

УДК 684.511

А.И. Годяев, Е.Л. Еремин, Е.А. Шеленок

Имитационная модель системы периодического управления электродинамическим вибростендом

Рассматривается задача управления электродинамическим испытательным вибрационным стендом. Для исследования работы виброустановки строится имитационная модель гибридной системы управления с комбинированным робастно-периодическим регулятором, синтезированным в рамках критерия гиперустойчивости.

Ключевые слова: комбинированный алгоритм, критерий гиперустойчивости, электродинамический вибростенд, имитационное моделирование.

Важным этапом производства конструкций различного назначения являются вибрационные испытания, предназначенные для определения их прочности и долговечности. Для ряда современных отраслей, таких как оборонная и космическая промышленность, железнодорожная и авиационная индустрия, строительство, особую роль играют испытания, при которых исследуемое устройство подвергают воздействию механических колебаний с определенной амплитудой и частотой. Вибрационные испытания важны при построении систем диагностики неисправностей и предотвращения сбоев механических устройств [1–3].

Проводимые ведущими мировыми производителями авиационной, автомобильной и военной техники виброиспытания, как правило, выполняются в лабораторных условиях с использованием специализированного вибростенового оборудования. При этом наиболее широко используются случайные широкополосные, гармонические и ударные профили вибровоздействий или их комбинации [1]. Особенно важными являются виброиспытания с синусоидальным профилем колебаний. Для получения колебаний такой формы в большинстве случаев используются так называемые электродинамические вибрационные установки, преобразующие переменную электродинамическую силу в механические колебания [2, 3]. С помощью таких виброустановок проводятся испытания образцов материалов, деталей, узлов машин и приборов в достаточно широком диапазоне частот. При этом частота колебаний, действующих на исследуемый объект, может быть постоянной или изменяться по определенному закону.

Современные автоматические виброиспытательные системы строятся на базе ЭВМ, что позволяет, во-первых, программно формировать необходимый профиль колебаний и, во-вторых, относительно легко перенастраивать систему в случае изменяющихся требований к параметрам ее функционирования. Для поддержания амплитуды и частоты колебаний вибростендов в большинстве современных систем используются либо типовые ПИ-регуляторы, либо нейро-нечеткое управление [2], что не всегда оказывается эффективным. В силу этого поиск универсальных способов поддержания требуемых параметров колебаний электродинамических виброустановок при изменении внешних условий их работы является весьма актуальной и востребованной задачей.

На основании результатов работ [4–7] в статье рассматривается возможность применения робастно-периодического регулятора в системе управления электродинамической вибрационной установкой с пьезоэлектрическим акселерометром при фиксированной и переключающейся требуемой частоте колебаний стола стенда. Для исследования качества работы системы с использованием прикладного пакета Matlab строится ее компьютерная модель и проводится имитационное моделирование.

Математическая модель вибрационной установки и непрерывные алгоритмы управления

Для построения системы управления с дискретным регулятором (гибридной системы), согласно методу непрерывных моделей, первоначально необходимо синтезировать непрерывные алгоритмы управляющего контура. Поэтому проведем синтез алгоритмов управления в непрерывном виде с использованием типовой схемы критерия гиперустойчивости [4, 5], а затем осуществим переход к их дискретным аналогам [6, 7].

Рассмотрим математическую модель виброустановки. Динамика исследуемого вибрационного стенда, согласно [2], описывается с помощью передаточной функции

$$W_{Oy}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{\alpha}{(m+M)Rs^2 + (CR + \alpha^2)s + KR}, \quad (1)$$

где $\alpha = Bl = \text{const}$; B – магнитная индукция, Тл; l – общая длина проводника, м; M – масса стола и подвижной катушки вибростенда, кг; m – масса закрепленного на столе объекта, кг (является априорно неопределенной); K , C – соответственно коэффициенты жесткости и демпфирования упругих элементов стенда; R – сопротивление питающей цепи, Ом; $u(s)$ – изображение входного сигнала виброустановки (напряжение питающей цепи); $y(s)$ – изображение выходного сигнала объекта управления.

В качестве виброизмерительного преобразователя (вибрационного датчика) будем рассматривать пьезоэлектрический акселерометр, который является универсальным вибродатчиком, генерирующим электрический сигнал, пропорциональный ускорению механических колебаний. Динамика подобного датчика представима с помощью уравнения

$$\hat{y}(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2},$$

с соответствующей передаточной функцией

$$W_{\text{ПД}}(s) = \frac{\hat{y}(s)}{y(s)} = s^2, \quad (2)$$

где $\hat{y}(t)$ – выход пьезоэлектрического датчика.

