



УДК 62-752

**VIBRATION PROTECTION SYSTEMS WITH STIFFNESS CORRECTION  
ВІБРОЗАХИСТНІ СИСТЕМИ З КОРЕКЦІЄЮ ЖОРСТКОСТІ****Arkhi(y)rov A. (O.)G. / Архипов О.Г.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-6832-2223

**Sukhov V.V. / Сухов В.В.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-4151-605X

**Marinoshenko A.P. / Мариношенко О.П.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-7308-1532

**Kozei Y.S. / Козей Я.С.***c.t.s. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0002-6174-3364

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",**Kyiv, 37 Peremohy Avenue, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», Київ, проспект Перемоги, 37, 03056*

**Анотація.** Значна частина технічних об'єктів, особливо рухомих, працює в умовах дії циклічних і ударних навантажень. Безпека та ресурс їх експлуатації, оптимальне управління рухомими об'єктами вимагають використання захисних пристроїв, завдання яких полягає в зменшенні вібраційних і ударних навантажень, що передаються на системи керування, прилади та електронно-обчислювальні системи. Без відповідного захисту зменшується термін експлуатації технічних об'єктів, або взагалі унеможливорюється їх використання за таких умов. Серед пасивних віброзахисних систем майже не існує зразків, які б ефективно працювали у низькочастотному діапазоні до 10 Гц, а ті що є, наприклад, пневматичні, мають великі габарити. В транспорті, в тому числі авіаційній галузі, часто саме в цьому діапазоні потрібно забезпечити віброзахист для вимірювальних і навігаційних приладів. Віброзахисні системи з квазінульовою жорсткістю є одним з можливих варіантів забезпечення віброзахисту в широкому діапазоні частот, включаючи частоти менше 10 Гц.

**Ключові слова:** віброзахист, квазінульова жорсткість, коректор жорсткості, циклічні навантаження.

**Вступ.**

Захист важливих об'єктів від вібрацій і ударів є необхідною складовою при експлуатації в умовах підвищених вібраційних та ударних навантажень, зокрема в аерокосмічній галузі. Вібро- та ударозахист стосується життєво важливих складових рухомих систем, як наслідок, суть задачі полягає в життєзабезпеченні таких об'єктів. Для частот більше 20 Гц розроблені численні нормалізовані вібро- та ударозахисні системи ізоляції. На низьких частотах, зокрема нижче 10 Гц, використовуються пневматичні системи, але вони великі за габаритами та вимагають періодичного контролю при експлуатації. Значна частина з них чутлива до агресивного середовища та має обмежений температурний діапазон.

Використання пасивних лінійних віброзахисних систем на основі пружних елементів обумовлює в низькочастотному діапазоні навантажень значні габарити, особливо за умови можливих ударних навантажень. Габарити та маса



таких систем можуть бути співставні з відповідними характеристиками об'єктів, що підлягають захисту [1]. Такі умови є недопустимими для транспортних систем, особливо для виробів аерокосмічного комплексу.

Ідеальна віброзахисна система повинна мати нульову жорсткість, проте, в разі перевищення допустимих заданих переміщень, відбувається передача ударів на об'єкти захисту. Технічно оптимальна система повинна мати жорсткість близьку до нульової в заданому діапазоні частот зовнішнього навантаження і амплітуд переміщень, але при наближенні до граничної амплітуди переміщень жорсткість мусить швидко зростати. Отже система повинна бути суттєво нелінійною на границі допустимих амплітуд коливань, а в середині цього діапазону жорсткість має бути близькою до нульової і змінюватися за лінійним законом.

За частот зовнішніх навантажень менше 10 Гц гарно себе зарекомендували віброзахисні системи квазінульової жорсткості, що мають в своєму складі спеціальний коректор жорсткості [2, 3].

Для таких віброзахисних систем характерні наступні переваги: малі габарити та маси; можливість реалізації заданих динамічних характеристик в низькочастотному діапазоні навантажень; широкий температурний діапазон використання; можливість захисту не лише від вібрацій, а і від ударів; простота налаштування на необхідну масу; стійкість до агресивного середовища [4].

