УДК 531

АВТОНОМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Е. Иванов[a], Г.И. Мельников[a]

[a] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, sivanov@mail.ifmo.ru

Математической моделью многих механических систем является система динамических уравнений полиномиальной структуры с периодическими или постоянными параметрами. Такие механические системы широко применяют в динамике виброзащиты приборов и устройств. Исследование нелинейных систем с конечным числом степеней свободы представляет сложную актуальную проблему по сравнению с линейными системами. Исследование нелинейных систем не сводится к определению конечного числа частных решений, поскольку нелинейные системы не обладают свойством суперпозиции решений. Рассматривается математическая модель нелинейной динамической системы с тремя степенями свободы, которая содержит многочлены до четвертой степени от фазовых переменных. Для исследования данной модели представлены алгоритмические формулы метода автономизации нелинейных динамических систем. Нелинейная математическая модель динамической системы преобразуется к автономной форме, и определяются главные параметры динамической системы. Представлен алгоритм метода автономизации для исследования виброзащитной нелинейной системы с тремя степенями свободы. При решении задач виброзащиты широко применяются линейные системы, хотя линейность функций недостаточно точно аппроксимирует характеристики системы, внося погрешности при анализе. В работе решена задача получения и исследования более точной нелинейной модели виброзащитной системы. Рассмотрена нелинейная виброзащитная система с тремя степенями свободы с нелинейными правыми частями в виде многочлена третьей степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Система состоит из объекта виброзащиты, установленного на две платформы, находящиеся одна под другой, нижняя из которых поставлена на вибрирующее основание. Внешнее гармоническое возмущение воздействует на основание. Предполагается, что упругие элементы системы описываются многочленами третьей степени, демпфирующие элементы имеют нелинейную кубическую характеристику. В результате применения метода нелинейная система преобразуется к более простому автономному виду, и существенно сокращается количество параметров нелинейной динамической системы без ухудшения качества решения. Применение метода существенно упрощает исследование переходных и установившихся процессов нелинейных динамических систем.

Решаемая задача исследования виброзащитной системы в нелинейной постановке является новой, имеет теоретическое и практическое значение.

Ключевые слова: автономизация нелинейных систем, методы исследования, нелинейные системы с тремя степенями свободы.

OFF-LINE INTERACTION OF THE NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS

S. Ivanov[b], G. Melnikov[b]

[b] Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, sivanov@mail.ifmo.ru

Mathematical model of many mechanical systems is the system of dynamic equations with polynomial structure and periodic or constant parameters. Such mechanical systems are widely applied in the dynamics of a vibration guard of devices. Research of nonlinear systems with a finite number of freedom degrees represents a complicated actual problem in comparison with linear systems. Research of nonlinear systems does not come to definition of a finite number of private solutions because nonlinear systems do not possess superposition property of solutions. Mathematical model of nonlinear dynamic system with three degrees of freedom which contains polynomials to the fourth degree from phase variables is considered. Algorithmic formulas of an off-line interaction method of nonlinear dynamic systems are presented for the given model research. The nonlinear mathematical model of dynamic system is transformed to the autonomous form, and principal parameters of dynamic system are defined. The algorithm of an off-line interaction for research of nonlinear system protected from vibrations with three degrees of freedom is presented. In case of vibration guard solution of problems linear systems are widely used though linearity of functions does not approximate precisely enough the system performance, causing analysis errors. The problem of deriving and research of more exact nonlinear system model protected from vibrations is solved. The nonlinear system protected from vibrations with three degrees of freedom and nonlinear right members in the form of a polynomial of the third degree from phase variables with constant and periodic parameters is considered. The system consists of a vibration guard plant established on two platforms, one under another, the lower one is put on the vibrating foundation. Exterior harmonious perturbation exerts influence upon the foundation. Elastic system elements are supposed to be described by polynomials of the third degree and damping elements have nonlinear cubic performance. As a result of method application the nonlinear system will be transformed to the more simple autonomous form and the amount of parameters of nonlinear dynamic system is essentially reduced. The autonomous system contains essentially less parameters, than initial system, without making worse solution quality. Method application simplifies essentially the research of transitive and settled processes of nonlinear dynamic systems. The solved research problem for the system protected from vibrations in nonlinear statement is new and has theoretical and practical value.

