збурюючих коливань в Гц.

Оцінка ефективності роботи віброізолюючої системи може бути проведена різними характеристиками, однією з найбільш використовуваних є коефіцієнт віброізоляції k :

$$k = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + 4\beta^2 * \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 * \omega^2}}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{b}{2m}, \quad (4)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – власна частота системи, ω – частота збурюючої сили, b – коефіцієнт, що характеризує демпфуючі властивості віброізолюючої системи, m – маса об'єкта, що захищається.

Коли $k < 1$, то використання віброізолюючої системи доцільне, за умови $k \geq 1$ використання системи неефективне.

Можлива оцінка і за співвідношенням частот власної і збурюючої сили: $\frac{\omega}{\omega_0} = \omega_c > \sqrt{2}$, в цьому випадку віброізолююча система вже ефективна. Зі збільшенням величини ω_c ефективність захисту зростатиме, тобто власна частота має максимально різнитися від частоти збурюючої частоти і бути меншою за неї. Отже чим менша власна частота віброзахисної системи, тим доцільніше її використання. Причому застосування демпфування раціональне лише при $\omega_c < \sqrt{2}$, тобто демпфування корисне лише поблизу резонансу, а при віддаленні від нього воно лише погіршує віброізоляцію.

Наведені аргументи доводять, що використання лінійних систем вимагає використання «м'яких» пружних елементів, а отже великих габаритів і мас віброзахисних систем, порівняних за величиною з масою об'єктів захисту.

З точки зору захисту від ударного навантаження у вигляді одиничного імпульсу при проектуванні лінійних віброзахисних систем слід пам'ятати, що жорсткість несучого пружного елемента має задовольняти співвідношенню:

$$c < \pi^2 \frac{m}{9\tau^2}, \quad (5)$$

де c – жорсткість пружного елемента; m – маса об'єкта, що підлягає захисту від удару; τ – час дії ударного імпульса.

Зі співвідношення випливає, що класичні лінійні вібро- та ударозахисні



системи будуть раціональні лише за умови дії відносно невеликих за часом дій ударного імпульсу. В протилежному випадку необхідно суттєво зменшувати жорсткість, що веде до зростання габаритів віброзахисної системи. Для систем, встановлених на транспорті, в аерокосмічній галузі дуже часто це є неприпустимим.

Особливості класичних лінійних систем обумовили дослідників до розробки нелінійних віброізолюючих систем, особливо в умовах одночасної ударної дії. Одним з напрямків таких досліджень є віброзахисні системи квазінульової жорсткості (ВСКЖ). Найбільш досконало теорія віброзахисних систем з корекцією жорсткості розглянута в роботі колективу авторів на чолі з П.М. Алабужевим [4]. Метою даної роботи не є викладення теорії таких систем, тому відмітимо лише їх характерні особливості.

ВСКЖ є синтезом лінійних систем (можуть бути і нелінійні) і коректорів жорсткості. Дія останніх ніяк не впливає на сприйняття навантаження в статичному положенні. На цей час розроблено декілька типів конструкцій з корекцією жорсткості і запропонована відповідна класифікація, але основна ідея корекції наведена на рисунку 1. Статичне навантаження сприймає основний пружний елемент жорсткості C_1 , а коректори з жорсткістю C_2 в статичному положенні перпендикулярні до осі основного пружного елемента і попередньо деформовані. Причому в цьому випадку жорсткість основного пружного елемента може бути високою, а несуча здатність ВСКЖ залежить лише від жорсткості основного пружного елемента і його попередньої деформації. Отже, таким чином забезпечуються незначні габарити та стійкість. І головне, за такого підходу, усувається основний недолік лінійних віброзахисних систем – великі габарити та необхідність конструктивного підкріплення пружних елементів в деяких типах віброзахисних систем.

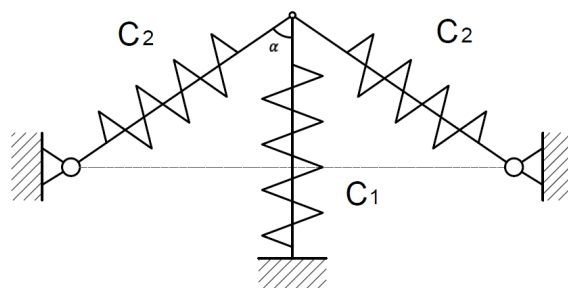


Рисунок 1 – Розрахункова схема конструкції ВСКЖ

При виході з рівноваги коректори жорсткості створюють сили, що діють в протилежному напрямку від дії основного пружного елемента. Це веде до зниження сумарної жорсткості віброзахисної системи та відповідно зменшує власну частоту коливань. Причому величина сумарної жорсткості може регулюватися як конструктивними параметрами, так і величиною попередньої деформації коректорів. Такі системи є нелінійними, але для певного діапазону амплітуд можна забезпечити практичну лінійну модель (рисунок 2).

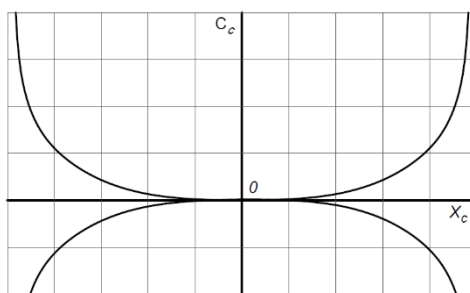


Рисунок 2 – Характеристики жорсткості ВСКЖ

На наведеному графіку використанні наступні позначення: $c_c = \frac{c}{c_1}$, $x_c = \frac{x}{l}$, де c – жорсткість віброзахисної системи, c_1 – жорсткість несучого (основного) елемента, x – переміщення вздовж вертикальної осі несучого елемента, l – найкоротша відстань між шарнірами пружного елемента коректора жорсткості c_2 .

Теоретично власна частота може наближатися до нуля, тобто система має нульову жорсткість, завдяки чому вони й отримали свою назву. Важливо також, що при наближенні до границі робочого діапазону жорсткість різко зростає. Таким чином система реалізує функцію м'якого упору, що обмежує ударні навантаження. Для практичної реалізації чисто «нульова» жорсткість небажана. Це пояснюється тим, що в процесі роботи можуть бути зупинки й об'єкт захисту може опинитися близько до границі робочих переміщень. Тоді початок нових коливань може привести до ударів об фізичні обмежувачі не дивлячись на нелінійність системи віброзахисту. З досвіду досліджень таких систем авторами зниження власних частот менше як 2 Гц є недоцільним, об'єкт може не повернутися в стан статичної рівноваги за браком необхідної жорсткості, яка «підтягує» об'єкт захисту в положення статичної рівноваги, тобто в середину діапазону переміщень. Зрозуміло, що характеристики жорсткості залежать від маси об'єкта, якій підлягає захисту і габаритів системи.

Згідно з класифікацією запропонованою П.М. Алабужевим віброізолятори реалізовані за схемою наведеною на рисунку 1 відносяться до ВСКЖ типу А. Крім того, в інженерній практиці використовуються і інші варіації віброзахисних систем з корекцією жорсткості. На рисунках 3 і 4 наведено два інших типи ВСКЖ, що за запропонованою класифікацією відносяться до типів В і С відповідно.

За своїми віброзахисними характеристиками всі типи ВСКЖ тотожні, різниця полягає в способі реалізації принципу корекції жорсткості.

