УДК 621.9.04

С.В. Струтинський, канд. техн. наук, здобувач
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ ,Україна

Розробка інерційних демпферів коливань виконавчого органу просторової системи приводів та оцінка ефективності їх застосування шляхом математичного моделювання

Обґрунтована необхідність розробки спеціальних демпферів для підвищення показників динамічної якості просторової системи приводів. Наведено розроблені конструкції інерційних демпферів коливань, їх характерні параметри.

Для оцінки ефективності застосування демпферів проведено математичне моделювання. Розроблена динамічна модель демпфера, який встановлений на виконавчому органі просторової системи приводів. Складені рівняння динамічної рівноваги та знайдена передавальна функція демпфера. Ефективність демпфера визначена його впливом на зміну максимума квадрата модуля частотної передавальної функції системи. Показано, що застосування демпферів зменшує величину максимума в 2…3 рази.

система приводів, демпфер, конструкції, рівняння, передавальна функція, частотна характеристика, ефективність

С.В.Струтинский, канд. техн. наук, соискатель
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев ,Украина

Разработка инерционных демпферов колебаний исполнительного органа пространственной системы приводов и оценка эффективности их применения путем математического моделирования

Обоснована необходимость разработки специальных демпферов для повышения показателей динамического качества пространственной системы приводов. Приведены разработанные конструкции инерционных демпферов колебаний, их характерные параметры.

Для оценки эффективности применения демпферов проведено математическое моделирование. Разработана динамическая модель демпфера, который установлен на исполнительном органе пространственной системы приводов. Составлены уравнения динамического равновесия и найдена передаточная функция демпфера. Эффективность демпфера определена его влиянием на изменение максимума квадрата модуля частотной передаточной функции системы. Показано, что применение демпферов уменьшает величину максимума в 2 ... 3 раза.

система приводов, демпфер, конструкции, уравнения, передаточная функция, частотная характеристика, эффективность

Актуальність досліджень. На основі просторової системи приводів реалізується прогресивне технологічне обладнання. Розроблені металорізальні верстати, промислові роботи, маніпулятори, вимірювальні машини та інші пристрої. Технологічне обладнання характеризується високими швидкостями, знакозмінним рухом робочого органу та значними прискореннями. Тому просторова система приводів має недостатньо плавний рух виконавчого органу. Для збільшення плавності руху і відповідно підвищення показників динамічної якості обладнання актуальним є

© С.В. Струтинський, 2014

застосування спеціальних демпферів коливань.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Підвищення показників динамічної якості просторової системи приводів являє собою складну науково-технічну проблему. Вона включає розробку методів аналізу динамічних коливань процесів, розробку засобів поліпшення динамічних характеристик та створення надійних методик аналізу ефективності запропонованих технічних рішень.

Зв'язок проблеми із важливими науковими і практичними завданнями

Поліпшення динамічних характеристик просторової системи приводів є основою вирішення важливих наукових і практичних завдань створення ефективного технологічного обладнання. Підвищення показників динамічної якості просторової системи приводів дає можливість реалізувати нові прогресивні конструкції технологічного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературних джерелах наявна значна кількість досліджень присвячених розробці та застосуванню просторових систем приводів [1, 2]. Автори розглядають схемні та конструктивні рішення, проблеми забезпечення точності обладнання [3]. Ряд публікацій присвячено дослідженню динамічних процесів у просторових системах приводів [4, 5]. Результатів дослідження по підвищенню показників динамічної якості просторової системи приводів за допомогою спеціальних демпферів коливань у літературних джерелах не виявлено.

Вирішення невирішеної раніше частини загальної проблеми. До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка конструкції демпферів коливань просторової системи приводів та оцінка ефективності демпфера шляхом математичного моделювання. Розглянута науково-технічна проблема є основою досліджень викладених в даній статті.

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є підвищення динамічної якості просторової системи приводів шляхом застосування спеціально розроблених інерційних демпферів коливань. Задачами досліджень є розробка конструкції демпферів та підтвердження ефективності їх роботи шляхом математичного моделювання для підвищення показників динамічної якості просторової системи приводів.