С учетом (2) обобщенная передаточная функция объекта регулирования (1) примет вид

$$W_{\text{ОУП}}(s) = I \cdot W_{\text{ОУ}}(s) W_{\text{ПД}}(s) = \frac{\hat{y}(s)}{u(s)} = \frac{I \alpha s^2}{(m+M)Rs^2 + (CR + \alpha^2)s + KR}, \quad (3)$$

где I – передаточный коэффициент усилителя мощности системы управления.

Для придания линейной стационарной части системы необходимых свойств, с учетом особенностей рассматриваемого объекта, введем в ее основной контур последовательный динамический корректор с передаточной функцией

$$W_{\text{ДК}}(s) = \frac{\bar{K}(\bar{T}s + 1)}{s^2}, \quad (4)$$

где \bar{K} , $\bar{T} = \text{const} > 0$ – параметры динамического корректора, и перепишем функцию (3) эквивалентно в виде

$$W_{\text{ПОУП}}(s) = W_{\text{ОУП}}(s) \cdot W_{\text{ДК}}(s) = \frac{\bar{K}\bar{T}I\alpha s + \bar{K}I\alpha}{(m+M)Rs^2 + (CR + \alpha^2)s + KR} = \frac{l_2 s + l_1}{a_3 s^2 + a_2 s + a_1}. \quad (5)$$

Регулятор системы определим с помощью выражения

$$u(t) = \zeta [u_{\text{пер}}(t) + u_{\text{роб}}(t)], \quad (6)$$

где ζ – некоторая положительная константа; $u_{\text{роб}}(t)$, $u_{\text{пер}}(t)$ – соответственно робастная и периодическая составляющие регулирующего устройства; требуемое поведение объекта определим с помощью неявного периодического эталона [4]

$$\frac{dx_0(t)}{dt} = \mathbf{A}_0 x_0(t) + b_0 v_*(t), \quad v_*(t) = v_*(t+T), \quad y_0(t) = \mathbf{L}^T x_0(t) = r(t+T), \quad (7)$$

где $x_0(t) \in R^n$ – вектор состояния эталона; $y_0(t) \in R$ – выход эталона; $v_*(t) \in R$ – некоторый неявный периодический сигнал; \mathbf{A}_0 – гурвицева матрица.

Постановка задачи: В условиях априорной неопределенности $\xi \in \Xi$ для системы управления (3)–(6) требуется с помощью неявного периодического эталона (7) определить явный вид алгоритмов комбинированного регулятора (6), обеспечивающих при любых начальных условиях $x(0)$ слежение за командным сигналом $r(t+T)$ с выполнением предельных целевых условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_0(t) - y(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |r(t+T) - y(t)| \leq \delta_0^2 = \text{const} > 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} u_{\text{пер}}(t) = u_{\text{пер}}^*(t) = u_{\text{пер}}(t+T). \quad (8)$$

Следуя результатам [4, 6, 7] с помощью критерия гиперустойчивости можно показать, что выполнение целей (8) достигается за счет синтеза алгоритмов управления регулятора (6) в виде

$$u_{\text{пер}}(t) = u_{\text{пер}}(t-T) + \beta_1 z(t), \quad u_{\text{роб}}(t) = \beta_2 |y(t)| z(t), \quad (9)$$

где $\beta_1, \beta_2, T = \text{const} > 0$; $z(t)$ – сигнал рассогласования.

Гибридная система управления

С помощью метода непрерывных моделей [6, 7] построим гибридную систему управления, состоящую из непрерывной части – объекта управления (1), и дискретной части, включающей в себя:

– цифровой динамический корректор с передаточной функцией

$$W_{\text{ДДК}}(z) = \frac{d_1 z + d_2}{z^2 - 2z + 1}, \quad (10)$$

где z – переменная Z -преобразования Лапласа; d_1, d_2 – коэффициенты передаточной функции, рассчитываемые в зависимости от выбранного шага дискретизации γ ;

– дискретный регулятор

$$u_k = \zeta_k [u_{k\text{пер}} + u_{k\text{пер}}], \quad u_{k\text{пер}} = u_{k-T_{\text{пер}}} + \beta_{k1} z_k, \quad u_{k\text{роб}} = \beta_{k2} |y_k| z_k, \quad (11)$$

где $\zeta_k, \beta_{k1}, \beta_{k2} = \text{const} > 0$.