Слід відзначити наступні важливі для проектування особливості ВСКЖ трьох конструктивних типів:

- в системах типу А за будь-яких параметрів є інтервали переміщень з квазінульовою жорсткістю;
- в системах типу В і С інтервали з квазінульовою жорсткістю реалізуються лише за умови $\delta_c < 1$, де для систем типу В $\delta_c = \frac{\delta_0}{l}$, де δ_0 – деформація попереднього піджаття корегуючого елемента, l – довжина важеля розташованого між корегуючим пружним елементом і опірною поверхнею, для

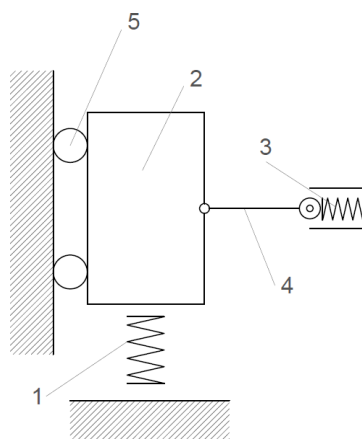


Рисунок 3 – Конструкція ВСКЖ типу В

1 – основний пружний елемент, 2 – об'єкт, що ізолюється від вібрацій, 3 – пружний елемент коректора, 4 – важіль, 5 – коліщатка.

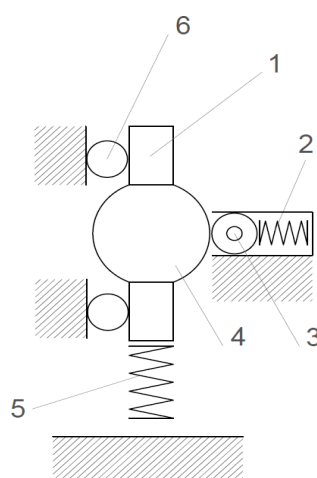


Рисунок 4 – Конструкція ВСКЖ типу С

1 – об'єкт, що ізолюється від вібрацій, 2 – пружний елемент коректора, 3 – ролик коректора, 4 – профільована поверхня, 5 – основний пружний елемент, 6 – коліщатка.

системи типу С $\delta_c = \frac{\delta_0}{r_1+r_2}$, де δ_0 – деформація попереднього піджаття корегуючого елемента, r_1, r_2 – радіуси кривизни котка обкочування коректора і профільованої поверхні відповідно;

- системи типу А завжди нелінійні, а системи типу В і С за умови $\delta_c = 1$ лінійні;

- нульова жорсткість реалізується лише в точці рівноваги ($x = 0$), квазінульова жорсткість реалізується в певному діапазоні переміщень шляхом підбору силових і геометричних характеристик ВСКЖ.

Крім основної задачі віброзахисту при конструюванні розглянутих нижче віброзахисних систем намагалися використовувати контейнерний підхід.

Розглянемо деякі приклади реалізованих конструкцій ВСКЖ, частина з них раніше була розглянута в роботі [5].



1.2. Ресорний віброізолятор з корекцією жорсткості

Майже завжди задача вібро- та ударозахисту в низькочастотному діапазоні вимагає індивідуального підходу через те, що накладаються, крім вимог щодо діапазону частот, додаткові умови: необхідність стабілізації, діапазон амплітуд і температур тощо. В переважній більшості наведених нижче конструкцій намагалися використовувати контейнерний підхід, тобто у якості об'єкта, що підлягає захисту розглядається уніфікований контейнер, всередині якого розміщуються прилади і обладнання.

Залежно від умов експлуатації за такого підходу виникають питання забезпечення підводу ліній комунікації: електричних, пневматичних тощо. Особливо це актуально в низькочастотному спектрі, що обумовлено переважно відносно великими амплітудами переміщень. Для окремих приладів необхідно одночасно забезпечити захист від акустичних навантажень і додержувати належного температурного режиму. В більшості розглянутих конструкцій підведення комунікацій відбувалося по вертикальній осі з нижньої частини контейнера, дроти і кабелі круглої форми виконували витими, плоскі кабелі укладалися «змійкою». Це практично усувало вплив комунікацій на функціонування віброзахисної системи.

Використання в складі корпусів контейнерів спінених матеріалів дозволило певною мірою зменшити акустичне навантаження і підтримувати належний температурний режим.

Наведений нижче ресорний віброізолятор [6] враховує необхідність осьової стабілізації контейнера за відносно невеликих амплітуд коливань (рисунок 5).