Keywords: off-line interaction of nonlinear systems, research methods, nonlinear systems with three degrees of freedom.

Введение

Математической моделью многих механических систем является система динамических уравнений полиномиальной структуры с периодическими или постоянными параметрами. Такие механические системы широко применяют в динамике виброзащиты приборов и устройств [1]. Исследование нелинейных систем с конечным числом степеней свободы представляет сложную актуальную проблему по сравнению с линейными системами. Исследование нелинейных систем не сводится к определению конечного числа частных решений, поскольку нелинейные системы не обладают свойством суперпозиции решений.

Предметом рассмотрения является математическая модель нелинейной динамической системы с тремя степенями свободы [2]. Целью работы является приведение математической модели нелинейной динамической системы к автономному виду. Рассматривается математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений шестого порядка с нелинейными многочленами четвертой степени относительно фазовых переменных [3]. В результате применения метода автономизации математическая модель динамической системы преобразуется к автономному виду, и определяются главные параметры динамической системы. Метод применен для исследования приборной динамической системы с малыми нелинейными частями [4]. Проведенная проверка полученных результатов и сравнение с решением, полученным численным методом Рунге–Кутта [5], показали точность метода автономизации. В результате применения метода нелинейная система преобразуется к более простому автономному виду, и существенно сокращается количество параметров нелинейной динамической системы без ухудшения качества решения. Применение метода существенно упрощает исследование переходных и установившихся процессов нелинейных динамических систем.

Математическая модель динамической системы

Объектом исследования является математическая модель динамической системы, в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными частями в форме многочленов с постоянными и периодическими коэффициентами. Рассматривается система трех дифференциальных уравнений второго порядка с правыми частями в виде многочленов четвертых степеней относительно фазовых переменных. Запишем рассматриваемую систему в матричном виде:

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}}+\mathbf{B}\dot{\mathbf{q}}+\mathbf{C}\mathbf{q}=\sum_{|\nu|=1}^{4} h_\nu \cos(\omega t)^{\nu_1}\sin(\omega t)^{\nu_2} q_1^{\nu_3} q_2^{\nu_4} q_3^{\nu_5}\dot{q}_1^{\nu_6}\dot{q}_2^{\nu_7}\dot{q}_3^{\nu_8}, \tag{1}$$

где $\mathbf{q}=\left[q_1,q_2,q_3\right]^T$ – вектор координат, $\mathbf{A},\mathbf{B},\mathbf{C}$ – матрицы третьего порядка, $\boldsymbol{\nu}=(\nu_1\nu_2\nu_3\nu_4\nu_5\nu_6\nu_7\nu_8)$ – векторный индекс, $|\nu|=\nu_1+\nu_2+\ldots+\nu_8$.

Предполагается, что система содержит малые нелинейные части с постоянными и периодическими параметрами $\left|\mathbf{h}^S{}_\nu\right|<\varepsilon$.

Метод автономизации

Приведем алгоритм метода автономизации, который применим для программирования на языке высокого уровня.

После записи математической модели системы в виде (1) выполним следующие преобразования. Введем комплексно-сопряженные переменные для записи периодических функций в исходной системе:

$$q_0=\exp(i\omega t) \text{ и } \bar{q}_0=\exp(-i\omega t),\ \lambda_1=i\omega. \tag{2}$$

Запишем в новых переменных (2) периодические функции:

$$\cos(\omega t)=\frac{1}{2}(q_0+\bar{q}_0) \text{ и } \sin(\omega t)=\frac{1}{2i}(q_0-\bar{q}_0).$$

Систему дифференциальных уравнений (1) можно представить в нормальной форме Коши.

$$\dot{\mathbf{X}}=\begin{bmatrix}\mathbf{W} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \mathrm{I}\\ \mathbf{A}^{-1}\mathbf{H} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\end{bmatrix}\mathbf{X}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \mathbf{A}^{-1}\mathbf{G}\end{bmatrix}, \tag{3}$$