Виклад основного матеріалу досліджень

Запропоновані конструкції демпферів

При русі просторової системи приводів виникають особливі динамічні процеси, що супроводжуються різкими рухами, ударами, наявністю вібрацій виконавчого органу просторової системи приводів. Для підвищення динамічної якості системи запропоновано демпфування коливань виконавчого органу спеціальними інерційними демпферами. Розроблено ряд конструкцій інерційних демпферів коливань просторової системи приводів.

Однією із перспективних конструкцій є демпфер рідинного тертя, який має масивну кулю встановлену у сферичній порожнині заповненій мастилом. Інерційний демпфер даного типу (рис. 1) має корпус 1 в сферичній порожнині якого знаходиться куля 2.

Корпус закрито кришкою 3. Куля встановлена в порожнині корпуса з зазором. Середній радіальний зазор є складає 0,01…0,06 мм. Зазор заповнений мастильною рідиною, що вводиться в порожнину корпуса через отвір, який в подальшому закритий заглушкою 4.

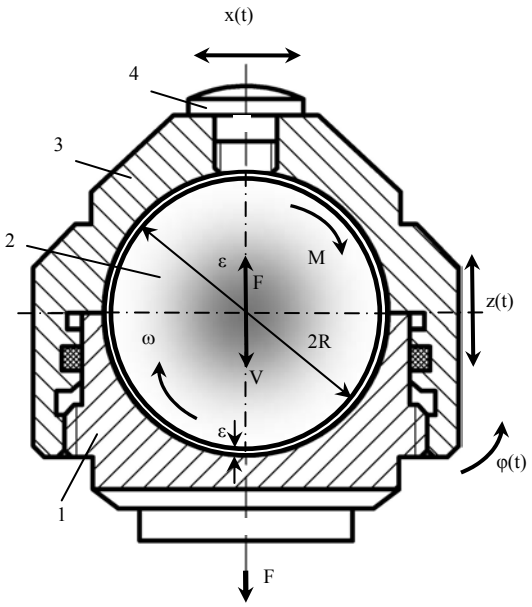


Рисунок 1 – Конструктивна схема інерційного демпфера рідинного тертя

а

б

а – зовнішній вигляд демпфера;
б – деталі демпфера
Рисунок 2 – Дослідний зразок інерційного демпфера рідинного тертя

Внаслідок поступальних переміщень корпуса демпфера z(t) або x(t) виникають інерційні сили F які діють на кулю. Вони обумовлюють її переміщення відносно корпуса. При цьому в шарі мастила, яке знаходиться в зазорі, має місце течія рідини. При течії рідини в малорозмірному зазорі виникають сили в'язкого тертя які забезпечують дисипацію енергії коливань корпуса демпфера.

Поперечно кутові переміщення корпуса демпфера φ обумовлюють відносний поворотний рух кулі відносно корпуса. Внаслідок цього виникає момент тертя M, що забезпечує дисипацію енергії при поперечно-кутових коливаннях корпуса.

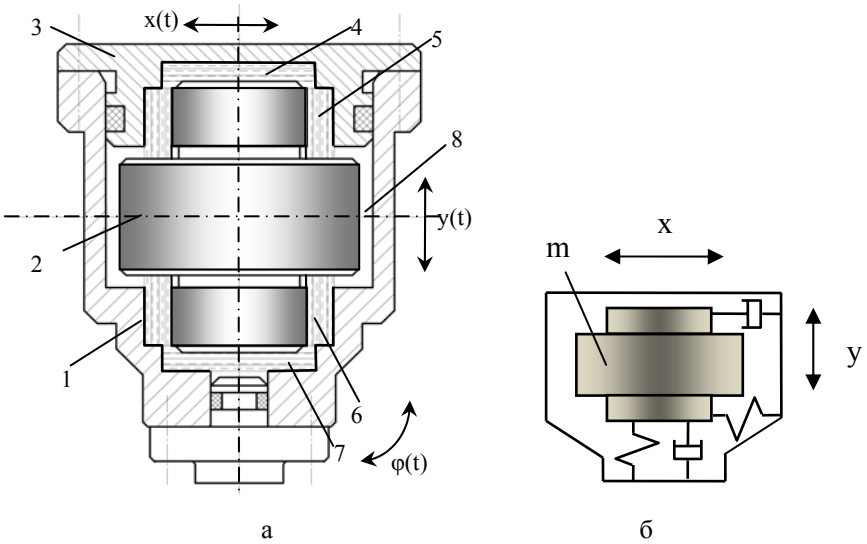
Демпфер рідинного тертя реалізовано в якості дослідного зразка (рис. 2)

