

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ОДНОМАССОВОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

© 2014

Н.А. Лунина, аспирант

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: вибрационный электропривод; система автоматического управления; моделирование.

Аннотация: Предложена математическая модель и приведены результаты компьютерного моделирования одномассовой вибрационной системы направленных колебаний на базе асинхронного частотно-регулируемого электропривода в различных режимах работы.

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности вибрационные установки широко используются для осуществления различных технологических процессов. Вибрационные технологии часто существенно отличаются от традиционных методов обработки, характеризуются более высокой интенсивностью и производительностью, качественными показателями.

Частным случаем вибрационной системы направленных колебаний, в которой необходима стабилизация амплитуды, являются установки, работающие в резонансном режиме. В работе [1] рассмотрена система с обратной связью по фазе без частотного управления. В колебательной системе, находящейся в резонансном состоянии, инерционные и упругие силы взаимно уравновешиваются, а энергия возбудителя колебаний расходуется только на преодоление рассеяния энергии в системе. Таким образом, снижаются затраты энергии, масса и габариты установки. Но резонансные режимы вибрационной машины при вынужденных колебаниях практически трудно реализуемы из-за существенного влияния изменений технологической нагрузки и параметров колебательной системы.

Однако большинство вибрационных установок работает в зарезонансном режиме. Одной из проблем этого вида установок является прохождение резонанса в динамических режимах, при котором возникают механические нагрузки, оказывающие негативное влияние на элементы системы. В данной работе рассмотрена система направленных колебаний на основе частотно-регулируемого асинхронного электропривода при настройке на резонанс, а так же рассмотрен способ торможения системы в зарезонансном режиме.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Математическое описание асинхронного двигателя основано на представлении трехфазных систем напряжений, токов и потокосцеплений в виде пространственных векторов. Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе описываются системой уравнений, записанной во вращающейся системе координат α - β , которая в электрическом пространстве вращается синхронно с частотой ω_{03} .

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_1 &= R_1 \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\psi}_1}{dt} + j\omega_{03} \tilde{\psi}_1, \\ \tilde{U}_2 &= R_2 \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\psi}_2}{dt} + j\omega \tilde{\psi}_2, \\ \tilde{\psi}_1 &= L_1 \tilde{I}_1 + L_m \tilde{I}_2, \\ \tilde{\psi}_2 &= L_m \tilde{I}_1 + L_2 \tilde{I}_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

В системе уравнений обозначены следующие величины:

$\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \tilde{I}_1, \tilde{I}_2, \tilde{\psi}_1, \tilde{\psi}_2$ – пространственные векторы напряжений, токов и потокосцеплений статора и ротора соответственно;

R_1, R_2, L_1, L_2 – активные сопротивления и полные индуктивности обмоток фаз статора и ротора; L_m – индуктивность намагничивания;

$\omega_{03} = 2\pi f$ – угловая частота напряжения питания статора (рад/с);

ω – угловая частота вращения вала двигателя в физическом пространстве;

p_n – число пар полюсов двигателя;

$j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Чтобы составить структурную схему асинхронного двигателя для последующего моделирования, необходимо записать дифференциальные уравнения системы (1) в нормальной форме и перейти к изображениям Лапласа ($d/dt = p$), принять $U_2 = 0$ для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, выразить ток статора и ток ротора как функции потокосцеплений, исключить из первых двух уравнений системы токи статора и ротора, выполнив необходимые подстановки. Тогда система уравнений, описывающих электромагнитные процессы в двигателе, примет вид:

$$\left. \begin{aligned} p \tilde{\psi}_1 &= \tilde{U}_1 - \frac{1}{\sigma T_1} (\tilde{\psi}_1 - k_2 \tilde{\psi}_2) - j\omega_{03} \tilde{\psi}_1, \\ p \tilde{\psi}_2 &= -\frac{1}{\sigma T_2} (\tilde{\psi}_2 - k_1 \tilde{\psi}_1) - j\omega_p \tilde{\psi}_2, \\ \tilde{I}_1 &= \frac{1}{\sigma L_1} (\tilde{\psi}_1 - k_2 \tilde{\psi}_2), \\ \tilde{I}_2 &= \frac{1}{\sigma L_2} (\tilde{\psi}_2 - k_1 \tilde{\psi}_1). \end{aligned} \right\} (2)$$