где фазовый вектор имеет вид $\mathbf{X}=\left[q_0\bar{q}_0q_1q_2q_3\dot{q}_1\dot{q}_2\dot{q}_3\right]^T$. Вначале применим линейное преобразование к системе (3):

$$\mathbf{Y}=\mathbf{D}\mathbf{X}. \tag{4}$$

Посредством линейного преобразования (4) система приводится к диагональному виду:

$$\dot{\mathbf{Y}}=\mathbf{\Lambda}\mathbf{Y}+\mathbf{R}\Big|_{\mathbf{X}\to\mathbf{D}^{-1}\mathbf{Y}}, \tag{5}$$

где $\Lambda=\mathrm{diag}[\lambda_1,\bar{\lambda}_1,\ldots,\lambda_4,\bar{\lambda}_4]$, R – преобразованная правая часть. Выполним многочленное преобразование системы (5), которое учитывает многочлены до четвертых степеней:

$$y_S=z_S+\sum_{|\nu|=2}^{4} a_\nu^S\mathbf{Z}^\nu,\ (s=3,\ldots,8),\ \mathbf{Z}^\nu\equiv z_1^{\nu_1}z_2^{\nu_2}\ldots z_8^{\nu_8}. \tag{6}$$

В результате преобразования (6) система (5) приводится к автономному виду:

$$\dot{z}_S = \lambda_S z_S + \sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S \mathbf{Z}^\nu,\ (s = 3,...,8). \quad (7)$$

Для нахождения коэффициентов преобразования a_ν^s и преобразованной системы q_ν^s получены формулы (8), удобные для программирования [6]:

$$\sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S \mathbf{Z}^\nu + \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S \mathbf{Z}^\nu (\sum_{k=1}^{8}\lambda_k \nu_k - \lambda_S)) + \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S \mathbf{Z}^\nu \sum_{k=3}^{8}\nu_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^{4} q_\mu^k \mathbf{Z}^\mu) = \mathbf{R}_S(\mathbf{Z}) \quad (s = 3,...,8). \quad (8)$$

При неособых значениях индексов коэффициенты преобразованной системы q_ν^s приравнивают к нулю и при таких значениях вычисляют коэффициенты преобразования a_ν^s. При особых значениях индексов коэффициенты преобразования a_ν^s приравнивают к нулю и вычисляют коэффициенты преобразованной системы q_ν^s. Для нахождения особых значений векторного индекса при фиксированном s необходимо найти решение двух уравнений:

$$\sum_{k=1}^{8}\lambda_k \nu_k - \lambda_S \approx 0,\ \sum_{k=1}^{8}\nu_k = 2,3,4\ .$$

Произведем следующую замену переменных:

$$z_S = \rho_S \exp\left(i(t\,\mathrm{Im}\lambda_S + \theta_S)\right); \overline{z}_{S+1} = \rho_S \exp\left(i(t\,\mathrm{Im}\lambda_{S+1} - \theta_S)\right); s = 3,5,7;\ \ z_{1,2} \equiv \exp(\pm it\omega). \quad (9)$$

В результате замены переменных (9) получим аналитическое решение автономной системы (7):

$$\dot{\rho}_S = \mathrm{Re}(\lambda_S)\rho_S + \mathrm{Re}\left(\psi_S\right);\ \ \dot{\theta}_S = \rho_S^{-1}\,\mathrm{Im}\left(\psi_S\right);\ \ s = 3,5,7;$$
$$\psi_S = \sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S \rho_3^{\nu_3+\nu_4}\rho_5^{\nu_5+\nu_6}\rho_7^{\nu_7+\nu_8}\exp(i(\theta_3(\nu_3-\nu_4)+\theta_5(\nu_5\nu_6)+\theta_7(\nu_7-\nu_8)-\theta_S)). \quad (10)$$

Для нахождения стационарных решений приравниваем к нулю правые части системы (10). Для нахождения фазовых координат системы (1) выразим вектор $\mathbf{Y}$ по формулам, обратным линейной замене (4):

$\mathbf{X} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{Y}$.