В итоге получаем дискретно-непрерывную систему управления (1), (10), (11), для которой будут выполняться эквивалентные (8) целевые условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{k0} - y_k| \leq \rho_k = \text{const} > 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} u_{k\text{пер}} = u_{k\text{пер}}^* = u_{k+T_{\text{пер}}}^*$$

Анализ работы системы управления

Для демонстрации работы системы, а также с целью выбора параметров устройства управления (11) и значения шага дискретизации, с помощью имитационной модели, разработанной в среде Simulink математического пакета Matlab, выполним имитационное моделирование построенной гибридной системы (1), (10), (11). Вычислительный эксперимент будем проводить в два этапа: на первом этапе рассмотрим управление виброустановкой при фиксированной частоте колебаний ее стола; на втором этапе промоделируем систему при переключении частоты через равные промежутки времени (двухчастотный командный сигнал).

Постоянные параметры математической модели (1) примем со значениями, аналогичными [2]:

- масса подвижной части $M = 0,217$ кг;
- коэффициент демпфирования упругих элементов $C = 4,42$ Нс/м;
- коэффициент жесткости упругих элементов $K = 13482,96$ Н/м;
- сопротивление неподвижной (питающей) катушки $R = 2,92$ Ом;
- коэффициент передачи усилителя мощности $I = 4$;
- постоянная силы возбуждения $\alpha = 10,8$ Н/А.

Эксперимент 1: Фиксированная частота колебаний (одночастотный командный сигнал). В качестве задающего воздействия будем использовать синусоидальную функцию $r(t+T) = \sin \omega t$, определяющую требуемый профиль ускорения колебаний стола виброустановки с амплитудой A и частотой ω , равной 50 и 100 Гц соответственно.

В ходе имитационного моделирования при требуемой фиксированной частоте параметры дискретного комбинированного робастного регулятора (11) при шаге дискретизации $\gamma = 0,0015$ были выбраны со значениями: $\zeta_k = 5; \beta_{k1} = 15; \beta_{k2} = 2; T = 0,2$. Коэффициенты цифрового корректора (10) при выбранном шаге дискретизации и параметрах непрерывного корректора $\bar{K} = 5,8, \bar{T} = 5,6$ приняли вид: $d_1 = 0,05; d_2 = -0,049$.

Результаты вычислительного эксперимента при массе объекта виброиспытаний равной $m = 0,2$ кг, представлены на рис. 1, где также приведены динамические процессы системы с типовым ПИ-регулятором, коэффициенты которого равны $K_{\text{П}} = 15; K_{\text{И}} = 50$.

Эксперимент 2: Переключающаяся частота колебаний (двухчастотный командный сигнал). Для описания задающего воздействия будем использовать синусоидальную функцию, в которой значение частоты будем изменять от 50 до 100 Гц и наоборот каждые 0,2 с. Параметры дискретного контура управления и числовые коэффициенты цифрового последовательного динамического корректора совпадают с представленными выше числовыми значениями. Результаты имитационного моделирования системы управления представлены в соответствии с рис. 2.

Анализируя представленные характеристики, можно заключить, что применение комбинированного робастного регулятора (11) позволяет обеспечить высокое качество слежения за командным сигналом в построенной системе управления.