Демпфер має металеву кулю відхилення від сферичності якої не перевищує 0,005 мм. Сферична порожнина корпуса виготовлена з використанням спеціально розробленої технології.

Для підвищення ефективності демпфування коливань просторової системи приводів розроблено енергоємний демпфер інерційного типу з пакетними амортизаторами. Демпфер (рис. 3) має корпус 1 в порожнині якого розміщено інерційний елемент 2.

Корпус закрито кришкою 3. В отворах корпуса і кришки встановлені амортизатори 4-7 які мають вигляд пакетів пластин товщиною 0,1 мм, зазори між якими заповнені мастилом. Мастило також знаходиться в герметичній порожнині 8 корпуса 1.

При наявності вібропереміщень корпуса в напрямках x(t) або y(t) інерційний елемент 2 зміщується відносно корпуса. При цьому в пакетах пластин 5, 6 або 4, 7 має місце течія рідини в зазорах між пластинами. Сили в'язкого опору при русі рідини обумовлюють втрати енергії, а відповідно і демпфування коливань корпуса демпфера.



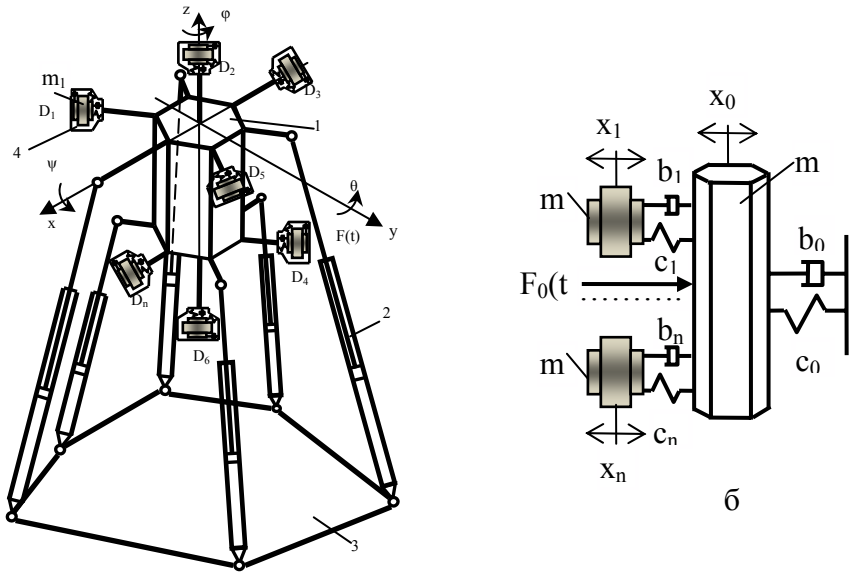
а б

Рисунок 3 – Конструктивна схема інерційного демпфера з пакетними амортизаторами (а) та його динамічна модель (б)

Математичне моделювання ефективності застосування інерційних демпферів

Демпфери встановлюються на виконавчому органі системи приводів.

Система приводів (рис. 4 а) має виконавчий орган 1 і приводи 2 [6]. Розглянемо основні закономірності, що визначають рух, виконавчого органу системи приводів на основі лінійної динамічної моделі (рис. 4 б).



б

Рисунок 4 – Принципова схема просторової системи приводів із розміщеними на виконавчому органі інерційними демпферами коливань (а) та еквівалентна динамічна модель системи приводів з демпферами (б)

Приводи встановлені на нерухомій платформі 3. Виконавчий орган на своїх кронштейнах має інерційні демпфери 4. Інерційні демпфери D_1 – D_n розташовані в характерних точках і забезпечують ефективне демпфування коливань виконавчого органу. Виконавчий орган системи приводів як тверде тіло має шість ступенів

вільності. Це поступальні переміщення виконавчого органу в напрямку вісей x, y, z та поперечно кутові переміщення ψ, θ, φ відносно вказаних вісей.