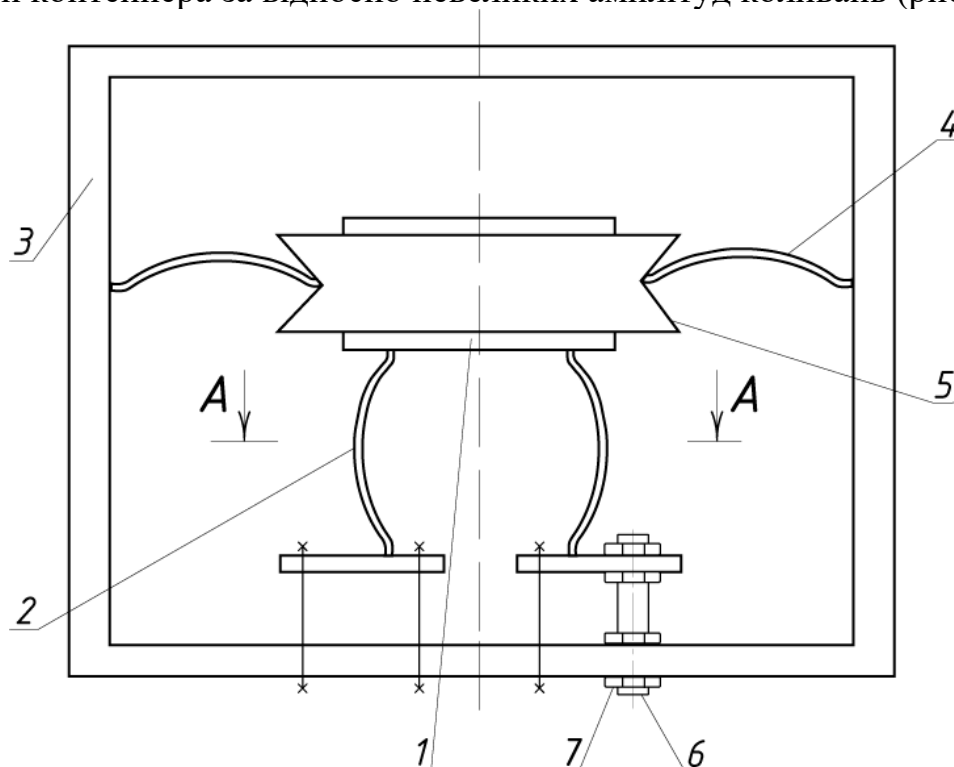


Рисунок 5 – Ресорний віброізолятор

Віброізолятор складається з контейнера 1, ресорних опор 2, підстави 3,



коректора жорсткості у вигляді ресор 4, бандажу 5, регулюючих гвинтів 6, стопорних гайок 7. Об'єкт, який підлягає захисту від вібрацій, жорстко кріпиться всередині контейнера 1. Контейнер опирається на ресорні опори 2. На контейнері симетрично його горизонтальній осі жорстко закріплюється бандаж 3. Вся конструкція розташовується всередині підстави 3. На лінії перпендикуляра до поздовжньої осі контейнера, що проходить через центр знарядженого контейнера, встановлюються піджати пружні елементи коректора жорсткості у вигляді ресор 4. Частина ресори коректора, що знаходиться в контакті з вирізом на бандажі 5 має трикутний профіль і може повертатися у вирізі бандажа відносно точки контакту. Глибина вирізу може у різних бандажів різнитися залежно від необхідного навантаження з боку коректора. Протилежна частина коректора жорстко закріплена на підставі 3. У рівноважному стані сили з боку пружних елементів коректора перпендикулярні до напрямку лінії дії сил опірних ресор, що кріпляться до нижньої частини контейнера. Кріплення ресорних опор до підстави і регулювання виконується регулюючими гвинтами 6 і стопорними гайками 7. У врівноваженому стані сили з боку пружних елементів коректора перпендикулярні до напрямку сил, створених основними пружними елементами, і не впливають на сприйняття ними статичного навантаження знарядженого контейнера. В горизонтальному напрямку пружні сили з боку симетрично розташованих коректорів діють в протилежному напрямку і зрівноважують один одного. При виведенні контейнера внаслідок вібрації з положення рівноваги, пружні сили з боку ресорних пружин коректора будуть діяти в напрямку, протилежному від напрямку сил основного пружного елемента. Можна підібрати таке співвідношення сил з боку основного пружного елемента і пружних елементів коректора, що в заданому діапазоні переміщень сумарна жорсткість системи буде практично дорівнювати нулю, тобто мати квазінульову жорсткість.

З метою забезпечення кутової стабілізації пружні елементи опор і коректора виконані у вигляді плоских ресор, що забезпечує деформацію лише в напрямку подовжньої осі пружного елемента. Прямокутна форма поперечного перерізу виключає можливість будь-якої деформації, крім деформацій відносно осі з найменшим осьовим моментом інерції. Розміри контейнера, характеристики жорсткості пружних елементів опор і коректора визначаються залежно від геометричних і вагових характеристик об'єкта, що захищається від вібрації.

1.3. Поршневий ВСКЖ

У випадку необхідності дотримання жорсткої фіксації поздовжньої осі контейнера з відповідною апаратурою запропоновано поршневу конструкцію віброізолятора з корекцією жорсткості. В наведеному прикладі з метою мінімізації розмірів використано ВСКЖ типу А. Варіації виконання передбачають можливість використовувати сам контейнер у вигляді поршня, або наявність окремих елементів конструкції, що виконують функцію направляючих і демпфера. Саме такий варіант розглянуто нижче [7].



Віброізолятор складається з контейнера 1, циліндричних опор 2, підстави 3, пластин перепуску повітря 4 розташованих знизу і зверху від опор, коректора жорсткості 5, основного пружного елемента 6 (рисунок 6).

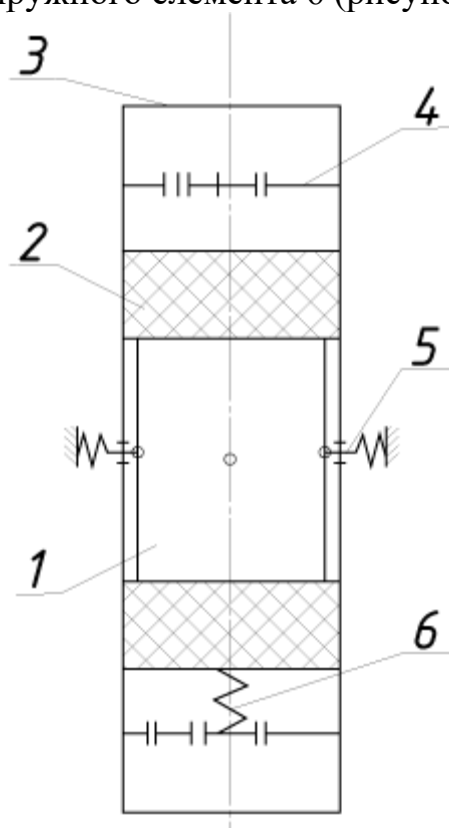


Рисунок 6 – Поршневий ВСКЖ

Об'єкт, який підлягає захисту від вібрацій і ударів жорстко кріпиться всередині контейнера 1. Своїми торцевими частинами контейнер встановлюється з натягом у циліндричні опори 2, які можуть бути виготовлені, наприклад, з фторопласту.

Контейнер з опорами розміщується всередині підстави 3, з установкою фторопластових опор за ходовою посадкою. Характерною особливістю фторопласту є його здатність до легкого знімання поверхневих шарів в процесі відносного руху, тому в процесі коливань на внутрішній поверхні підстави утворюється тонкий шар фторопласту. Отже, пересування фторопластових опор буде аналогічне парі тертя фторопласт-фторопласт, що за своїми показниками відповідає гідравлічному тертю і відпадає необхідність в періодичному змащенні.

Нижня опора 2 кріпиться через основний пружний елемент 6 до нижньої пластини перепуску повітря і сприймає статичну вагу контейнера з об'єктом, що захищається.

На лінії перпендикуляра до поздовжньої осі контейнера, що проходить через центр ваги знарядженого контейнера, встановлюються попередньо піджаті пружні елементи коректора жорсткості 6. Останній конструктивно складається з пружного елемента, що кріпиться до контейнера плоским шарніром. У рівноважному стані пружні сили з боку коректора перпендикулярні до напрямку лінії дії сил пружного елемента, що прикріплений до нижньої опори. При виведенні контейнера внаслідок вібрації з положення рівноваги, пружні сили з



боку пружин коректора будуть діяти в напрямку протилежному від напрямку сил основного пружного елемента.

Можна підібрати таке співвідношення сил з боку основно пружного елемента і пружних елементів коректора, що в заданому діапазоні переміщень сумарна жорсткість системи буде дорівнювати нулю, тобто мати квазінульову жорсткість.

З метою усунення небезпеки значних осьових переміщень шляхом демпфування при ударах і перехідних процесах паралельно торцевим частинам циліндричних опор встановлені пластини перепуску повітря, що конструктивно виглядають як пластина з системою отворів. При коливальних рухах опор, повітря, що міститься між пластинами і опорами, буде проходити через отвори і таким чином енергія коливального руху буде розсіюватися, а амплітуда коливань зменшуватися.

Розміри контейнера, характеристики жорсткості пружних елементів і розміри отворів перепускних пластин визначаються залежно від характеристик об'єкта, що захищається від вібрації. Запропонована конструкція може забезпечувати віброзахист починаючи з 3 Гц.

Характерною конструктивною особливістю цієї конструкції є виконання контейнером разом з циліндричними опорами функції поршня. Таке конструктивне виконання дозволяє не лише спростити конструкцію, але і забезпечити «м'яке» демпфування повітрям завдяки відносно великим розмірам поршня. Можливі варіанти реалізації подібної конструкції без окремих циліндричних опор, але це викличе ускладнення конструкції контейнера.

ВСКЖ в заданому інтервалі переміщень є високоефективними пристроями, але вимагають досить точного налаштування на задане статичне навантаження. Зміна статичного навантаження може привести до розналаштування віброзахисної системи – центр коливань зміщується в область інтервалу переміщень з підвищеною жорсткістю. Для засобів, що рухаються тривалий час з перевантаженнями, або може змінитися статичне навантаження з інших причин необхідно використовувати віброзахисні системи, що допускають переналаштування на різні статичні навантаження. Деякі приклади розрахункових схем таких систем і описи принципу їх дії наведені в роботі [4]. Нижче наведено приклад можливого управління жорсткістю коректора.

