

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И МАШИНОВЕДЕНИЯ

УДК 62.52

Особенности размещения активных или управляемых элементов в виброзащитных системах

С.В. Белокобыльский^{1, a}, С.В. Елисеев^{2, b}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^arekt@brstu.ru, ^beliseev_inbox.ru

Статья поступила 20.12.2013, принята 15.02.2014

В статье рассматриваются варианты размещения активных элементов в виброзащитных системах (ВЗС) с несколькими степенями свободы. Введение дополнительной связи формирует новые структуры динамического взаимодействия в механической системе, даже при отсутствии управляющего сигнала. В свою очередь, физическая реализация управляющего воздействия связана с необходимостью выбора для управляемого элемента, как минимум, двух точек опоры. Рассмотрены возможности введения активных элементов в систему с одной степенью свободы с учетом возможностей известных принципов управления состоянием. Оценены возможные динамические свойства таких систем. Рассмотрена также виброзащитная система с двумя степенями свободы, в составе которой имеется активный или управляемый элемент. Показано, что построение управляемых или активных ВЗС связано с учетом детализированных представлений о том, как будет расположен активный элемент, формирующий управляющее воздействие. При этом учет особенности места расположения активного элемента вызывает необходимость учитывать появление внутренних конструктивных связей (при сигнале, равном нулю), а также то обстоятельство, что для активного элемента нужны две точки опоры, поскольку приложение силы сопровождается появлением противодействия. Вместе с тем отмечено, что существуют конструктивные решения, в которых упомянутый эффект принимает специфическую форму, например, при инерционном воздействии, а также некоторых других формах управляющих воздействий.

Ключевые слова: виброзащитная система, виброзащитные элементы, расчетная схема, структурная схема, передаточная функция, активные элементы, амплитудно-частотная характеристика, упругое звено, активный элемент.

Installation features of active or controlled elements in vibroprotective systems

S.V. Belokobilyky^{1, a}, S.V. Eliseev^{2, b}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

^arekt@brstu.ru, ^beliseev_inbox.ru

Received 20.12.2013, accepted 15.02.2014

The article deals with installation options in vibroprotective systems with several degrees of freedom of active elements. Introduction of additional connection forms new structures of dynamic interaction in mechanical system, even if a controlling signal is off. In turn, physical realization of controlling influence is connected with the necessity of choosing, at least, two supporting points for controlled element. Possibilities of introduction of active elements to the system with one degree of freedom have also been studied by taking into account opportunities of the principles of state control. Possible dynamic properties of such systems have been assessed. Vibroprotective system with two degrees of freedom with active or controlled element has also been considered. It has been shown that creation of controlled or active vibroprotective systems is connected with detailed ideas of installation of the active element with controlling influence. Thus, installation features of active element causes the necessity to consider internal constructive connections (with zero signal), and the fact that two supporting points are necessary for the active element as force is accompanied by counteraction. At the same time it has been found out that there are constructive decisions in which the mentioned effect takes the specific form, for example, at inertial influence, and also at some other forms of controlling influences.

Keywords: vibroprotective system, vibroprotective elements, analytical model, structural model, transfer function, active elements, it is amplitude-frequency characteristics, elastic linkage, active element.

Введение. В системах с несколькими степенями свободы существует несколько вариантов размещения активных элементов (или устройств), каждый из которых имеет свои особенности. Последнее связано с тем,

что введение дополнительной связи формирует новые структуры динамического взаимодействия в системе, даже при отсутствии управляющего сигнала. В свою очередь, физическая реализация управляющего воздействия связана с необходимостью выбора для управляемого элемента, как минимум, двух точек опоры.

Рассмотрим возможности введения активных элементов в системе с одной степенью свободы (рис. 1) с учетом возможностей известных принципов управления состоянием [1÷4].

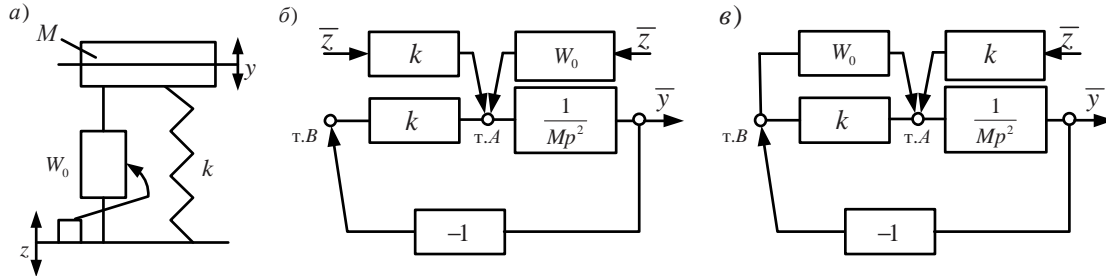


Рис. 1. Расчетная схема ВЗС (а) с активным устройством и соответствующие структурные схемы при управлении по возмущению (б, в)