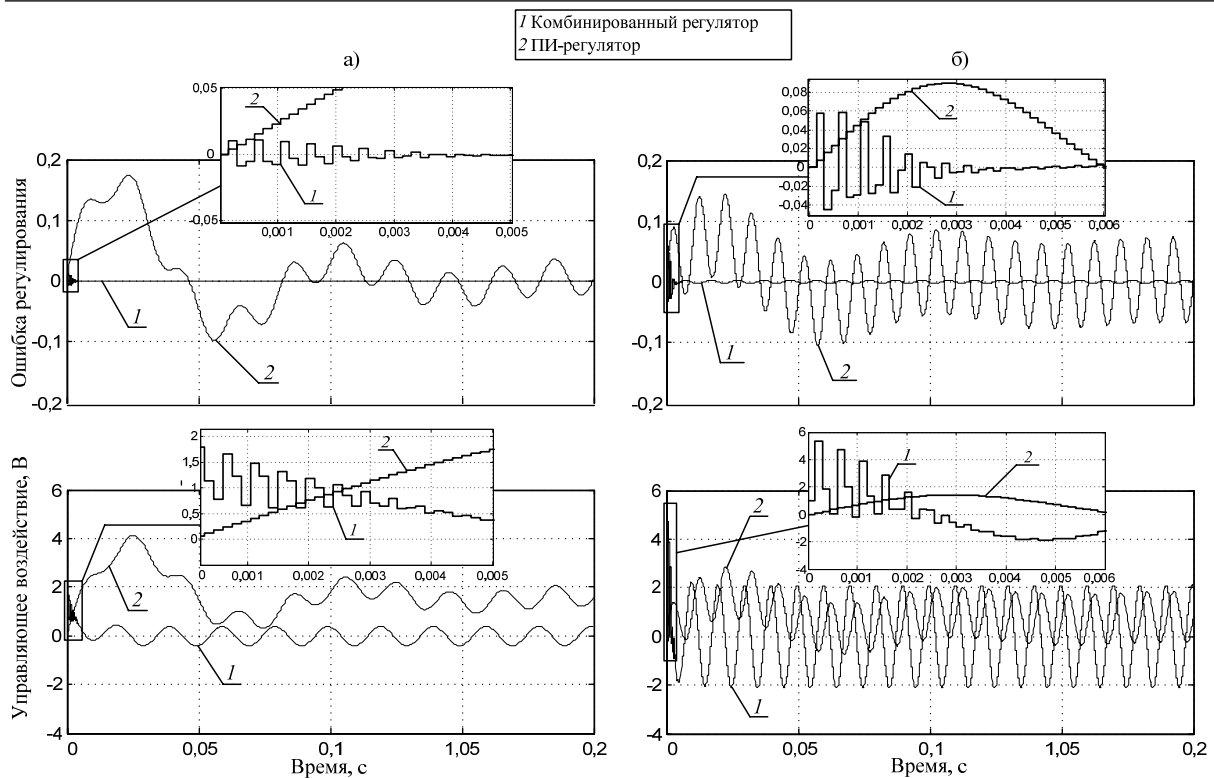


Рис. 1. Динамические характеристики системы управления вибростендом с комбинированным робастным и ПИ-регуляторами при одночастотном профиле колебаний 50 Гц (а), 100 Гц (б)