Певним недоліком описаного вище поршневого ВСКЖ є неможливість змінювати характеристики коректора жорсткості, а отже і загалом конструкції в процесі роботи. Усунення цього недоліку досягається тим, що пружні елементи коректора шарнірно кріпляться до контейнера через елемент з пам'яттю форми із термоелементом, з можливістю зміни жорсткості коректора під час роботи.

Віброізолятор складається (рисунок 7) з контейнера 1, циліндричних опор 2, підстави 3, основного пружного елемента 4, пластин перепуску повітря 5, коректора жорсткості 6, термоелемента 7, елемента з пам'яттю форми 8 [8].

ВСКЖ працює аналогічно наведеній вище конструкції. В разі необхідності зміни характеристик жорсткості коректора 6 подається напруга на термоелемент 7 елемента з пам'яттю форми 8, що викликає деформацію останнього. Це ніяк не впливає на сприйняття статичного навантаження основним пружним елементом



4, але змінює загальну характеристику жорсткості віброізолятора в околі положення статичної рівноваги.

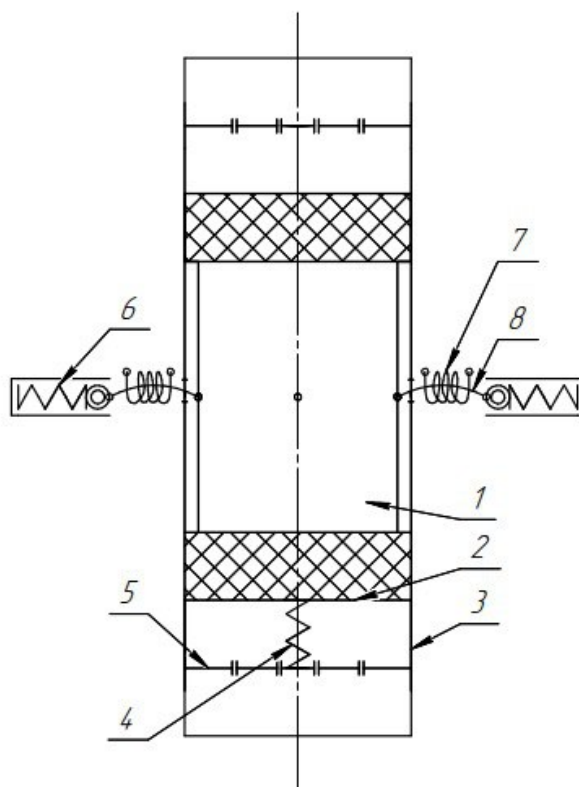


Рисунок 7 – ВСКЖ з елементом з пам'яттю форми

Враховуючи у сучасних матеріалів з пам'яттю форми відносно низьку повторюваність характеристик в елементів з пам'яттю форми така схема доцільна лише в конструкціях з обмеженим ресурсом експлуатації або однократної дії. Але саме ідея використання елементів з пам'яттю форми вбачається плідною. Зрозуміло, що такі елементи будуть використані не в якості пружних елементів, а певних перемикачів на збільшення деформації пружного елемента коректора, а отже і на зміну загальної жорсткості ВСКЖ.

1.4. Віброізолятор квазінульової жорсткості з накладками

Наведена нижче конструкція відноситься до ВСКЖ типу С [9]. Характерною особливістю конструкції є можливість використовувати змінні накладки, що кріпляться до контейнера. Залежно від поставлених задач, шляхом заміни накладок можна реалізовувати віброізолятор як лінійний, так і такий, що має нелінійні характеристики. Наприклад, віброізолятор з лінійними характеристиками може мати більший діапазон квазінульової жорсткості, але буде потребувати більших габаритів і не буде мати «м'яких» силових обмежувачів. Такий підхід підвищує експлуатаційну технологічність конструкції віброізолятора. Крім того, використовуючи різні накладки можна впливати на характеристики коректора жорсткості.

Віброізолятор складається з підстави 1, направляючих 2, основних пружних



елементів 3, контейнера 4, профільованих елементів 5, пружних елементів коректора 6, котків 7, поршня коректора 8, штока 9. Об'єкт, який підлягає захисту від вібрацій і ударів кріпиться всередині контейнера 4 (рисунок 8).

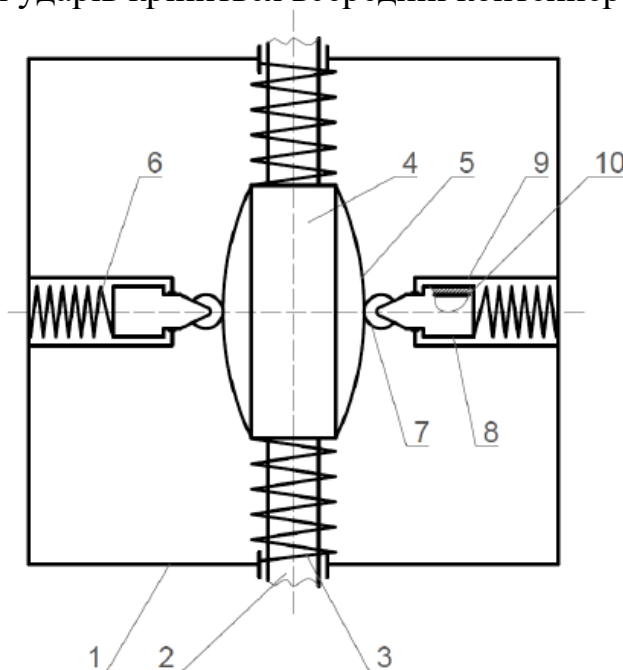


Рисунок 8 – ВСКЖ з накладками

Своїми торцевими частинами контейнер 4 спирається на основний пружний елемент 3, виконаний у вигляді двох послідовно поєднаних пружин, встановлених симетрично торців контейнера. Лінійне переміщення контейнера відносно підстави 1 забезпечується направляючими 2. На боковій поверхні контейнера закріплені знімні профільовані елементи 5. Коректор жорсткості виконано у вигляді симетрично встановлених відносно вертикальної осі симетрії піджатих пружних елементів 6, конструктивно виконаних витими пружинами, які одним торцем спираються на підставу 1, а іншим на поршень 8, що переміщується по штоку 9. Пружна сила від пружини коректора передається на контейнер 4 через профільовані елементи за допомогою котків 7, що мають можливість повертатися відносно профільованих елементів при їх вертикальному переміщенні. Деформація пружин коректора жорсткості 6 регулюється нарізним з'єднанням між поршнем 8 і стійкою котка 7. Віброізолятор працює наступним чином.

В положенні статичної рівноваги контейнер 4 спирається на нижній основний пружний елемент, який внаслідок цього деформується, верхній основний пружний елемент встановлений без люфту між підставою 1 і торцем контейнера 4. Котки 7 знаходяться посередині профільованих елементів 5, а сила з боку пружних елементів коректора 6 через котки діє горизонтально і перпендикулярно напрямку дії сили з боку основного пружного елемента 3.