Передаточная функция виброзащитной системы при кинематическом возмущении и отсутствии активного элемента имеет вид:

$$W_1 = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k}{Mp^2 + k}, \quad (1)$$

а при введении активного элемента с управлением по возмущению соответственно:

$$W_1' = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k + W_0}{Mp^2 + k}. \quad (2)$$

Если W_0 пойдет из точки В в точку А, получим:

$$W_1'' = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k + W_0}{Mp^2 + k + W_0}, \quad (3)$$

то есть, реализуется управление по относительному отклонению. Если точку В перенести на неподвижную базу, то:

$$W_1''' = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k}{Mp^2 + k + W_0}, \quad (4)$$

и мы получим управление по абсолютному отклонению. Таким образом, в системе с одной степенью свободы управление по внешнему возмущению не формируется обычными действиями. Однако если сила, зависящая от z , вводится без точки опоры (например, реактивная струя или вращение инерционного звена и др.), то можно заранее оценить возможные динамические свойства системы. Пусть:

$$W_0 = \frac{a_0 + a_1 p}{b_0 + b_1 p}, \quad (5)$$

что вполне допустимо, учитывая условия отработки низкочастотных вибраций, тогда:

$$W_1' = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} = \frac{k + \frac{a_0 + a_1 p}{b_0 + b_1 p}}{Mp^2 + k} = \frac{p(kb_1 + a_1) + a_0 + kb_0}{Mb_1 p^3 + b_0 Mp^2 + b_1 kp + b_0 k}, \quad (6)$$

где $|W_1'| \rightarrow 0$ при $p \rightarrow \infty$; $|W_1'| \rightarrow \frac{a_0 + kb_0}{b_0 k}$ при $p \rightarrow 0$.

Выражение для амплитудно-частотной характеристики системы в этом случае принимает вид:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{(\alpha_0 + \kappa\beta_0)^2 + \omega^2(\kappa\beta_1 + \alpha_1)^2}}{\sqrt{[\beta_0\kappa - \omega^2 M\beta_0]^2 + \omega^2[\kappa\beta_1 - M\beta_1\omega^2]^2}}. \quad (7)$$

При использовании управляющего воздействия в форме:

$$W_0 = \frac{a_2 p^2}{b_0} \quad (8)$$

получим, что ситуация соответствует введению в систему устройства с преобразованием движения. Дальнейший перебор возможных вариантов можно провести, полагая, что передаточная функция W_0 имеет общий вид,

$$W_0 = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + a_m p^m}, \quad (9)$$

где коэффициенты a_i, b_j зависят от конструктивных параметров систем ($j = 1, \bar{m}, i = 1, \bar{n}$).

При относительном управлении и использовании (8) получим следующую информацию о динамических свойствах ВЗС:

$$W_1' = \frac{k + \frac{a_2}{b_0} p^2}{\left(M + \frac{a_2}{b_0}\right) p^2 + k}; \quad (10)$$

$$\omega_{\cos}^2 = \frac{k}{M + \frac{a_2}{b_0}} = \frac{b_0 k}{Mb_0 + a_2}; \quad (11)$$

$$\omega_{\text{лин}}^2 = \frac{kb_0}{a_2}, \quad (12)$$

при $\omega \rightarrow \infty$ происходит запираение системы на уровне:

$$|W'_1(\infty)| = \frac{a_2}{Mb_0 + a_2}. \quad (13)$$

Семейство амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для таких систем приведено на рис. 2. При управлении по абсолютному отклонению и законе

$W_0 = \frac{a_2}{b_0} p^2$ передаточная функция принимает вид:

$$W = \frac{b_0 k}{(b_0 M + a_2) p^2 + k b_0}, \quad (14)$$

а частоте собственных колебаний соответственно –

$$\omega_{\text{соб}}^2 = \frac{k b_0}{b_0 M + a_2}. \quad (15)$$

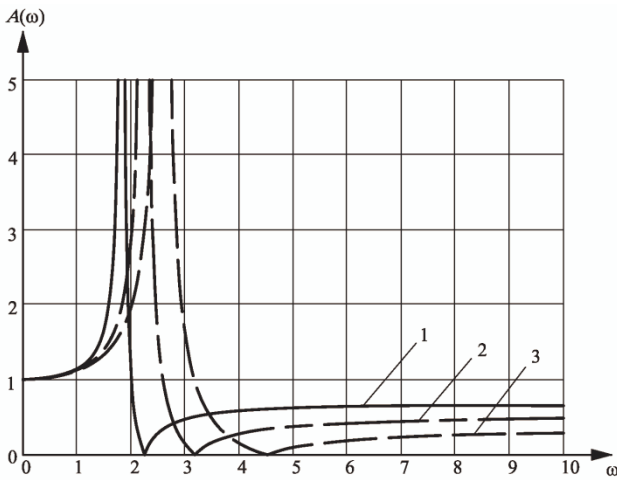


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики системы при условиях: $k = 10, M = 1$; кривая 1 – $\frac{a_2}{b_0} = 2M$; кривая 2 –

$\frac{a_2}{b_0} = M$; кривая 3 – $\frac{a_2}{b_0} = 0,5M$

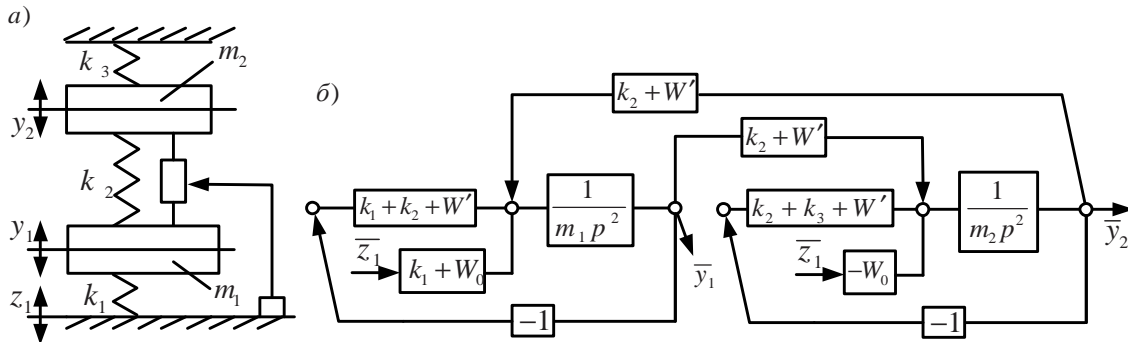


Рис. 3. Расчетная (а) и структурная (б) схемы ВЗС с двумя степенями свободы

На рис. 4 представлены другие варианты расположения активного элемента в ВЗС: на рис. 4 а исполнительное устройство, создающее управляющую силу, размещено между основанием и массой m_2 ; на рис. 4 б активный элемент расположен между массой m_2 и неподвижной (условно неподвижной) базой или корпусом; на рис. 4 в активный элемент размещается между подвижным основанием, как в случае на рис. 4 а, но соединен с массой m_1 .

Условия устойчивости при управлении по абсолютному отклонению на основе критериев Рауса-Гурвица имеют вид:

$$c_0 = b_0 k, c_1 = b_1 k, c_2 = b_0 M, c_3 = M b_1, \quad (16)$$

$$c_0 > 1, c_1 > 0, c_2 > 0, c_3 > 0. \quad (17)$$

Рассмотрим виброзащитную систему с двумя степенями свободы (рис. 3), в составе которой имеется активный или управляемый элемент.

На рис. 3 через W' обозначена передаточная функция внутренней (конструктивной) связи, вносимой активной системой даже при отсутствии сигнала. В данном случае W' вводится между массами m_1 и m_2 . В простейшем случае W' соответствует либо упругому звену, либо звену вязкого сопротивления (дифференцирующее звено первого порядка) или их комбинации. Что касается W_0 , то активная связь должна вводиться так, чтобы выполнялось условие «действие вызывает равное противодействие». Хотя последнее условие может быть рассмотрено и с других позиций. Введение W' и W_0 показано соответствующими цепями на рис. 3 а, б. Запишем передаточные функции ВЗС по координатам y_1 и y_2 при кинематическом воздействии z_1 :

$$W_2 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1} = \frac{(k_1 + W_0)(k_2 + W') - W_0(m_1 p^2 + k_1 + k_2 + W')}{B_0}, \quad (18)$$

$$W_3 = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1} = \frac{(k_1 + W_0)(m_2 p^2 + k_2 + W' + k_3) - W_0(k_2 + W')}{B_0}, \quad (19)$$

где

$$B_0 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2 + W')(m_2 p^2 + k_2 + W' + k_3) - (k_2 + W')^2.$$

Структурная схема эквивалентной САУ приведена на рис. 5, при этом связь по возмущению W_0 выводится на элемент массой m_2 .