Исследование нелинейной виброзащитной системы

При решении задач виброзащиты широко применяются линейные системы, хотя линейность функций не достаточно точно аппроксимирует характеристики системы, внося погрешности при анализе [7]. В работе решена задача получения и исследования более точной нелинейной модели виброзащитной системы. Решаемая задача виброзащиты в нелинейной постановке является новой, имеет теоретическое и практическое значение.

Применим представленный метод к нелинейной динамической системе с тремя степенями свободы. Рассмотрим виброзащитную систему (рис. 1), состоящую из объекта виброзащиты массой m_1, установленного на платформы массой m_2 и m_3, нижняя из которых закреплена на вибрирующем основании [8]. Предполагается, что упругие элементы системы описываются полиномом третьей степени $kx + lx^2 + px^3$, демпфирующие элементы имеют нелинейную кубическую характеристику $c\dot{x} + d\dot{x}^3$.

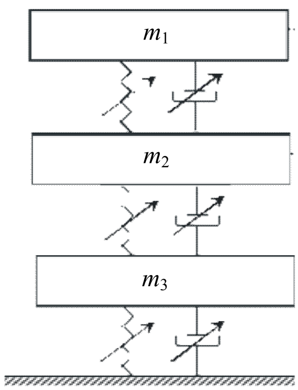

Рис. 1. Схема нелинейной виброзащитной системы

Математическая модель рассматриваемой системы представима в виде системы дифференциальных уравнений:

$$
\begin{aligned}
& m_1\ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1-\dot{x}_2) + d_1(\dot{x}_1-\dot{x}_2)^3 + k_1(x_1-x_2) + l_1(x_1-x_2)^2 + p_1(x_1-x_2)^3 = 0,\\
& m_2\ddot{x}_2 + c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1) + d_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1)^3 + k_1(x_2-x_1) - l_1(x_2-x_1)^2 + p_1(x_2-x_1)^3 +\\
& c_2(\dot{x}_2-\dot{x}_3) + d_2(\dot{x}_2-\dot{x}_3)^3 + k_2(x_2-x_3) + l_2(x_2-x_3)^2 + p_2(x_2-x_3)^3 = 0,\\
& m_2\ddot{x}_3 + c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2) + d_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2)^3 + k_2(x_3-x_2) - l_2(x_3-x_2)^2 + p_2(x_3-x_2)^3 +\\
& c_3(\dot{x}_3-\dot{f}) + d_3(\dot{x}_3-\dot{f})^3 + k_3(x_3-f) + l_3(x_3-f)^2 + p_3(x_3-f)^3 = 0,
\end{aligned} \tag{11}
$$

где x_1, x_2, x_3 – абсолютные перемещения по отношению к положению равновесия системы.

На основание действуют вертикальные колебания

$f(t) = a\sin(\omega t)$.

Введем относительное перемещение:

$$\tilde{x}_1 = x_1 - f,\ \tilde{x}_2 = x_2 - f,\ \tilde{x}_3 = x_3 - f. \tag{12}$$

Запишем уравнения движения (11) в новых переменных (12):