Демпфування коливань при поступальних переміщеннях виконавчого органу забезпечується всіма демпферами D_1 – D_n. Демпфування коливань при поперечно-кутових переміщеннях здійснюється лише частиною демпферів. Зокрема поперечно-кутові коливання φ які виникають при повороті виконавчого органу навколо вісі z демпфуються всіми інерційними демпферами крім демпферів D_2 , D_6. Вказані демпфери D_2 , D_6 в силу розташування інерційного елемента вздовж вісі z мають низьку ефективність при демпфуванні крутильних коливань виконавчого органу які відбуваються навколо вісі z.

Для визначення ефективності роботи демпферів проведено теоретичні дослідження динамічної системи шляхом аналізу її частотних характеристик. Для дослідження взято парціальну динамічну підсистему поступальних переміщень виконавчого органу в напрямку вісі x.

Рівняння динамічної рівноваги виконавчого органу з демпферами запишемо у вигляді [7]:

$$m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} = F_0 - b_0 \frac{dx_0}{dt} - c_0 x_0 - \sum_{i=1}^{n} F_i \,, \tag{1}$$

де F_0 - збурюючи сила;

m_0 - маса;

x_0 - переміщення;

b_0 - коефіцієнт опору;

c_0 - жорсткість;

F_i - сила взаємодії виконавчого органу з інерційним елементом і-го демпфера. Сила взаємодії визначається пружно-дисипативними характеристиками зв’язку між корпусом демпфера та інерційним елементом і складає:

$$F_i = b_i \left(\frac{dx_0}{dt} - \frac{dx_i}{dt} \right) + c_i \left(x_0 - x_i \right), \tag{2}$$

де b_i , c_i - характеристики пружно-дисипативного зв’язку;

x_i - переміщення інерційного елемента і-го демпфера.

Приведемо рівняння (1) до стандартного виду. Для цього підставимо в рівняння (1) значення сили згідно (2). Після перетворення одержимо:

$$m_0 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \left(b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i \right) \frac{dx_0}{dt} + \left(c_0 + \sum_{i=1}^{n} c_i \right) x_0 = F_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i + \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \,. \tag{3}$$

Введемо коефіцієнти, що характеризують інерційні, дисипативні та деформативні параметри системи:

$$T_0 = \sqrt{\frac{m_0}{c_0 + \sum_{i=1}^{n} c_i}},\ \xi_0 = \frac{b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i}{2\sqrt{m_0\left(c_0 + \sum_{i=1}^{n} c_i\right)}},\ k_0 = \frac{1}{c_0 + \sum_{i=1}^{n} c_i},\ k_{0i} = \frac{c_i}{c_0 + \sum_{i=1}^{n} c_i},\ r_i = \frac{b_i}{c_i}.$$

При цьому рівняння (3) набуде вигляду:

$$T_0^2 \frac{d^2 x_0}{dt^2} + 2\xi_0 T_0^2 \frac{dx_0}{dt} + x_0 = K_0 F_0(t) + \sum_{i=1}^{n} K_{0i}\left(x_i + \tau_{0i}\frac{dx_i}{dt}\right). \quad (4)$$

Перетворимо рівняння (4) по Лапласу при нульових початкових умовах:

$$X_0(S)\left[T_0^2 S^2 + 2\xi_0 T_0 S + 1\right] - \sum_{i=1}^{n} K_{0i}(1 + \tau_{0i} S) X_i(S) = K_0 F_0(S), \quad (5)$$

де $X_0(S)$, $X_i(S)$, $F_0(S)$ - зображення по Лапласу відповідних величин.