При виникненні зовнішньої сили збудження виникає зміщення контейнера, наприклад, вгору. З боку основного пружного елемента 3 виникає пружна сила спрямована вниз, а підпружинені елементами коректора 6 котки 7 контактують з профільованими накладками 5 тиснучи на них, внаслідок чого в точці контакту



виникає сила реакції, що містить вертикальну і горизонтальну складові. Враховуючи симетрію установки коректорів, горизонтальні складові лівої і правої частини реакцій однакові за величиною і протилежні за напрямком. Отже, сумарна горизонтальна складова завжди дорівнює нулю. Пружні характеристики основного і пружного елементів та форма профільованих накладок вибираються так, що в заданому діапазоні амплітуд сумарна сила прикладена до контейнера, яка діє по вертикалі, дорівнює нулю.

При перевищенні заданих значень амплітуд коливань контакт між котками 7 і профільованими накладками буде відбуватися на периферійних частинах останніх, які мають відмінний радіус кривизни. В цьому випадку сумарна вертикальна складова має бути спрямована до положення первинної статичної рівноваги. Внаслідок цього контейнер 4 буде повертатися в стан первинної рівноваги. Діапазон квазінульової зони визначається характеристиками жорсткості основного пружного елемента 3, коректора 6, а також формою профільованих накладок 5. В разі виникнення ударних навантажень контейнером з накладками 5 проходить траєкторію з квазінульовими характеристиками до периферійних ділянок накладок, а далі внаслідок збільшення сумарних пружних сил відбувається повернення контейнера в стан рівноваги.

При переміщенні контейнера 4 вниз все відбувається аналогічно, лише змінюються напрямки сил з боку основного пружного елемента 3 і пружного елемента коректора 6. Величина сил демпфування вибирається підбором пар ковзання поршень 8 – шток 9 і направляючі 2 – підстава 1. Розміри контейнера, характеристики жорсткості пружних елементів визначаються залежно від характеристик об'єкта, що захищається від вібрації.

Щодо конструкцій типу С слід зауважити одну відмінність, яка дозволяє реалізувати важливу особливість деяких конструкцій ВСКЖ. Мова йде про можливість реалізовувати квазінульову жорсткість при суттєвій зміні статичного навантаження в процесі експлуатації. Це може бути викликано, наприклад, перевантаженням в процесі польоту, або силою притиску в випадку використання ударного обладнання. В цьому разі виникає значна деформація основного пружного елемента, який сприймає статичне навантаження. Відповідно пересувається разом з основним пружним елементом на ту ж саму величину і профільований елемент. Реалізуються в цьому разі відносно великі деформації. Конструктору можна таким чином зробити профільовані елементи (наприклад, реалізувавши інший радіус кривизни), що коректор жорсткості буде знову забезпечувати сумарну жорсткість конструкції близькою до нуля. Таким чином система переналаштовується на нове статичне навантаження в процесі роботи зі збереженням заданих технічних характеристик.

1.5. Кулачковий ВСКЖ

На рисунку 9 наведено схему ВСКЖ у проміжному положенні, які були використані як опори віброзахисних платформ установлених на судах [10]. Захист забезпечувався від вертикально спрямованих низькочастотних коливань,



нижня границя спектра яких дорівнювала 5 Гц. В складі конструкції віброплатформ використовувалися шість однотипних ВСКЖ, кріплення платформи велось до штока 3.

Виходячи з загальних принципів систем з корекцією жорсткості статичне навантаження сприймає основний пружний елемент 2. В стані статичної рівноваги кулачки 5 розташовуються горизонтально, пружні елементи коректора 4 попередньо стиснуті, лінія дії пружних сил з їх боку перпендикулярна вертикальній осі ізолятора.

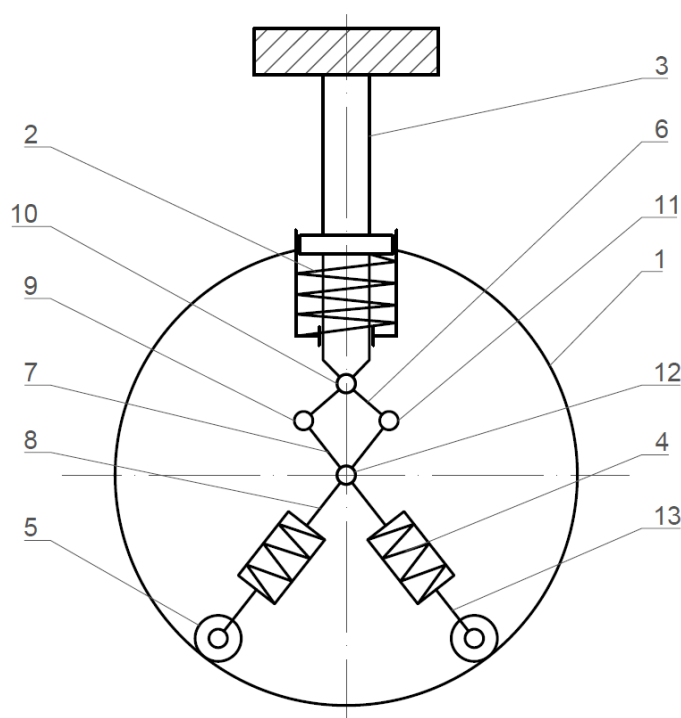


Рисунок 9 – Кулачковий ВСКЖ

На рисунку 10 наведено конструкцію ВСКЖ побудованою за наведеною схемою. Демпфування забезпечується внаслідок тертя між поршнем штока і направляючим циліндром корпусу 1 і при обкочуванні поліуретановими кулачками направляючої поверхні корпусу. Важелі 6, 7, 8 з'єднані між собою плоскими шарнірами 9, 11, 12.

Перевагою конструкції є простота налаштування на задану масу об'єкта, що підлягає захисту. Для цього змінюються лише пружні елементи за незмінності корпусу і інших складових конструкції. Отже, можна говорити про певну уніфікацію віброзахисної системи. Додамо, що наведена конструкція ВСКЖ може бути рекомендована для використання в сейсмічно небезпечних районах, на річкових і морських судах в системах віброзахисту і стаціонарних універсальних низькочастотних віброзахисних системах.

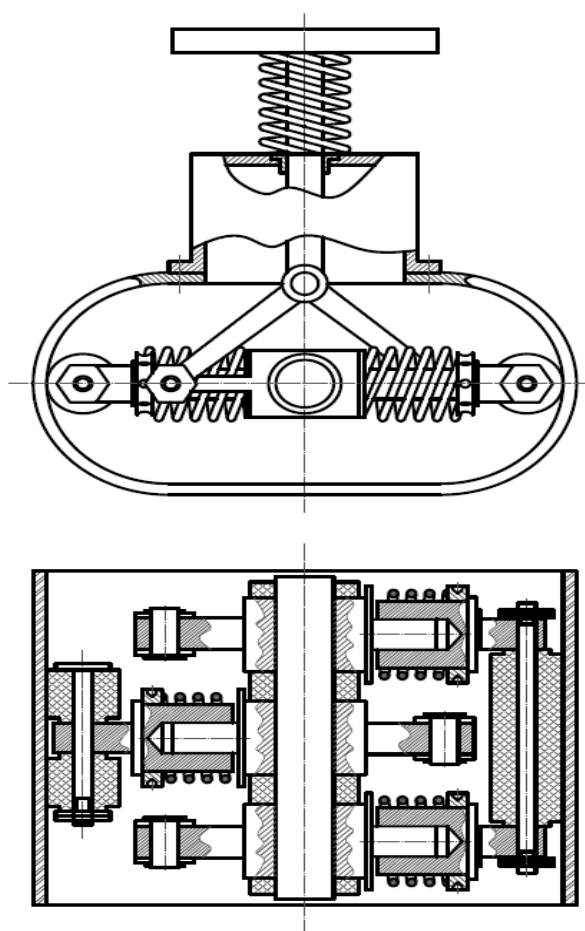


Рисунок 10 – Конструкція кулачкової ВСКЖ

1.6. Пелюстковий віброізолятор

В окремих випадках задача полягає не лише в віброзахисті, але і збереженні орієнтації осі. На рисунку 11 наведено конструкцію віброзахисної системи [11] призначену для віброзахисту лише від бокових вібраційних навантажень, що розташовуються в горизонтальній площині за умови збереження вертикальної осі контейнера, в якому закріплено апаратуру.