$$
\begin{aligned}
& m_1\ddot{\tilde{x}}_1 + c_1(\dot{\tilde{x}}_1-\dot{\tilde{x}}_2) + d_1(\dot{\tilde{x}}_1-\dot{\tilde{x}}_2)^3 + k_1(\tilde{x}_1-\tilde{x}_2) + l_1(\tilde{x}_1-\tilde{x}_2)^2 + p_1(\tilde{x}_1-\tilde{x}_2)^3 = -m_1\ddot{f}_1,\\
& m_2\ddot{x}_2 + c_1(\dot{\tilde{x}}_2-\dot{\tilde{x}}_1) + d_1(\dot{\tilde{x}}_2-\dot{\tilde{x}}_1)^3 + k_1(\tilde{x}_2-\tilde{x}_1) - l_1(\tilde{x}_2-\tilde{x}_1)^2 + p_1(\tilde{x}_2-\tilde{x}_1)^3 +\\
& c_2(\dot{\tilde{x}}_2-\dot{\tilde{x}}_3) + d_2(\dot{\tilde{x}}_2-\dot{\tilde{x}}_3)^3 + k_2(\tilde{x}_2-\tilde{x}_3) + l_2(\tilde{x}_2-\tilde{x}_3)^2 + p_2(\tilde{x}_2-\tilde{x}_3)^3 = -m_2\ddot{f},\\
& m_2\ddot{x}_3 + c_2(\dot{\tilde{x}}_3-\dot{\tilde{x}}_2) + d_2(\dot{\tilde{x}}_3-\dot{\tilde{x}}_2)^3 + k_2(\tilde{x}_3-\tilde{x}_2) - l_2(\tilde{x}_3-\tilde{x}_2)^2 + p_2(\tilde{x}_3-\tilde{x}_2)^3 +\\
& c_3\dot{\tilde{x}}_3 + d_3\dot{\tilde{x}}_3^{\,3} + k_3\tilde{x}_3 + l_3\tilde{x}_3^{\,2} + p_3\tilde{x}_3^{\,3} = -m_3\ddot{f}.
\end{aligned} \tag{13}
$$

Здесь

$\ddot{f}(t) = -a\omega^2\sin(\omega t)$.

Выполним многочленное преобразование системы (13) согласно приведенному алгоритму [9]. С точностью до членов четвертого порядка получаем автономную дифференциальную систему

$$
\begin{cases}
\dot{z}_3 = (\lambda_3 + q^3_{11100000})z_3, & z_4 = \overline{z}_3,\\
\dot{z}_5 = (\lambda_5 + q^5_{11001000})z_5\ , & z_6 = \overline{z}_5,\\
\dot{z}_7 = (\lambda_7 + q^7_{11000010})z_5\ , & z_8 = \overline{z}_7
\end{cases} \tag{14}
$$

Решение системы (14) записывается в виде

$$
\begin{aligned}
& z_{3,4} \equiv \rho_{01}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_3 + q^3_{11100000}) \pm i(\theta_{01} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_3 + q^3_{11100000}))),\\
& z_{5,6} \equiv \rho_{02}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_5 + q^5_{11001000}) \pm i(\theta_{02} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_5 + q^5_{11001000}))),\\
& z_{7,8} \equiv \rho_{03}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_7 + q^7_{11000010}) \pm i(\theta_{03} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_7 + q^7_{11000010}))).
\end{aligned} \tag{15}
$$

С помощью пакета программ рассчитан переходный и установившийся режимы движения вибро-защитной системы при следующих параметрах:

$$
\begin{aligned}
& m_1 = 1{,}13,\ c_1 = 0{,}23,\ d_1 = 0{,}01,\ k_1 = 1{,}23,\ l_1 = 0{,}04,\ p_1 = 0{,}02,\\
& m_2 = 3{,}17,\ c_2 = 0{,}61,\ d_2 = 0{,}03,\ k_2 = 3{,}13,\ l_2 = 0{,}13,\ p_2 = 0{,}06,\\
& m_3 = 8{,}71,\ c_3 = 1{,}73,\ d_3 = 0{,}09,\ k_3 = 9{,}11,\ l_3 = 0{,}37,\ p_3 = 0{,}17.
\end{aligned}
$$

На систему действует внешнее возмущение: $\omega = 2,\ a = 0{,}5$.

Определены коэффициенты преобразованной автономной системы (14)

$$
\begin{aligned}
& q^3_{11100000} = -0{,}086 + 0{,}011i,\\
& q^5_{11001000} = -0{,}154 + 0{,}012i,\\
& q^7_{11000010} = -0{,}044 + 0{,}001i.
\end{aligned}
$$

Решение системы (15) записывается в виде

$$
\begin{aligned}
& z_{3,4} \equiv \rho_{01}\exp(-0{,}297t \pm i(\theta_{01} + 1{,}480t)),\\
& z_{5,6} \equiv \rho_{02}\exp(-0{,}273t \pm i(\theta_{02} + 1{,}130t)),\\
& z_{7,8} \equiv \rho_{03}\exp(-0{,}083t \pm i(\theta_{03} + 0{,}635t)).
\end{aligned}
$$