Передаточные функции ВЗС в этом случае принимают вид:

$$W_4 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1} = \frac{W_0(m_1 p^2 + k_1 + k_2) + k_1 k_2}{B}, \quad (20)$$

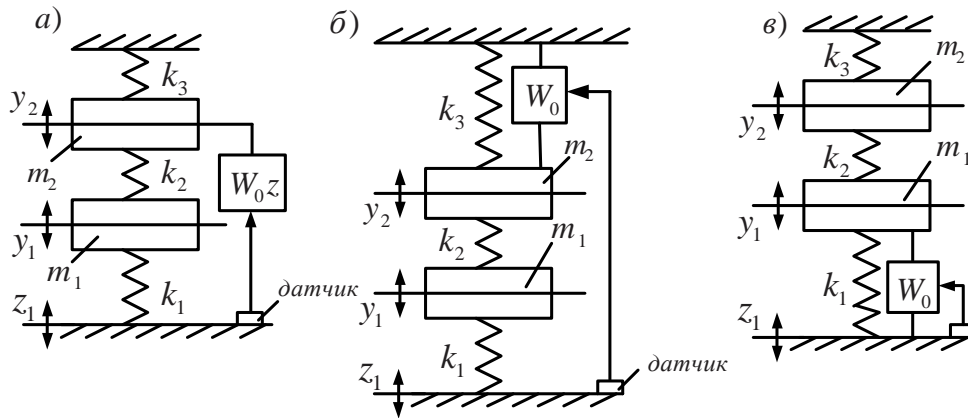


Рис. 4. Расчетные схемы ВЗС с различным расположением активных элементов, реализующих управление по возмущению

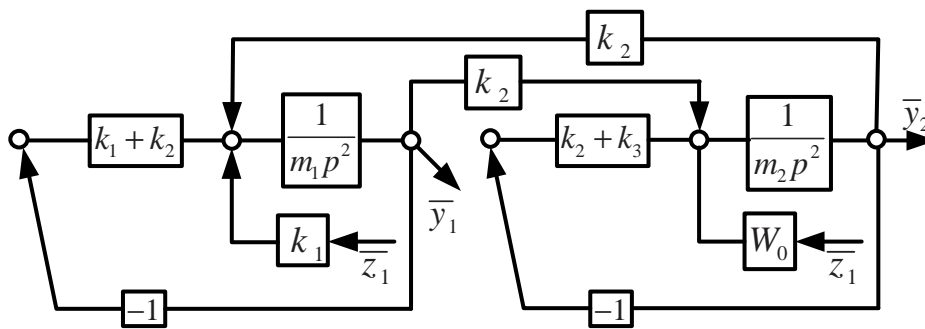


Рис. 5. Структурная схема ВЗС с управлением по возмущению z для случая (рис. 4 а), когда активный элемент присоединяется к массе m_2

$$W_5 = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1} = \frac{W_0 k_2 + (m_1 p^2 + k_2 + k_3) \cdot k_1}{B}, \quad (21)$$

где

$$B = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2. \quad (22)$$

Рассмотрим случай, когда W_0 не опирается на вибрирующее основание (не опирается ни на что, но соответствующая сила создается). В частности, можно предполагать, что такой вариант может быть реализо-

ван некоторым специальным устройством [2÷3]. Пусть один из вариантов введения управления по возмущению z_1 соответствует случаю, когда активный элемент опирается одним концом на неподвижную опору (рис. 4 б), а вторым – на элемент массой m_2 . Будем полагать, что при отсутствии управляющего сигнала внутренняя конструктивная связь будет определяться через W' , как показано на рис. 6.

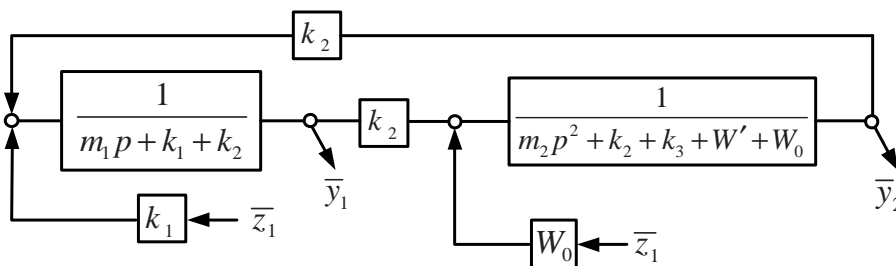


Рис. 6. Структурная схема ВЗС, соответствующая расчетной схеме на рис. 4 б

Передаточные функции ВЗС в этом случае определяются выражениями:

$$W_6 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1} = \frac{k_1 \cdot k_2 + W_0(m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{B_1}, \quad (23)$$

$$W_7 = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1} = \frac{W_0 k_2 (m_2 p^2 + k_2 + k_3 + W' + W_0) k_1}{B_1}, \quad (24)$$

где

$$B_1 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2 + k_3 + W' + W_0) - k_2^2. \quad (25)$$

При размещении активного элемента между подвижным основанием и массой m_1 , но с управляющей силой, влияющей на движение массы m_2 , как показано на рис. 7, передаточные функции принимают другой вид.