Система містить контейнер 6, пружні елементи 1, пружні елементи коректора 8, стержні 5, клини 7. Пружні елементи 1 встановлені між торцевою частиною контейнера 6 і підставою 4. Стержні 5 шарнірно з'єднують протилежний торець контейнера з підставою і шарнірно закріплені на своїх кінцях. Пружні елементи коректора у вигляді пелюсткових пружин попередньо піджаті і впираються в клини. Гвинти 2, гайки 3 і кріпильний замок 9 забезпечують фіксацію складових конструкції.

В положенні статичної рівноваги контейнер з апаратурою розташовується симетрично стосовно вертикальної осі системи. Пружні елементи коректора піджаті, люфт між ними і клином відсутній. При появі збурюючої горизонтальної сили відбувається зміщення контейнера, наприклад, вліво, пружні елементи коректора розташовані з відповідної сторони деформуються і тиснуть на клин.

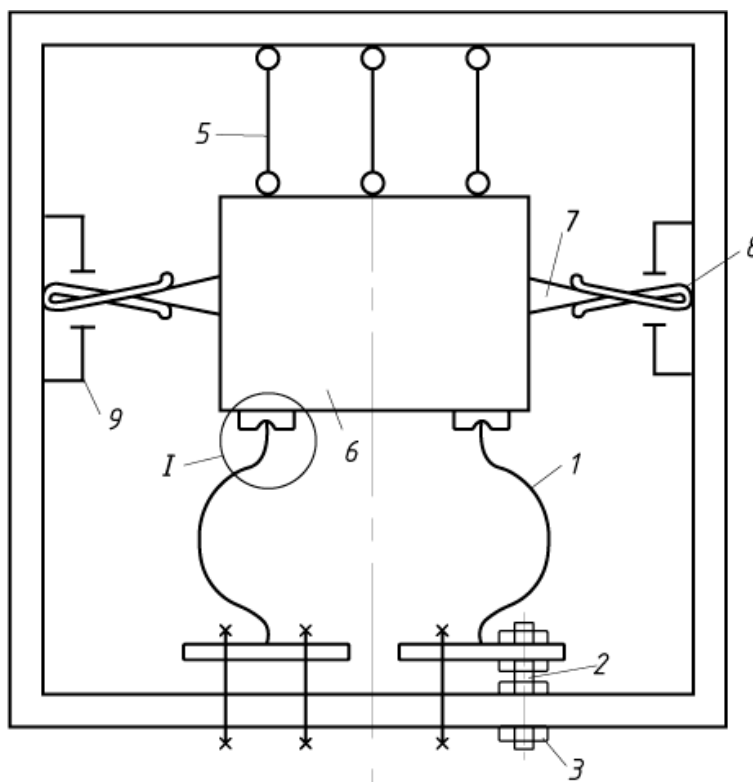


Рисунок 11 – Пелюстковий віброізолятор

Внаслідок цього з'являється пружна корегуюча сила, спрямована до центра. Пружна сила з боку основних пружних елементів, що відхилилися від положення рівноваги будуть діяти в напрямку протилежному від сил коректора. Стержні на шарнірах при цьому будуть забезпечувати плоскопаралельний рух контейнера, тобто забезпечувати кутову стабілізацію апаратури. Певним недоліком конструкції є сухе тертя між пелюстками корегуючих пружин і клином. З метою зменшення недоліків притаманних сухому тертю на дослідному зразку клин виготовлявся з фторопласту.

1.7. Просторовий віброізолятор

Серед конструкцій реалізованих на практиці і запропонованих для захисту від просторових вібраційних навантажень на основі конструкцій ВСКЖ можна навести не так багато прикладів. Одна з таких схем як проєкт наведена на рисунку 12.

Об'єкт, який підлягає захисту від вібрацій і ударів, жорстко кріпиться в контейнері 1. В середині контейнера на лінії вертикальної симетрії встановлюється основна пружина 2, що жорстко зв'язана з контейнером і через направляючі 3 і кулькові опори 4 розміщується між опорними поверхнями у вигляді кулькових сегментів 5, що нерухомо закріплені.

В середині підстави 6 розміщується механізм корекції жорсткості, що складається з симетрично розташованих плоских циліндричних опор 7, які встановлені перпендикулярно до повздовжньої лінії основної пружини і

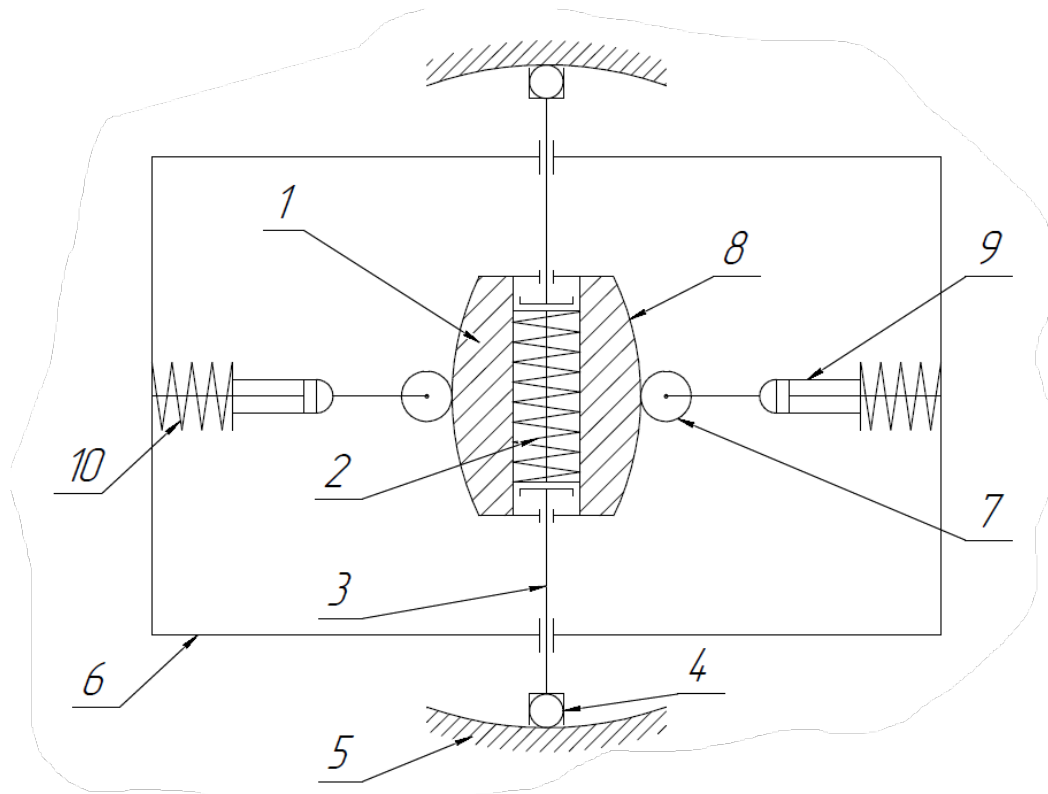


Рисунок 12 – Просторовий віброізолятор

спираються на направляючу поверхню 8. До осі циліндричних опор кріпляться поршневі пари 9, що спираються на піджати корегуючі елементи 10, жорстко закріплені на підставі 6. Циліндричні опори 7 можуть використовуватися в кількості 2, або 4 симетрично установлених відносно вертикальної осі контейнера. В другому варіанті забезпечується краща стабілізація підстави.