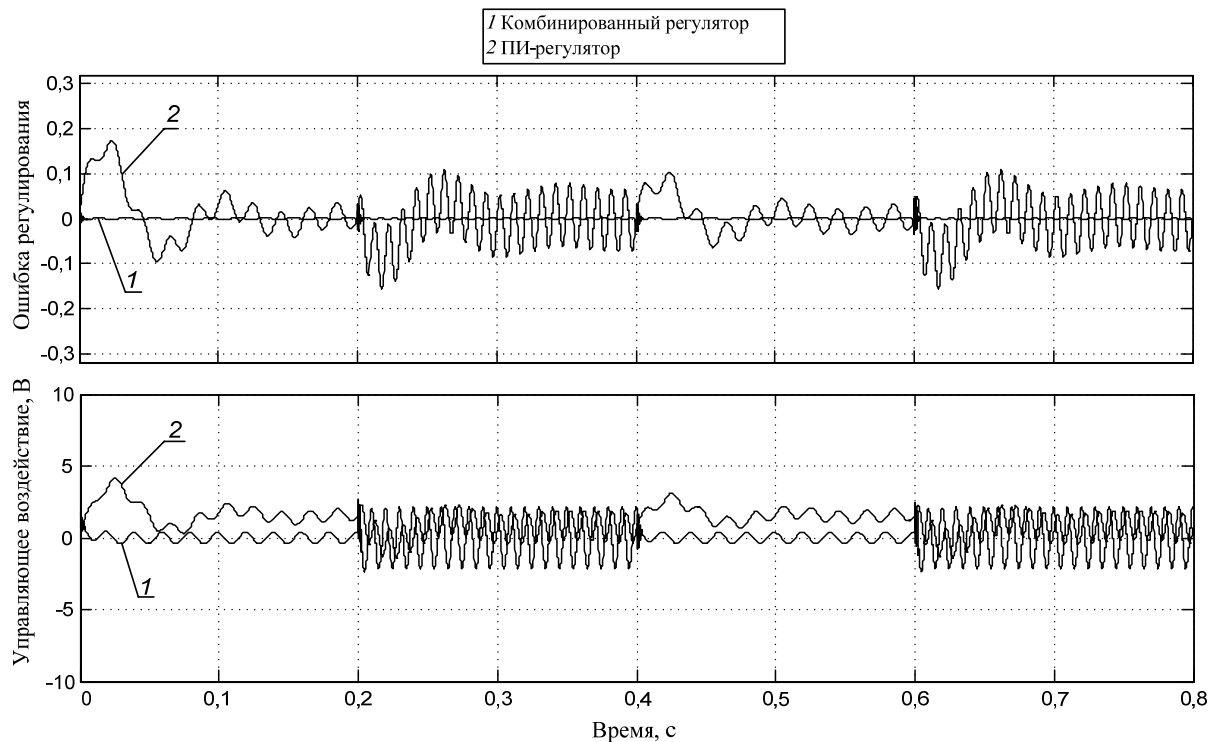


Рис. 2. Динамические характеристики системы управления вибростендом с комбинированным робастным и ПИ-регуляторами при двухчастотном командном сигнале (50 и 100 Гц)

Также с помощью вычислительного эксперимента установлено, что в случае увеличения массы m объекта, закрепленного на столе стэнда, использование ПИ-регулятора позволяет сохранить достаточно хорошее качество управляющего сигнала, однако величина ошибки регулирования увеличивается пропорционально росту массы объекта виброиспытаний, что влечет за собой необходимость перенастройки параметров регулятора. Использование в схожей ситуации предложенного

комбинированного контура управления (11) позволяет обеспечить сохранение пренебрежительно малой величины ошибки регулирования и качественного управляющего сигнала при неизменных числовых коэффициентах β_1 , β_2 и T .

Заключение

Рассмотрена задача управления электродинамическим испытательным вибрационным стендом, при решении которой с помощью критерия гиперустойчивости и метода непрерывных моделей построена дискретно-непрерывная система регулирования режимами работы рассматриваемой установки. С помощью разработанной имитационной модели предложенной системы управления проведены вычислительные эксперименты, результаты которых свидетельствуют о преимуществе использования робастно-периодического регулятора в сравнении с классическим пропорционально-интегральным управлением.

Литература

1. Горбунов А.А. Математическое моделирование и исследование частотно-управляемого асинхронного вибрационного электропривода: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск: УлГУ, 2008. – 21 с.
2. Rana K.P.S. Fuzzy control of an electrodynamic shaker for automotive and aerospace vibration testing // Expert Systems with Applications. Vol. 38, Issue 9, P. 11335–11346 (September 2011) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09574174/38/9>, платный (дата обращения: 01.10.11).
3. Uchiyama Y. Robust Control of Electrodynamic shaker with 2dof control using H_∞ filter / Y. Uchiyama, M. Mukai, M. Fujita // Journal of Sound and Vibration. – 2009. – № 326. – P. 75–87.
4. Еремин Е.Л. Комбинированные алгоритмы системы робастно-периодического управления нелинейным объектом с запаздыванием / Е.Л. Еремин, Д.А. Теличенко, Е.А. Шеленок // Информатика и системы управления. – 2009. – № 3(21). – С. 125–135.
5. Еремин Е.Л. Нелинейное робастное управление нестационарными объектами / Е.Л. Еремин, Т.А. Галаган, Н.П. Семичевская. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006. – 185 с.
6. Еремин Е.Л. Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах / Е.Л. Еремин, Б.Н. Леянов, Е.А. Шеленок // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 1(16). – С. 45–54.
7. Шеленок Е.А. Гибридная система управления нелинейным скалярным объектом в циклических режимах // Информатика и системы управления. – 2010. – № 3(25). – С. 147–156.

Годяев Александр Иванович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. автоматики и телемеханики
Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск
Тел.: 8 (4212) 40-75-09
Эл. почта: zav_at@festu.khv.ru

Еремин Евгений Леонидович

Д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и информатизации
Тихоокеанского государственного университета
Тел.: 8 (4212) 22-44-19
Эл. почта: ereminel@mail.ru

Шеленок Евгений Анатольевич

Канд. техн. наук, преподаватель каф. автоматики и системотехники
Тихоокеанского государственного университета
Тел.: 8 (4212) 76-17-23
Эл. почта: cidorshell@rambler.ru

Godyaev A.I., Eremin E.L., Shelenok E.A.

Simulation model of periodic control system for electrodynamic shaker

A problem of testing vibration shaker for strength metal structure research control is shown. For research facility effort it is construct simulation model of hybrid control system with combined robust-periodical regulator synthesized within hyperstability criterion.

Keywords: combined algorithm, hyperstability criterion, electrodynamic shaker, simulation test.