Установившийся полигармонический режим движения системы имеет вид:

$$
\begin{aligned}
& x_1 = -0{,}011 - 0{,}035\cos(\omega t) - 0{,}470\sin(\omega t) + 0{,}00001\cos(2\omega t) - 0{,}00001\sin(2\omega t),\\
& x_2 = -0{,}011 + 0{,}113\cos(\omega t) - 0{,}526\sin(\omega t) + 0{,}00016\cos(2\omega t) + 0{,}00007\sin(2\omega t),\\
& x_3 = -0{,}008 - 0{,}261\cos(\omega t) - 0{,}612\sin(\omega t) - 0{,}00045\cos(2\omega t) + 0{,}00056\sin(2\omega t).
\end{aligned}
$$

Колебания системы происходят с частотами, кратными частоте внешней силы, воздействующей на основание. На рис. 2 показано абсолютное перемещение объекта виброзащиты при установлении колебаний нелинейной динамической системы. Представленный график показывает, что вынужденные колебания в начале установления являются квазипериодическими с частотами, кратными внешней силе.

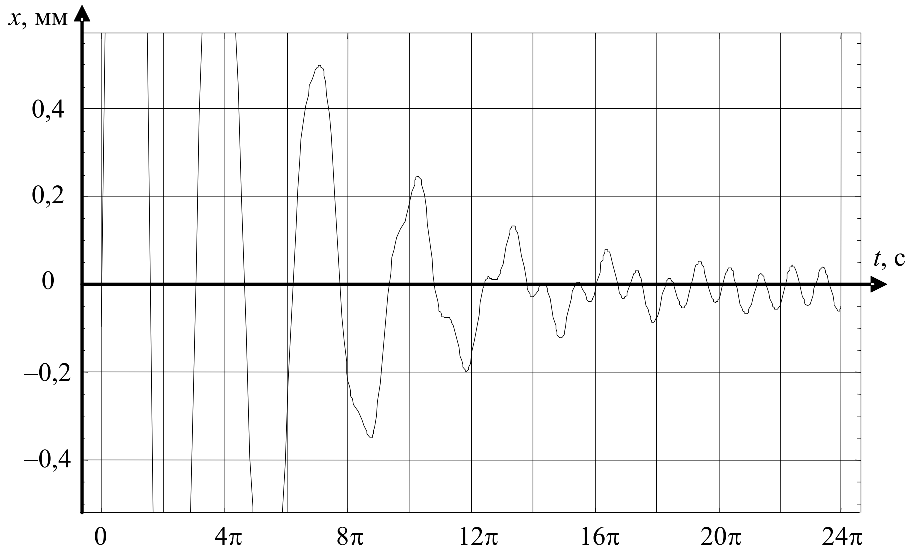

Рис. 2. Абсолютное перемещение объекта виброзащиты при установлении колебаний

В результате применения метода для анализа виброзащитной системы с тремя степенями свободы получены графики переходных и установившихся режимов виброзащитной системы. Уравнения движения системы приведены к автономному виду. Найдены существенные константы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы колебаний. Приведена схема метода для систем с тремя степенями свободы, описывается алгоритм программной реализации метода.

Метод позволяет получить достаточно подробные качественные и количественные характеристики изучаемых движений [10], исследовать установившиеся режимы колебаний для систем, находящихся в условиях периодического внешнего воздействия, а также изучать переходные процессы.

Заключение

Рассмотрена нелинейная динамическая система с тремя степенями свободы и нелинейными правыми частями в виде многочлена третьей степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Система состоит из объекта виброзащиты, установленного на две платформы, находящиеся одна под другой, нижняя из которых поставлена на вибрирующее основание [11]. Внешнее гармоническое возмущение воздействует на основание. Предполагается, что упругие элементы системы описываются многочленами третьей степени, демпфирующие элементы имеют нелинейную кубическую характеристику [12]. Система уравнений движения приведена к автономному виду. Определены существенные константы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы колебаний.