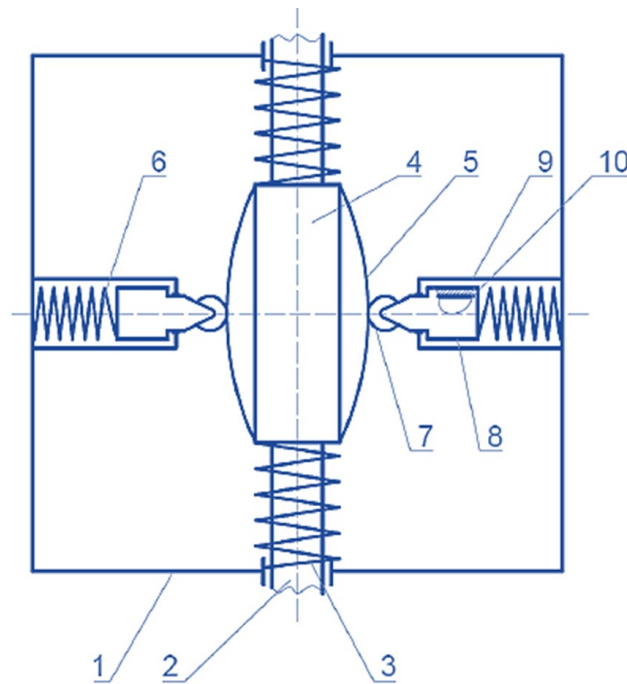
#### **Основний текст.**

В данні роботі розглядаються розроблені авторами конструкції з корекцією жорсткості, до яких крім забезпечення віброзахисту, в тому числі в низькочастотному діапазоні частот, висувалися вимоги мінімізації відхилення від вертикальної осі. В обох розглянутих конструкціях передбачається контейнерне кріплення об'єкта захисту. Така концепція дозволяє універсальне використання конструкції, коли заміна в контейнері за потреби різних блоків (об'єктів захисту), вимагає мінімальних налаштувань віброзахисної системи.

На рисунку 1 наведено конструкцію віброізолятора зі змінними накладками на контейнері.

Об'єкт, який підлягає захисту від вібрацій і ударів кріпиться всередині контейнера 4. Своїми торцевими частинами контейнер 4 спирається на основний пружний елемент 3, виконаний у вигляді двох послідовно з'єднаних пружин, встановлених симетрично торців контейнера. Лінійне переміщення контейнера відносно підстави 1 забезпечується направляючими 2. На боковій поверхні контейнера закріплені змінні профільовані елементи 5.

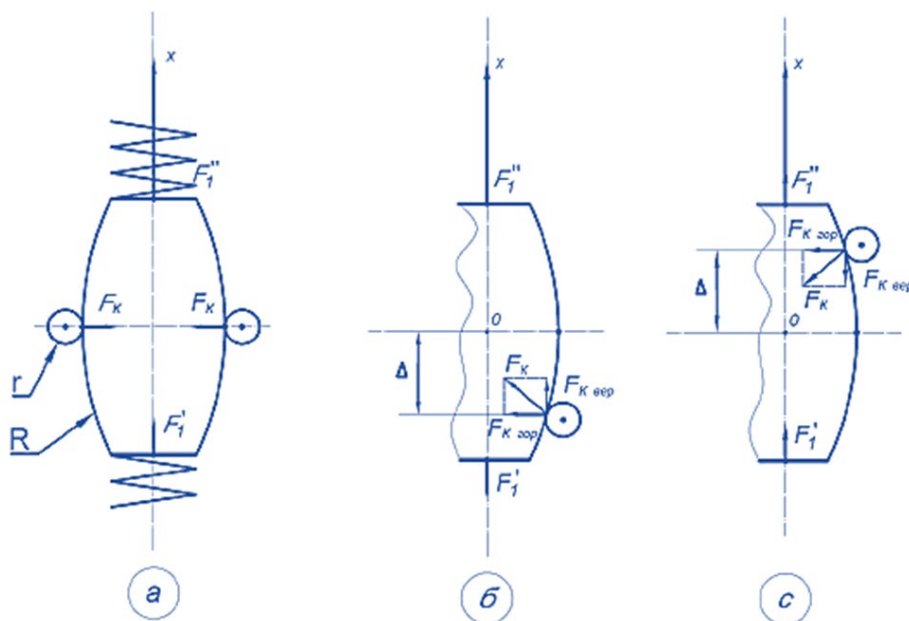
Коректор жорсткості виконано у вигляді симетрично встановлених відносно вертикальної осі стиснутих пружних елементів 6, конструктивно виконаних витими пружинами, які одним торцем спираються на підставу 1, а іншим на поршень 8, що переміщується по штоку 9. Сила від пружини коректора передається на контейнер 4 через профільовані елементи за допомогою котків 7 та регулюючого елемента 10. Деформація пружин коректора жорсткості 6 регулюється нарізним з'єднанням між поршнем 8 і стійкою котка 7. Віброізолятор працює наступним чином (рисунок 2).