Вібраційне збурююче навантаження може містити вертикальну і горизонтальну складову. Відповідно вертикальна складова спрямована вздовж поздовжньої лінії основної пружини, дві горизонтальні осі складають з нею кут 90 градусів.

Розглянемо спочатку випадок дії збурюючих вібраційних навантажень лише у вертикальному напрямку. В цьому випадку віброізолятор працює як раніше відома система з корекцією жорсткості типу С. У рівноважному стані пружні сили з боку корегуючих елементів перпендикулярні до напрямку лінії дії сили основної пружини і не впливають на сприйняття статичного навантаження. При виведенні контейнера внаслідок вертикальної вібрації з положення рівноваги, пружні сили з боку пружин коректора будуть діяти в напрямку протилежному від напрямку сил основної пружини.

Функція поршневих пар полягає в зменшенні амплітуди коливань при резонансі і на частотах близьких до резонансу.

При прикладанні вібраційних навантажень в горизонтальній площині переміщується жорстка система розміщена в підставі 6, яка спирається через кулькові опори 4 на кулькові сегментні опори 5, при цьому опори мають можливість вільно пересуватися в останніх (рисунок 13).

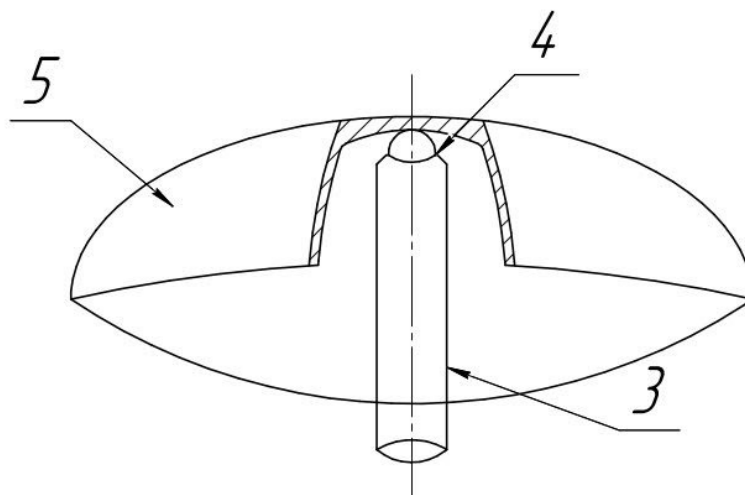


Рисунок 13 – Кріплення в сегментних опорах

Внаслідок попереднього піджаття основної пружини 2, стійке положення відповідає вертикальному розташуванню системи. При зміщенні від первинного положення відбувається додаткова деформація основної пружини, що забезпечує повернення в попереднє положення. Робота коректора жорсткості внаслідок збереження відносного положення циліндричних опор і направляючої поверхні в цьому випадку відсутня. Власна частота коливань, і відповідно нижня границя захисту від горизонтальних вібраційних навантажень, буде залежати від радіуса кривизни сегментних опор і жорсткості основної пружини. З метою усунення загрози впливу коливань вертикальних на горизонтальні і навпаки, власні частоти по вертикальному напрямку і по горизонталі мають бути рознесені не менше ніж в 1,5 раза.

Певним недоліком такої конструкції є зменшення об'єму контейнера внаслідок розташування в його середині основної пружини. В протилежному випадку можливо використання суцільного контейнера з рознесеним пружним елементом, що опирається на торці контейнера зверху і знизу. За своїми характеристиками така конструкція буде аналогічною розглянутій.

1.8. Тросові конструкції

У випадку дії вібрацій одночасно за декількома напрямками задача значно ускладнюється. Хоча відома схема просторової ВСКЖ і надається її теоретичне обґрунтування, але реалізованих конструкцій в промисловості поки немає, принаймні авторам вони невідомі. В практичному використанні в цьому випадку свою нішу мають тросові віброзахисні конструкції. Хоча конструкцій такого типу і відносно небагато, але за варіантами використання тросів в їх складі вони суттєво відрізняються. Трос може виконувати роль підвіски, демпфера, гнучкого вала тощо. Це обумовлено в першу чергу діапазоном збурюючих частот і напрямком дії вібраційного навантаження. Ширше за інші відомі маятникові конструкції для захисту в низькочастотному діапазоні. Але їх суттєвим



недоліком є великі габарити, які можуть досягати величин декілька метрів. Відомий випадок захисту від сейсмічних частот, коли довжина тросів досягала 50 метрів. Виникають в цьому випадки і проблеми з забезпеченням належного демпфування.

На рисунку 14 зображено один з варіантів тросового віброізолятора [12]. В наведеній конструкції і описаних нижче троси використовуються інакше ніж в маятникових. Вони виконують роль направляючих, певною мірою демпферів, стабілізатора положення і ланцюга зв'язку з пружними елементами. Ідея полягає у включенні їх в роботу лише за наявності бічних навантажень довільного напрямку. В разі дії навантажень вздовж вертикальної осі вони виконують роль направляючих і демпферів. Це необхідно з врахуванням того, що в низькочастотному діапазоні пружні елементи мають низьку бічну жорсткість і їм необхідне підкріплення. Використання тросів в такому разі є одним з оптимальних варіантів розв'язання такої задачі.