где $T_1 = L_1/R_1, T_2 = L_2/R_2$ – постоянные времени статора и ротора соответственно;

$\omega_p = \omega_{03} - p_n \omega$ – угловая частота роторной электродвижущей силы;

$k_2 = L_m/L_2$ – коэффициент ротора.

Электромагнитный момент двигателя (M_{Σ}) определяется формулой:

$$M_{\Sigma} = \frac{3}{2} p_n \frac{k_1}{\sigma L_2} (\psi_{2\alpha} \psi_{2\beta} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}) \quad (3)$$

где $k_1=L_m/L_1$ – коэффициент статора;
 $\sigma=1-L_m^2/L_1L_2$ – коэффициент рассеяния двигателя;
 $\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}, \psi_{2\alpha}, \psi_{2\beta}$ – проекции пространственных векторов потокоцепления статора и ротора на координатные оси α и β соответственно.

Уравнение равновесия моментов на валу двигателя в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\mathcal{E}} - M_C - M_{TP}, \quad (4)$$

где J – приведенный момент инерции электропривода;
 M_C – момент сопротивления нагрузки,
 M_{TP} – момент трения на валу.

Так как для определения электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$ требуются проекции пространственных векторов, то величины в системе (2) необходимо представить в форме проекций на координатные оси. Для всех рассматриваемых здесь пространственных векторов справедливо представление в виде:

$$\tilde{\psi}_{1\alpha-\beta} = \psi_{1\alpha} + j\psi_{1\beta} \quad (5)$$

Поэтому, подставив в (2) выражения для пространственных векторов через их проекции в виде (5) и выделяя вещественные и мнимые части, получим систему уравнений (6) для построения компьютерной модели асинхронного двигателя:

$$\left. \begin{aligned} p\psi_{1\alpha} &= u_{1\alpha} - \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\alpha} + \omega_{0\mathcal{E}} \psi_{1\beta} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \psi_{2\alpha}, \\ p\psi_{1\beta} &= u_{1\beta} - \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\beta} - \omega_{0\mathcal{E}} \psi_{1\alpha} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \psi_{2\beta}, \\ p\psi_{2\alpha} &= \frac{k_1}{\sigma T_2} \psi_{1\alpha} + \omega_p \psi_{2\beta} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\alpha}, \\ p\psi_{2\beta} &= \frac{k_1}{\sigma T_2} \psi_{1\beta} - \omega_p \psi_{2\alpha} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\beta}, \\ i_{1\alpha} &= \frac{1}{\sigma L_1} (\psi_{1\alpha} - k_2 \psi_{2\alpha}), \\ i_{1\beta} &= \frac{1}{\sigma L_1} (\psi_{1\beta} - k_2 \psi_{2\beta}), \\ i_{2\alpha} &= \frac{1}{\sigma L_2} (\psi_{2\alpha} - k_1 \psi_{1\alpha}), \\ i_{2\beta} &= \frac{1}{\sigma L_2} (\psi_{2\beta} - k_1 \psi_{1\beta}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для данной математической модели входными воздействиями являются $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ и $\omega_{0\mathcal{E}}$, а выходными – электромагнитный момент $M_{\mathcal{E}}$, частота вращения вала и проекции пространственных векторов токов и потокоцеплений. Проекции пространственных векторов не подходят для представления выходных, поэтому необходимо сформировать входные и выходные величины в форме мгновенных значений. Формулы, связывающие проекции векторов в различных координатных системах и мгновенные значения величин, представлены ниже:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= \frac{2}{3} (u_{1A} - 0.5(u_{1B} + u_{1C})); \\ u_{1y} &= (u_{1B} + u_{1C}) / \sqrt{3}; \\ u_{1\alpha} &= u_{1x} \cos(\theta_C) + u_{1y} \sin(\theta_C); \\ u_{1\beta} &= u_{1y} \cos(\theta_C) - u_{1x} \sin(\theta_C). \end{aligned} \quad (7)$$