**Рисунок 1 - Віброізолятор з корекцією жорсткості:**

1 – підстава, 2 – направляюча, 3 – основний пружний елемент, 4 – контейнер,  
5 – профільовані накладки, 6 – коректори жорсткості, 7 – котки, 8 – поршині  
коректора, 9 – шток, 10 – регулюючий елемент

Авторська розробка



**Рисунок 2 - Розрахункова схема конструкції**

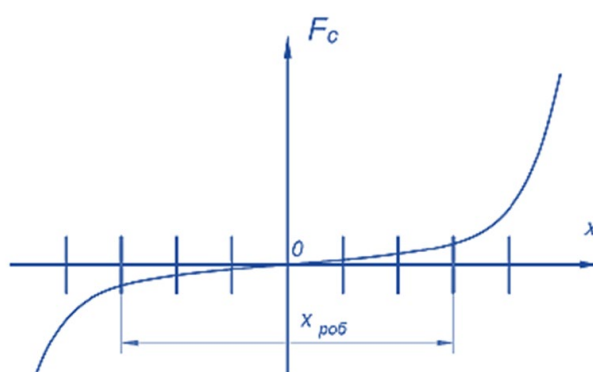
Авторська розробка

В положенні статичної рівноваги контейнер 4 спирається на нижній основний пружний елемент (рис. 2а), який внаслідок цього деформується, верхній основний пружний елемент встановлений без люфта між підставою 1 і торцем контейнера 4. Котки 7 знаходяться посередині профільованих елементів 5, а сила з боку пружних елементів коректора б через котки діє горизонтально і



перпендикулярно напрямку дії сили з боку основного пружного елемента 3.

При виникненні зовнішньої сили збудження здійснюється зміщення контейнера, наприклад, вгору (рис. 2б). З боку основного пружного елемента 3 виникає 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 обираються таким чином, що в заданому діапазоні амплітуд сумарна сила прикладена до контейнера, яка діє по вертикалі, практично дорівнює нулю (рисунок 3).



**Рисунок 3 - Силова характеристика віброізолятора в заданому діапазоні переміщень  $x_{роб}$ .**

*Авторська розробка*

Згідно методиці викладеній в роботі [2] силова характеристика віброзахистної системи з корекцією жорсткості визначається за формулою(1):

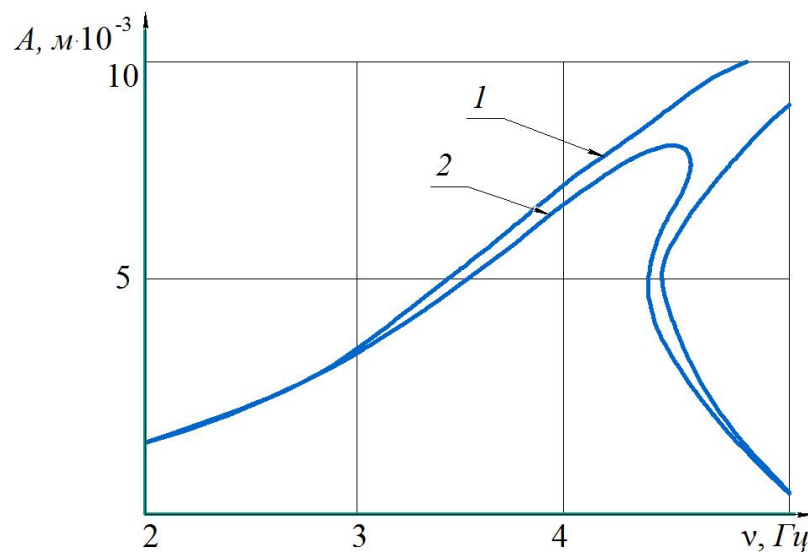
$$F_c = nc_{2c}x_c [(1 - \delta_c)/(1 - x_c^2)^{1/2} - 1] + x_c + \lambda_c, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість ідентичних пружних пристроїв, використаних в коректорі жорсткості;  $c_{2c} = c_2/c_1$  (відношення жорсткості коректора до жорсткості несучого пружного елемента);  $x_c = x/l$ ;  $l = r_1 + r_2$  (радіуси накладки на контейнер і радіус котка відповідно);  $\lambda_c = \lambda/l$ ;  $\lambda$  – деформація несучого пружного елемента.