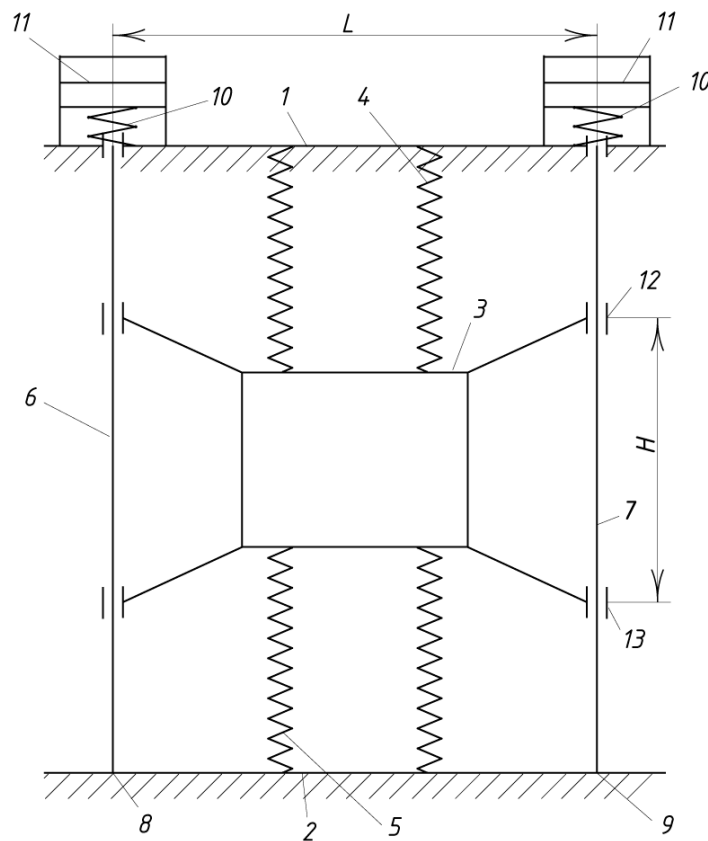


Рисунок 14 – Тросовий просторовий віброізолятор

Контейнер 3 закріплено пружними елементами 4 і 5 до верхньої (1) і нижньої (2) опори підстави. За допомогою направляючих втулок 12 і 13 контейнер з'єднується з тросами 6 і 7. Останні через поршні 11 спираються на пружини 10. Нижні кінці тросів (8, 9) закріплені жорстко до підстави 2. Коли діє навантаження лише в вертикальному напрямку, працюють лише пружні елементи 4 і 5, забезпечуючи задані характеристики віброзахисту. Розсіювання енергії відбувається шляхом тертя між втулками і направляючими тросів. За наявності горизонтальної складової навантаження відбувається деформація тросів, що викликає переміщення поршнів і деформацію пружин, на які вони



спираються. Для забезпечення віброзахисту в вертикальному напрямку в низькочастотному діапазоні (в досліджуваному зразку з частоти > 5 Гц) довжина пружних елементів 4 і 5 має бути відносно контейнера великою.

Для рознесення власних частот коливань в вертикальному напрямку і горизонталі жорсткість пружин 10 вибирається таким чином, щоб частоти були рознесені як мінімум в 1,5 раза. На досліджуваному зразку така різниця складала 5 Гц.

На рисунку 15 наведено одну з модифікацій описаного вище тросового віброізолятора, принцип роботи якого аналогічний попередньо описаному. Відмінність полягає в усуненні дії бокових сил на поршень [13]. Це забезпечує кращі динамічні характеристики пристрою.

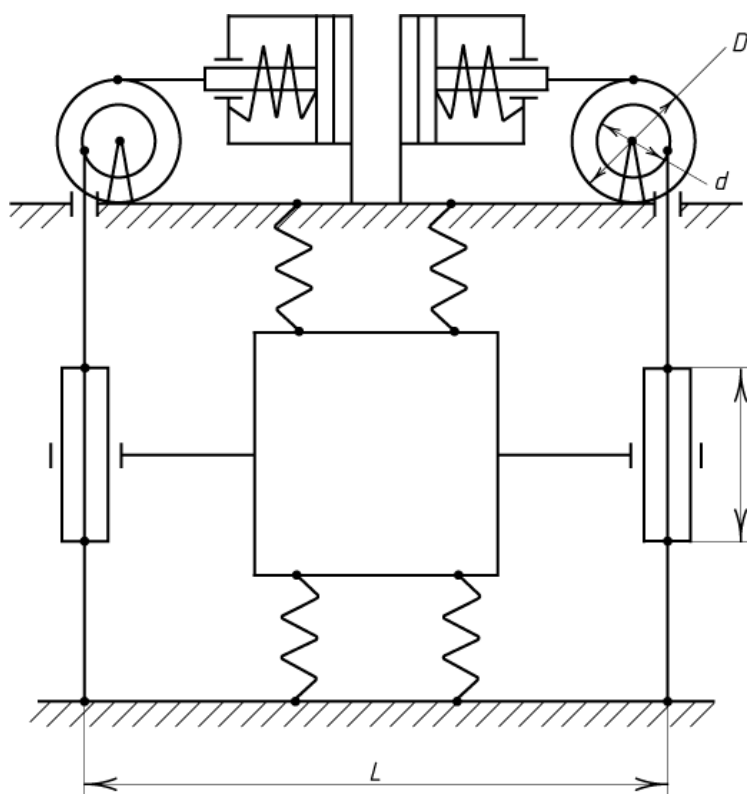


Рисунок 15 – Тросовий віброізолятор

Описані конструкції тросових віброізоляторів були реалізовані для захисту елементів ЕОМ, установлених на морських судах.



Висновки

Задача віброзахисту в низькочастотному спектрі є складною і, частіше за все, має вирішуватися індивідуально для кожного конкретного випадку. Наведені конструкції ВСКЖ і тросових віброзахисних систем показали певні підходи до розв'язання цієї непрості задачі. Крім безпосередньо основної задачі – віброзахисту, зроблена спроба певної уніфікації віброзахисних систем. Для цього використана ідея уніфікованих контейнерів, в яких розташовуються прилади і обладнання, що підлягають віброзахисту. Такий підхід не вимагає внесення додаткових змін в конструкцію об'єкта, що захищається. Більш того, за умови забезпечення необхідних додаткових вимог, наприклад, тепловиділення, акустичного захисту, подібні контейнери можуть мати в своєму складі додаткові засоби вібро- і шумопоглинання. Наприклад, сам корпус контейнера може виготовлятися з конструктивних матеріалів, що мають належні характеристики. Завдяки такому підходу можна здешевити впровадження віброзахисних систем для конкретних задач. В цьому випадку в певному діапазоні мас і об'ємів об'єктів, що підлягають захисту «підгонка» під певну задачу буде полягати в розрахунку пружних елементів і їх деформацій при збереженні решти конструкції. Успішна експлуатація частини з наведених конструкцій довела правильність запропонованих підходів.

Разом з тим слід зазначити, що для ряду виробів більш доцільно використовувати так звані «вбудовані» віброзахисні системи. Тобто такі, які враховані і розраховані на стадії проєктування об'єкта і є складовою їх конструкції. Особливо це стосується конструкцій, що виготовляються відносно великими серіями і наявність вібраційних і ударних навантажень в певному діапазоні є програмованою. Наприклад, ударний інструмент, певні енергетичні установки тощо. Такий підхід дозволяє поруч з забезпеченням належних віброзахисних характеристик досягти оптимізації масогабаритних характеристик. Особливо це важливо для конструкцій, що експлуатуються на транспорті і в аерокосмічній галузі.

Не до кінця оціненим на цей час виглядає і окреме використання в складі конструкцій коректорів жорсткості. Мова в даному разі йде не про віброзахисні системи, а, наприклад, системи керування, корекції тощо.

Слід зазначити, що задача віброзахисту від просторових вібраційних навантажень є значно складнішою і саме за цим напрямком ведуться інженерні пошуки на цей час. Напевно, використання ВСКЖ саме для захисту від просторових навантажень є перспективним. Теоретична ця задача розв'язана, але належного практичного втілення поки не реалізовано. Наведена в роботі схема просторового ВСКЖ є спробою реалізації цього типу віброізоляторів для розв'язання цієї непрості задачі.

Перспективними саме для низькочастотного діапазону виглядають маятникові і тросові конструкції. Особливо з використанням сучасних композиційних матеріалів з характеристиками, що регулюються.