В уравнениях (7) обозначены величины: $u_{1x}, u_{1y}, u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – проекции пространственного вектора напряжения статора на координатные оси x – y и α – β ;
 u_{1A}, u_{1B}, u_{1C} – мгновенные значения напряжений, приложенных к фазам статора;
 θ_C – угол поворота системы α – β в электрическом пространстве, определяемый из выражения $d\theta_C/dt = \omega_{0\mathcal{E}}$.

Одномассовая вибрационная система направленных колебаний описывается следующей системой уравнений:

$$(m_1 + m_1') \ddot{y} + b_1 \dot{y} + k_1 y = m_0 R \omega^2 \cos(\omega t), \quad (8)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\mathcal{E}} - M_{\text{ВИБР}} - \frac{1}{2} m_0 R g \sin(\omega t) - M_{\text{МЕХ}}. \quad (9)$$

Уравнение (8) описывает движение виброплатформы согласно второму закону Ньютона, а уравнение (9) – равновесие моментов на валу двигателя, полученное из уравнения (4) с учетом электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$, полученного по формуле (3). В уравнениях обозначены следующие величины:

m_1 – масса виброплатформы с расположенными на ней двигателями;

m_1' – масса среды, колеблющаяся в фазе с виброплатформой;

m_0 – масса дебаланса;

y – смещение виброплатформы по оси Y (вибросмещение);

$\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ – скорость виброплатформы по оси Y ;

$\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$ – ускорение виброплатформы по оси Y ;

R – эксцентриситет дебаланса (расстояние от оси вращения до центра масс дебаланса);

g – ускорение свободного падения;

b_1 – коэффициент сопротивления системы виброплатформа – среда, характеризующий вязкостные потери в среде и потери на излучение;

k_1 – жесткость упругой связи по оси Y системы виброплатформа–среда;

J – приведенный момент инерции вращающихся масс относительно оси вращения;

$M_{\text{МЕХ}}$ – момент сопротивления на валу вибродвигателя, обусловленный механическими потерями;

$M_{\text{ВИБР}}$ – вибрационный момент сопротивления на валу электродвигателя.

Частным случаем стабилизации амплитуды колебаний является поддержание максимальной амплитуды, то есть, нахождение и поддержание резонансного режима работы [2].