В работе представлен алгоритм метода автономизации нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы [13]. Разработан алгоритм метода для исследования нелинейных динамических задач. В результате применения метода нелинейная периодическая система преобразуется к автономному виду, и определяются параметры установившихся и переходных режимов движения. Для повышения точности метода в работе [14] предложено применение аппроксимации Чебышева для членов высоких степеней. Приведенные алгоритмические формулы метода позволяют приводить к автономному виду нелинейные динамические системы [15], математическая модель которых представима в виде системы дифференциальных уравнений шестого порядка с нелинейными многочленами до четвертых степеней относительно фазовых переменных.

Литература

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Дрофа, 2004. 591 с.
2. Иванов С.Е. Исследование нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74). С. 62–64.
3. Бибиков Ю.Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений. СПб: Лань, 2011. 304 с.
4. Мельников В.Г. Многочленные преобразования нелинейных систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 5. С. 20–25.

5. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. СПб: Лань, 2010. 400 с.
6. Иванов С.Е. Алгоритмическая реализация метода исследования нелинейных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 90–92.
7. Матросов В.М., Румянцев В.В., Карапетян А.В. Нелинейная механика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 432 с.
8. Мельников В.Г., Мельников Г.И., Иванов С.Е. Компьютерные технологии в механике приборных систем: Учеб. пособие / Под ред. В.Г. Мельникова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 127 с.
9. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 198 с.
10. Иванов С.Е. Определение установившихся режимов работы виброзащитной системы с двумя степенями свободы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 4 (68). С. 44–46.
11. Каток А.Б., Хасселблат Б. Введение в теорию динамических систем с обзором последних достижений. М.: МЦНМО, 2005. 464 с.
12. Hamming R.W. Numerical methods for scientists and engineers. NY: Dover, 1986. 721 p.
13. Мельников В.Г. Энергетический метод параметрической идентификации тензоров инерции тел // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 1 (65). С. 59–63.
14. Мельников В.Г. Преобразование динамических многочленных систем с применением аппроксимации Чебышева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 85–89.
15. Melnikov V.G. Chebyshev economization in Poincare-Dulac transformations of nonlinear systems // Nonlinear Analysis. 2005. V. 63. N 5–7. P. e1351–e1355.

Иванов Сергей Евгеньевич – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, sivanov@mail.ifmo.ru

Мельников Геннадий Иванович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, melnikov@mail.ifmo.ru

Sergei Ivanov PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, sivanov@mail.ifmo.ru

Gennady Melnikov D.Sc., Professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, melnikov@mail.ifmo.ru

УДК 629.78

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ

Е.В. Шалобаев[a], Р.-Т. Толочка[b]

[a] Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, shalobaev47@mail.ru
[b] Каунасский технологический университет, Каунас, Литва, tadas.tolocka@ktu.lt.

Проанализировано современное состояние базовых терминов в области мехатроники, которое зафиксировано в документах комиссии по стандартизации и терминологии Международной федерации по теории машин и механизмов. Указаны новые термины, которые были введены в научный оборот с начала XXI века. К таким терминам относятся «мехатронизированный объект», «мехатронный класс», объединяющий «мехатронные» и «мехатронизированные» объекты. Дано понятие об «уровневом подходе» к мехатронике, который позволяет увязать между собой собственно мехатронику, микросистемную технику и наноиндустрию. Изложены некоторые соображения о применении термина «мехатронный комплекс», которые стали особенно актуальным в связи с появлением орбитальных группировок малых космических аппаратов.
Внесены коррективы по таким критериям оценки мехатронных объектов, как ремонтопригодность и долговечность, а также по использованию термина «мехатронные модули». Поставлены вопросы о расширении понимания мехатроники от компьютерного управления движением до управления состоянием объекта, о терминах «авионика» и «автоника», о взаимосвязи мехатроники и логистики, которую стали относить к предметной области мехатроники.
Ключевые слова: мехатроника, мехатронные комплексы, модули и узлы, орбитальная группировка, малые космические аппараты, ремонтопригодность, долговечность, уровневый подход, мехатронизированные объекты.