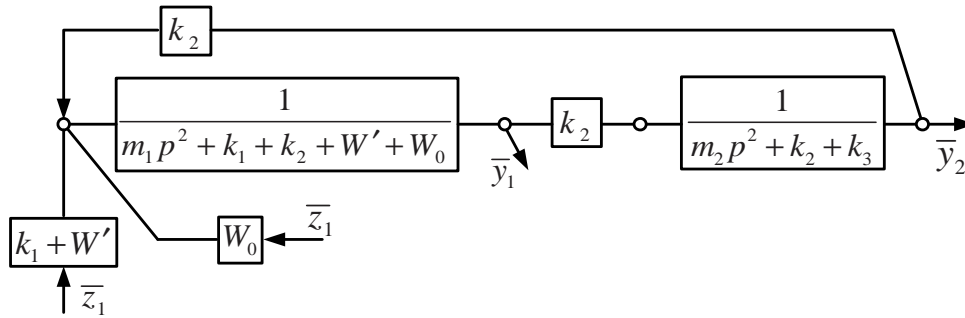


Рис. 7. Структурная схема ВЗС с активным элементом по рис. 4 в

В этом случае можно получить:

$$W_8 = \frac{\bar{y}_2}{\bar{z}_1} = \frac{k_2(k_1 + W' + W_0)}{B_2}, \quad (26)$$

$$W_9 = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1} = \frac{(k_1 + W' + W_0)(m_2 p^2 + k_2 + k_3)}{B_2}, \quad (27)$$

где

$$B_2 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2 + W' + W_0)(m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2. \quad (28)$$

Отметим, что, если активный элемент опирается одним концом на подвижное основание, а второй конец связан с массой m_1 , то W_0 реализует закон управления по относительному отклонению, как это было показано на примере систем с одной степенью свободы.

Выводы

Таким образом, построение управляемых или активных ВЗС связано с учетом детализированных представлений о том, как будет расположен активный элемент, формирующий управляющее воздействие. Если решается абстрактная задача с использованием обычных математических моделей, взятых без конкретной связи с конструктивно-технической схемой, то оценка различий и особенностей в законах управления динамическим состоянием ВЗС будет носить предварительный характер. Если учитывать особенности места расположения активного элемента, то необходимо учитывать появление внутренних конструктивных связей (при сигнале, равном нулю), а также то обстоятельство, что для активного элемента нужны две точки опоры, поскольку приложение силы сопровождается появлением противодействия. Вместе с тем, существуют кон-

структивные решения, в которых упомянутый эффект принимает специфическую форму, например, при инерционном воздействии, а также некоторых других формах управляющих воздействий.

Литература

1. Елисеев С. В., Упырь Р.Ю. Мехатронные подходы в задачах вибрационной защиты машин и оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 4 (20). С.8-16.
2. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
3. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Математическое моделирование в механических колебательных системах. Мехатронные подходы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 3. С.70-78.
4. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем. СПб.: Политехника, 2013. 374 с.
5. Белокобыльский С.В. Динамика систем с сухим трением и ее приложение к задачам горной механики: моногр. 2002. М.: Машиностроение. 209 с.

References

1. Eliseev S.V., Upyr R.Yu. Mechatronic approaches in tasks of vibration protection of machines and equipment // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2008. No. 4 (20). P.8-16.
2. Kolovsky M.Z. Automatic control of vibroprotective systems. M.: Mashinostroenie, 1977. 320 p.
3. Belokobylsky S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Mathematical modelling in mechanical oscillatory systems. Mechatronic approaches // Problemy mashinostroenija i avtomatizacii. 2011. No. 3. P.70-78.
4. Belokobylsky S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Applied tasks of the structural theory of vibroprotective systems. SPb: Politehnika, 2013. 374 p.
5. Belokobylsky S.V. Dynamics of dry friction systems and its application to mining mechanics tasks: monograph, M. 2002. 209 p.