Складемо рівняння динаміки для і-тої приєднаної маси:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = b_i\left(\frac{dx_0}{dt} - \frac{dx_i}{dt}\right) + c_i(x_0 + x_i).$$

Після перетворень даного рівняння одержимо:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} + b_i \frac{dx_i}{dt} + c_i x_i = b_i \frac{dx_0}{dt} + c_0 x_0. \quad (6)$$

Введемо позначення коефіцієнтів:

$$T_i = \sqrt{\frac{m_i}{c_i}},\ \xi_i = \frac{b_i}{2\sqrt{m_i \cdot c_i}},\ K_i = \frac{c_0}{c_i},\ \tau_i = \frac{b_i}{c_0}. \quad (7)$$

Із врахування значень констант (7) із (6) одержимо рівняння:

$$T_i^2 \frac{d^2 x_i}{dt^2} + 2\xi_i T_i \frac{dx_i}{dt} + x_i = K_i\left(x_0 + \tau_i \frac{dx_0}{dt}\right).$$

Перетворимо дане рівняння по Лапласу і знайдемо з нього:

$$X_i(S) = \frac{K_i(1 + \tau_i S)}{\left(T_i^2 S^2 + 2\xi_i T_i S + 1\right)} \cdot X_0(S). \quad (8)$$

Підставимо значення $X_i(S)$ з (8) в (5) і одержимо відношення зображень по Лапласу переміщення виконавчого органу системи приводів та діючої на нього сили:

$$\frac{X_0(S)}{F_0(S)} = W_{xF}(S) = K_0 \Big/ \left[\left(T_0^2 S^2 + 2\xi_0 T_0 S + 1\right) - \sum_{i=1}^{n} \frac{K_{0i} \cdot K_i (1 + \tau_{0i} S)(1 + \tau_i S)}{\left(T_i^2 S^2 + 2\xi_i T_i S + 1\right)}\right]. \quad (9)$$

Одержана передавальна функція (9) служить основою для знаходження частотних характеристик [8] переміщення виконавчого органу системи приводів при дії на нього збурюючої сили F_0.

Амплітудно-фазова частотна характеристика $W_{xF}(j\omega)$ одержана підстановкою в (9) $S \to j\omega$, де $j = \sqrt{-1}$. Результати розрахунків типової амплітудно-фазової частотної характеристики системи приводів подано у графічному вигляді (рис. 5).

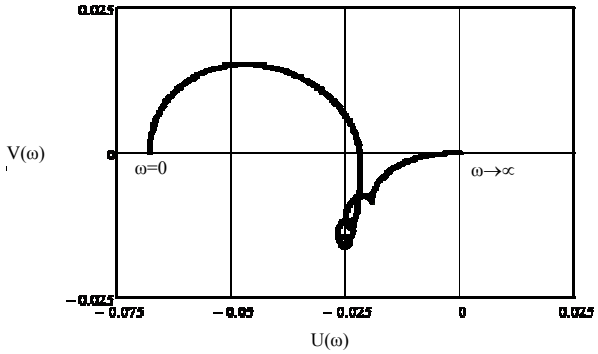


Рисунок 5 – Типова амплітудно-фазова частотна характеристика виконавчого органа системи приводів при вході у вигляді збурюючої сили $F_0(t)$ і виході у вигляді переміщення виконавчого органу $x_0(t)$

Характеристика побудована в координатах:

$$U(\omega) = \mathrm{Re}[W_{xF}(j\omega)], \quad V(\omega) = \mathrm{Im}[W_{xF}(j\omega)]$$

Одержана амплітудно-фазова частотна характеристика є основою для визначення ефективності застосування інерційних демпферів. Ефективність демпферів визначається значенням коливальності системи, що являє собою максимальне значення квадрата модуля амплітудно-фазової частотної характеристики [9]. Виконано порівняння характеристик системи без демпферних пристроїв та системи із демпферами (рис. 6)

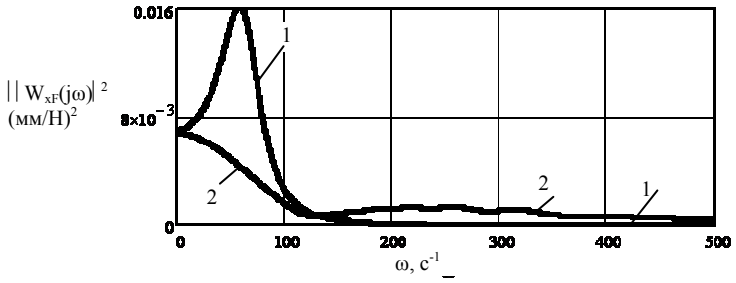


Рисунок 6 – Порівняння квадратів модулів амплітудно-фазових частотних характеристики системи без демпферних пристроїв (крива 1) та системи з демпферами (крива 2, 3)