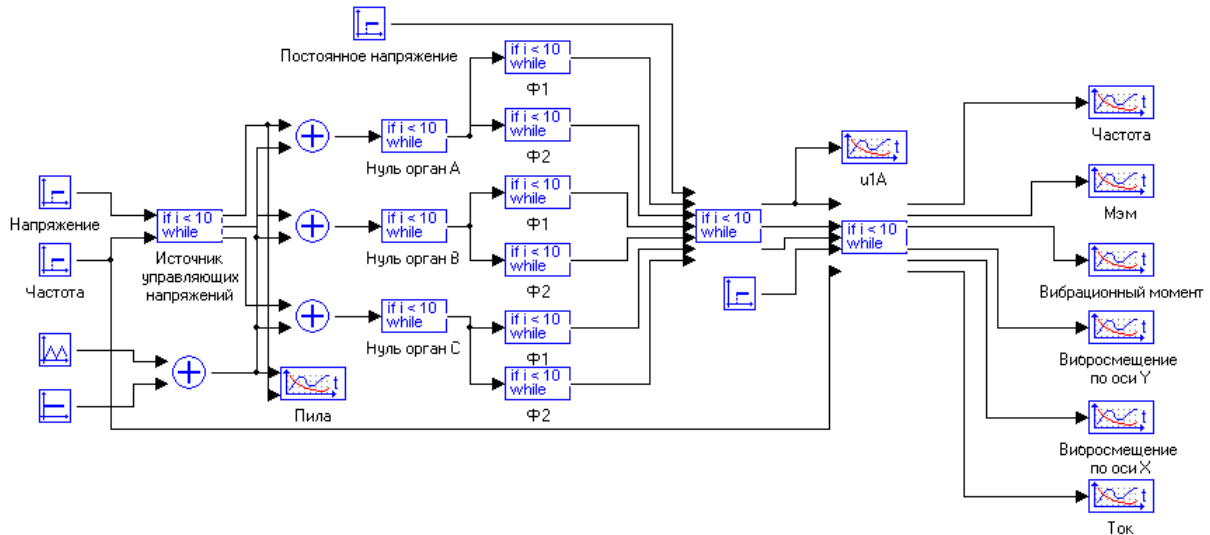


Рис. 1. Математическая модель вибрационной установки с направленными колебаниями платформы

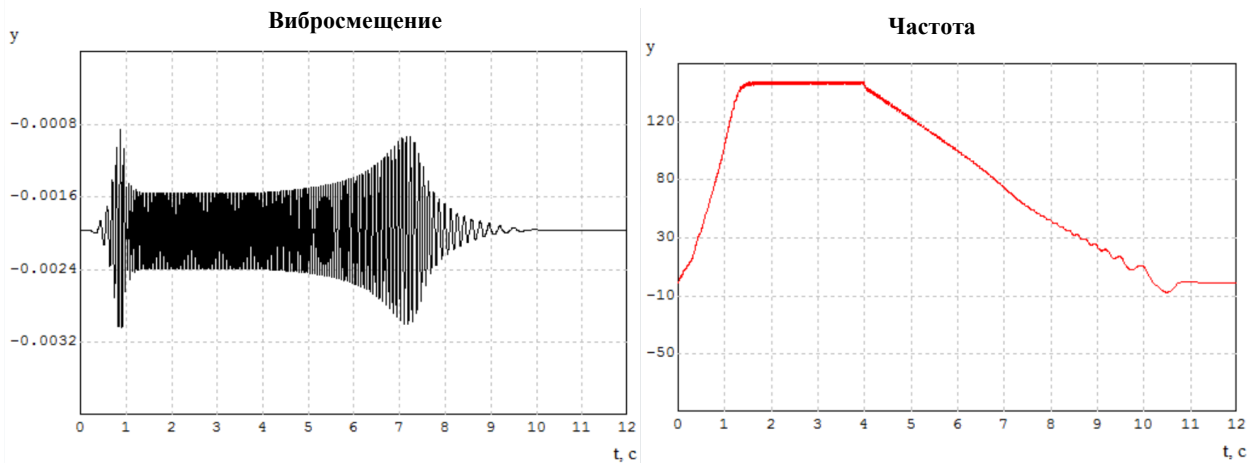


Рис. 2. Графики переходных процессов вибросмещения и частоты при выбеге

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе систем уравнений (6) и (7), а также выражений (8) и (9) в программном комплексе МВТУ 3.7. была построена модель одномассовой вибрационной системы направленных колебаний на основе частотно-регулируемого асинхронного электропривода. На рисунке 1 показана схема для моделирования в ПК МВТУ. Для моделирования автономного инвертора напряжения в составе преобразователя частоты использовались стандартные блоки библиотеки и блок «Программирование». Последующие графики получены при частоте опорного напряжения $f=4000$ Гц.

Прохождение резонансных частот, а следовательно, недопустимых нагрузок, возникает и при торможении системы, работающей в зарезонансном режиме. Переходные процессы при выбеге зарезонансной установки представлены на Рис. 2.

На графике видно, что при торможении установка проходит область частот, характеризующуюся наибольшей амплитудой колебаний. Эти эффекты также увеличивают время переходного процесса.