Слід відзначити, що для віброзахистних систем з корекцією жорсткості типу С, до якого належить наведена вище конструкція ізолятора, силові характеристики можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Але в практичних конструкціях з метою забезпечення захисту від ударів раціонально використовувати системи з нелінійними характеристиками. Це дозволяє не лише оптимізувати лінійну ділянку силової характеристики, так і забезпечити «м'яке» повернення системи в робочий діапазон амплітуд коливань при виході її за розрахункові параметри і попередження явища, відомого як «стук об опори». Але це потребує уважного ставлення до вибору демпфуючих характеристик.



Амплітудно частотні характеристики віброзахистних систем наведеного типу відносяться до жорстких або м'яко-жорстких характеристик (рисунок 4).



**Рисунок 4 - Типова амплітудно-частотна характеристика віброзахистної системи з корекцією жорсткості за кінематичного збудження**

*Авторська розробка*

Для таких систем зарезонансні амплітуди менше ніж в лінійних системах. Але тим не менше, для замикання гілок амплітудно-частотної характеристики в околі резонансу треба уважно підходити до вибору величини демпфування. В наведеній конструкції величина сил демпфування вибирається підбором пар ковзання поршень 8 – шток 9 і направляючі 2 – підстава 1.

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. В разі виникнення ударних навантажень контейнер 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 (рис. 2с).

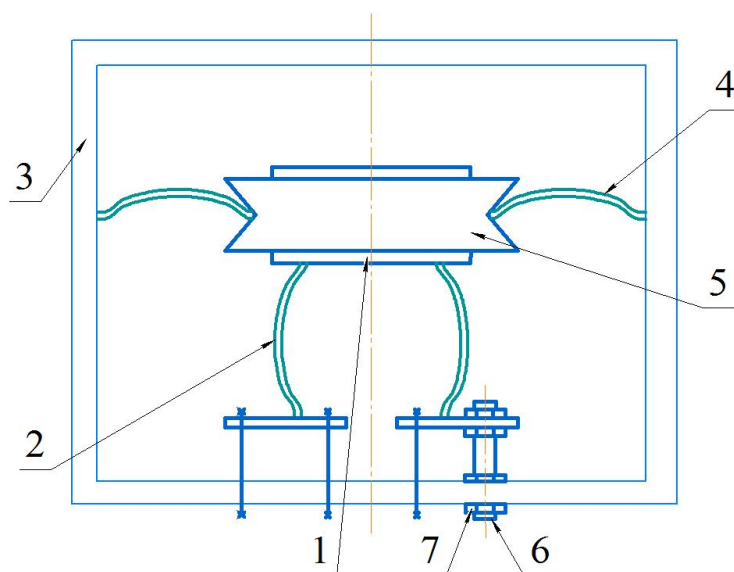
Розміри контейнера, характеристики жорсткості пружних елементів визначаються залежно від характеристик об'єкта, що захищається від вібрації.

На рисунку 5 представлено ресорний віброізолятор з корекцією жорсткості [5]. Використання ресорного типу пружних елементів обумовлено в розглянутій конструкції необхідністю кутової стабілізації без використання спеціальних направляючих.

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 5. Вся



конструкція розташовується всередині підстави 3. На лінії перпендикуляра до поздовжньої осі контейнера, що проходить через центр знятого контейнера, встановлюються стиснуті 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 бандажі відносно точки контакту. Глибина вирізу може у різних бандажів різнитися залежно від величини навантаження з боку коректора. Протилежна частина коректора жорстко закріплена на підставі 4. У рівноважному стані сили з боку пружних елементів коректора перпендикулярні до напрямку лінії дії сил опірних ресор, що кріпляться до нижньої частини контейнера.



### Рисунок 5 - Ресорний віброізолятор з корекцією жорсткості:

1 – контейнер, 2 – ресорна опора, 3 – підстава, 4 – ресорний коректор жорсткості, 5 – бандаж, 6 – регулюючі гвинти, 7 – стопорні гайки

Авторська розробка

Кріплення ресорних опор до підстави і налаштування 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 знятого 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 (див. формулу 1).



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 ресори виключає можливість будь-якої деформацій, крім деформацій відносно осі з найменшим осьовим моментом інерції.