В результаті визначено максимальні значення характеристик. Як випливає із порівняння характеристик наведених на рисунку, застосування демпферних пристроїв знижує величину локальних максимумів характеристики та зміщує резонанс системи з демпфером у високочастотну область. Загальна дисперсія амплітуд коливань пропорційна інтегралу від вказаних характеристик [10]. Обчислення інтегралів характеристик показало, що наявність демпферів суттєво знижує інтегральні характеристики коливань виконавчого органу системи приводів. Цим підвищуються показники динамічної якості просторової системи приводів.

Висновки:

1. Поліпшення динамічних властивостей просторової системи приводів доцільно здійснити застосувавши спеціальні демпфери, які встановлюються на виконавчому органі системи приводів. Рекомендуються до застосування демпфери, які мають кулю встановлену з зазором відносно корпуса. При цьому зазор заповнено в'язкою рідиною. Раціональними є демпфери, які мають інерційні маси встановлені в корпусах на пружно-дисипатавних елементах у вигляді пакетів пластин із шаром мастила між ними.

2. В результаті математичного моделювання встановлено, що застосування демпферних пристроїв змінює загальну дисперсію коливань виконавчого органу системи приводів в 2 – 3 рази. При цьому резонансна частота коливань виконавчого органу підвищується із 8 … 10 Гц до 30 … 50 Гц при зниженні коливальності в 2…3 рази.

3. Як напрямок подальших досліджень рекомендується оптимізація параметрів інерційних демпферів та вибір раціональних місць їх встановлення на виконавчому органі системи приводів.

Список літератури

1. Рыбак Л.А., Ержуков В.В., Чичварин А.В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 148 с. ISBN978-5-9221-1296-3.
2. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications /J.P. Merlet/ – Berlin: Springer, 2006. – 394 p.
3. Крижанівський В. А., Кузнєцов Ю. М., Валявський І. А., Скляров Р. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. Під ред.. Ю. М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
4. Струтинський С.В., Гуржій А.А. Експериментальне визначення динамічних характеристик та побудова на їх основі математичної моделі просторової системи приводів / Технологічні комплекси. Міжнародний науковий журнал №1 (7)/ ISSN: 2304-4519/ - 2013. – С.10-18.
5. Струтинський С.В. Просторові системи приводів: Монографія / ав. Струтинський С.В., Гуржій А.А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
6. Strutynsky S., Gurzhiy Assessing the impact of transverse vibrations of pneumatic building on the parameters of the spatial vibration field of the drive system/ Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія «Машинобудування» №67 . – Київ, 2013 – С. 101-109
7. Тимошенко С.П, Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
9. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
10. Струтинський В.Б., Колот О.В. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія. – Краматорськ: ЗАТ «Тираж-51», 2005. – 530 с.

Sergey Strutins'kij
The National Technical University of Ukraine, "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Development of inertial dampers spatial fluctuations of the executive body of the drive system and evaluation of its application by mathematical modeling

The aim of the research is to increase the quality of spatial dynamic drive systems through the use of specially designed dampers inertial oscillations.

The necessity of developing special dampers to improve the dynamic performance as a spatial system drives. Shows developed designs inertial dampers fluctuations, their characteristic parameters. To assess the efficacy of dampers mathematical modeling. Developed a dynamic model of the damper that is mounted on the executive body of the space of reasons. Composite dynamic equilibrium equation and found the transfer function of the damper. The efficiency of the damper its influence to change maximum square modulus of the frequency transfer system functions. It is shown that the use of dampers reduces the value of a maximum of 2 ... 3 times.

drive systems, damper, design, equations, transfer function, frequency response, efficiency

Одержано 19.02.14