Для устранения отрицательных эффектов при торможении используют различные методы форсированного торможения. Одним из способов является применение конденсаторных схем. Рассмотренная схема осуществляет режим противовключения. Результат моделирования представлен на рис. 3.

При сравнении графиков на рис. 2 и рис. 3 видно, что время переходного процесса сократилось, амплитуда колебаний в резонансной зоне существенно уменьшилась.

В резонансных вибрационных установках с непостоянными параметрами системы и величиной нагрузкой актуальной проблемой является поддержание резонансного режима.

В модель вибрационной установки вводится блок, который является математической моделью подпрограммы микроконтроллера, реализующей поиск и поддержание резонанса, а также включение резонансного модуля программы, при условии, что переходный процесс завершился, во избежание отрицательных эффектов.

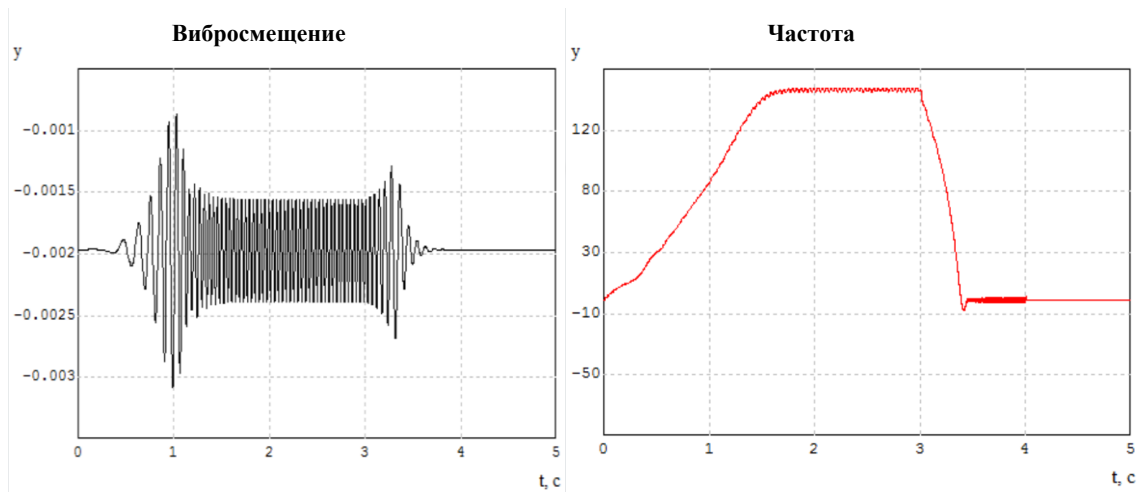


Рис. 3. Графики переходных процессов вибросмещения и частоты при использовании конденсаторного торможения

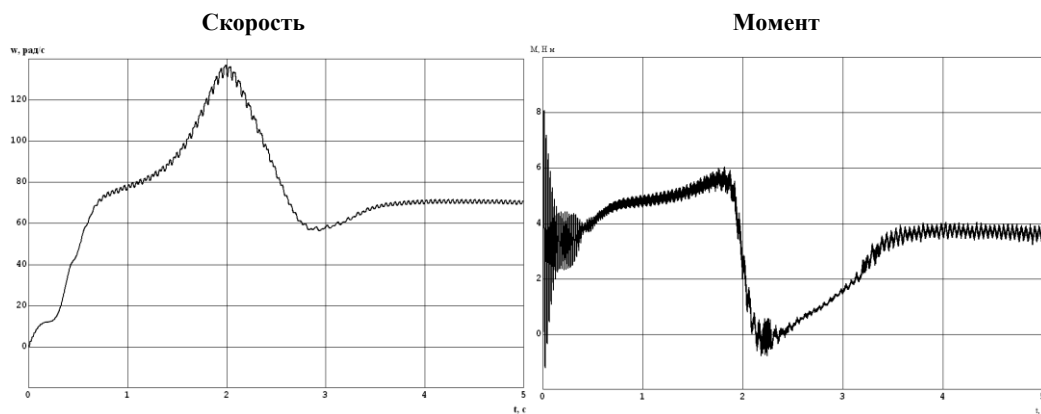


Рис. 4. Графики переходных процессов скорости и момента в системе, настроенной на резонанс