### Висновки.

В роботі були розглянуті конструкції віброзахистних систем з корекцією жорсткості дозволяють вирішити поставлену задачу: забезпечити в рухомих об'єктах вібро- ударозахист приладів і засобів управління в широкому діапазоні частот, в тому числі в низькочастотному. Конструкції ординарні за структурою, мають просте налаштування і не потребують використання в своєму складі дороговартісних, специфічних матеріалів.

### Література:

1. Круглов Ю.Л. Ударовиброзахист машин, обладнання і апаратури./Ю.Л. Круглов, Ю.А. Туманов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 222 с.
2. Виброзахистні системи з квазінульовою жорсткістю. П.М. Алабужев, А.А. Гритчин, Л.И. Ким и др. Под ред. К.М. Рагульскиса. Л.: -Машиностроение, 1986. - 96 с. (Б-ка інженера, Вибр - ная техніка; Вып. 7).
3. Архипов О.Г. Синтез конструкцій віброзахистних систем з корекцією жорсткості і їх динаміки. Вибрації в техніці і технологіях, Всеукраїнський науково-технічний журнал - №1 , 2001. –С. 97-99.
4. Патент України на корисну модель 144624 МКІ F16 F 15/02. Віброізолятор квазінульової жорсткості / О.Г. Архипов, В.В. Сухов, Я.С. Козей, М.Г. Черняк; заяв. 29.05.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.
5. Патент України на корисну модель 145130 МКІ F16F 15/04, F16F 7/14. Ресорний віброізолятор квазінульової жорсткості / О.Г. Архипов, В.В. Сухов, В.А. Бакун, В.Г. Созонтов, В.М. Москалик; заяв. 28.05.2020; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 22.

### References.

1. Kruglov Ju.L. *Udarovibrozhshita mashin, oborudovaniya i apparatury* [Shock and vibration protection of machines, equipment and apparatus]. L., Mashinostroenie., 1986, 222 p.
2. Ragul'skisa K.M. (ed.) *Vibrozhshitnye sistemy s kvazinulevoj zhestkost'ju* [Vibration protection systems with quasi-zero stiffness]. L., Mashinostroenie., 1986, 96 p.
3. Arhipov O.G. Sintez konstrukcij vibrozahisnih sistem z korekcieju zhorstkosti i ih dinamiki [Synthesis of structures of vibration protection systems with stiffness correction and their dynamics], *Vibracii v tehnikе i tehnologijah [Vibrations in engineering and technology]*, 2001, , no. 1, pp. 97—99.
4. Arhipov O.G., Suhov V.V., Kozej Ja.S., Chernjak M.G. Vibroizoljator kvazinul'ovoi zhorstkosti [Vibration isolator of quasi-zero rigidity]. Patent Ukraini no. 144624 (2020).
5. Arhipov O.G., Suhov V.V., Bakun V.A., Sozontov V.G., Moskalik V.M Resornij vibroizoljator kvazinul'ovoi zhorstkosti [Spring vibration isolator of quasi-zero rigidity]. Patent Ukraini no. 145130 (2020).

**Abstract.** Many technical facilities, especially mobile ones, operate under cyclic and shock loads. Safety and service life, optimal control of moving objects require the use of protective devices, the task of which is to reduce vibration and shock loads transmitted to control systems,



devices and electronic computer systems. Without proper protection, the service life of technical facilities is reduced, or their use is not possible at all under such conditions.

Among the passive vibration protection systems, there are almost no models that would work effectively in the low frequency range up to 10 Hz, and those that are, for example, pneumatic, have large dimensions. In transport, including the aviation industry, it is often in this range that vibration protection for measuring and navigation devices needs to be provided. Vibration protection systems with quasi-zero stiffness are one of the possible options for providing vibration protection in a wide range of frequencies, including frequencies less than 10 Hz.

The ideal vibration protection system should have zero rigidity, however, if the permissible specified movements are exceeded, shocks are transmitted to the objects of protection. Technically optimal system should have a stiffness close to zero in a given range of frequencies of external load and displacement amplitudes, but when approaching the maximum displacement amplitude, the stiffness must increase rapidly. Therefore, the system must be significantly nonlinear at the limit of allowable oscillation amplitudes, and in the middle of this range the stiffness must be close to zero and vary according to the linear law.

The constructions of vibration protection systems with stiffness correction were considered in the work. Constructions are ordinary in structure, have simple settings and do not require the use of expensive, specific materials.

**Key words:** vibration protection, quasi-zero stiffness, stiffness corrector, cyclic loads.

Статья отправлена: 14.03.2021 г.