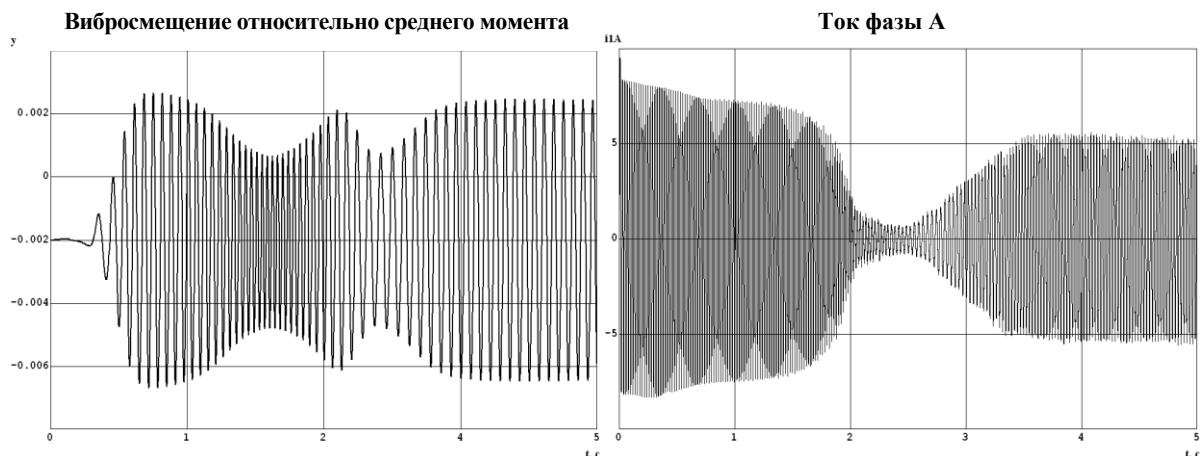


Рис. 5. Графики переходных процессов вибросмещения и тока фазы в системе, настроенной на резонанс

Подпрограмма поиска резонанса запускается после выхода двигателей в установившийся режим. В математической модели ПК МВТУ это реализовано с помощью сравнения текущей скорости двигателя с его номинальной скоростью. Переходные процессы в системе показаны на рис. 4 и рис. 5.

ВЫВОДЫ

На основе математической модели и результатов имитационного моделирования в программном комплексе МВТУ были исследованы режимы работы одномассовой вибрационной системы направленных колебаний на базе асинхронных дебалансных вибродвигателей.

телей, в частности, настройка системы на резонанс и режим торможения зарезонансной установки. Математическая модель нерегулируемой системы адекватна физической модели установки с заданными параметрами. Таким образом, результат математического моделирования резонансного режима и тормозных процессов показывает перспективы данных разработок. В частности, повышение производительности и быстродействия вибрационной системы, снабженной системой автоматической настройки и поддержания резонанса, а также сокращение времени переходного процесса

и уменьшение механических нагрузок на узлы установки в зарезонансном режиме при торможении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов А.А. Математическое моделирование и исследование частотно-управляемого асинхронного вибрационного электропривода. Автореферат диссертации. – УлГТУ, 2008. – 22 с.
2. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М. : Машиностроение, 1969. – 362 с.

MATHEMATICAL MODELING OF SINGLE-MASS VIBRATION SYSTEM OF DIRECTED OSCILLATIONS BASED ON ASYNCHRONOUS VARIABLE FREQUENCY DRIVES

© 2014

N.A. Lunina, postgraduate
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: vibration electric drive; automatic control system; modeling.

Annotation: The mathematical model and the results of computer modeling of modes of single-mass vibration system based on frequency-controlled asynchronous electric motors.