

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 621.313.333

В.Н. Дмитриев, Н.А. Лунина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОМАССОВОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИСТЕМОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ

Дмитриев Владимир Николаевич, доктор технических наук, окончил электромеханический факультет Томского политехнического института, заведующий кафедрой «Электропривод и АПУ» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, патенты в области численного моделирования электромеханических комплексов и систем. [e-mail: dvn@ulstu.ru].

Лунина Наталья Андреевна, окончила энергетический факультет Ульяновского государственного технического университета, аспирант кафедры «Электропривод и АПУ» УлГТУ. Имеет статьи, патенты в области численного моделирования электромеханических комплексов и систем. [e-mail: n.lunina@live.ru].

Аннотация

Предложена математическая модель и приведены результаты компьютерного моделирования одномассовой вибрационной системы направленных колебаний на базе асинхронного частотно-регулируемого электропривода с системой стабилизации амплитуды колебаний. Рассмотрены особенности переходных процессов в данной системе в сравнении с переходными процессами, характеризующими другие режимы работы.

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

Vladimir Nikolaevich Dmitriev, Doctor of Engineering, graduated from the Electromechanical Faculty at Tomsk Polytechnic Institute, head of the 'Electric Drive and Automation of Industrial Plants' Chair at Ulyanovsk State Technical University; author of articles and patents in the field of numerical simulation and electromechanical systems. e-mail: dvn@ulstu.ru.

Natalia Andreevna Lunina, graduated from the Faculty of Power at Ulyanovsk State Technical University, post-graduate student of the 'Electric Drive and Automation of Industrial Plants' Chair at Ulyanovsk State Technical University; author of articles and patents in the field of computational modeling and electromechanical systems. e-mail: n.lunina@live.ru.

Abstract

The article presents a mathematical model and results of computer modeling of single-mass directed vibration system based on variable frequency induction motor drive with automated stabilization of oscillation amplitude are proposed. The article also deals with the features of the transition processes in proposed system. These transition processes are compared with the one typical for other modes.

Key words: vibration electric drive, automatic control system, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Различные вибрационные установки широко используются для осуществления или интенсификации различных технологических процессов. Это вибрационные строительные и дорожные машины для трамбовки грунта и формирования железобетонных изделий, многочисленные вибрационные устройства для транспортирования сыпучих материалов и штучных изделий, сепараторы и грохоты и многие другие. Вибрационные технологии часто существенно отличаются от традиционных методов обработки, причем этот подход позволяет создавать новые методы обработки и технологические процессы, способствующие разработке экологически чистых ресурсосберегающих технологий, а также характеризующиеся 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 диссипативных сил. Таким образом, снижаются затраты энергии, масса и габариты установки. Но резонансные режимы вибрационной машины при вынужденных колебаниях практически трудно реализуемы из-за высокой чувствительности к изменению технологической нагрузки и параметров колебательной системы.

В данной работе рассмотрена система направленных колебаний на основе частотно-регулируемого асинхронного электропривода, исследован общий случай системы стабилизации амплитуды, включающей пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор).

1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ОДНОМАССОВОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Математическое описание асинхронного двигателя основано на представлении трехфазных систем напряжений, токов и потокоцеплений в виде пространственных векторов. Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе описываются системой уравнений, записанной во вращающейся системе координат $\alpha-\beta$, которая в электрическом пространстве вращается синхронно с частотой $\omega_{0\alpha}$.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_1 &= R_1 \tilde{I}_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{0\alpha} \tilde{\Psi}_1, \\ \tilde{U}_2 &= R_2 \tilde{I}_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} + j\omega_{0\alpha} \tilde{\Psi}_2, \\ \tilde{\Psi}_1 &= L_1 \tilde{I}_1 + L_m \tilde{I}_2, \\ \tilde{\Psi}_2 &= L_m \tilde{I}_1 + L_2 \tilde{I}_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

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 потокоцеплений 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;

$\omega_{0\alpha} = 2\pi f$ – угловая частота напряжения питания статора (рад/с);

ω – угловая частота вращения вала двигателя в физическом пространстве;

$j = \sqrt{-1}$ – 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 потокоцеплений, исключить из первых двух уравнений системы токи статора и ротора, выполнив необходимые подстановки. Тогда система уравнений, описывающих электромагнитные процессы в двигателе, примет вид:

$$\left. \begin{aligned} p\tilde{\Psi}_1 &= \tilde{U}_1 - \frac{1}{\sigma T_1}(\tilde{\Psi}_1 - k_2 \tilde{\Psi}_2) - j\omega_{0\alpha} \tilde{\Psi}_1, \\ p\tilde{\Psi}_2 &= -\frac{1}{\sigma T_2}(\tilde{\Psi}_2 - k_1 \tilde{\Psi}_1) - j\omega_p \tilde{\Psi}_2, \\ \tilde{I}_1 &= \frac{1}{\sigma L_1}(\tilde{\Psi}_1 - k_2 \tilde{\Psi}_2), \\ \tilde{I}_2 &= \frac{1}{\sigma L_2}(\tilde{\Psi}_2 - k_1 \tilde{\Psi}_1), \end{aligned} \right\} (2)$$

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

$\omega_p = \omega_{0\alpha} - p_n \omega$ – угловая частота роторной электро-движущей силы;

p_n – число пар полюсов двигателя;

$k_2=L_m/L_2$ – коэффициент ротора.

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

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

где $k_1=L_m/L_1$ – коэффициент статора;

$\sigma = 1 - L_m^2/L_1 L_2$ – 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:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\alpha} - M_c - M_{TP}, \quad (4)$$

где J – приведенный момент инерции электропривода;

M_C – момент сопротивления нагрузки,

M_{TP} – момент трения на валу.

Так как для определения электромагнитного момента M_{Σ} 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 и выделяя вещественные и мнимые части, получим систему уравнений (6) для построения компьютерной модели асинхронного двигателя:

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

Для данной математической модели входными воздействиями являются $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ и $\omega_{0\beta}$, а выходными – электромагнитный момент M_{Σ} , частота вращения вала и проекции пространственных векторов токов и потокосцеплений. Проекция 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 $d\theta_C/dt = \omega_{0\beta}$.

Одномассовая вибрационная система направленных колебаний описывается следующей системой уравнений:

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

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

Уравнение (8) описывает движение виброплатформы согласно второму закону Ньютона, а уравнение (9) – равновесие моментов на валу двигателя. 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 ;

$\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2}$ – 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;

$M_{МЭХ}$ – момент сопротивления на валу вибродвигателя, обусловленный механическими потерями;

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

2 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДНОМАССОВОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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.

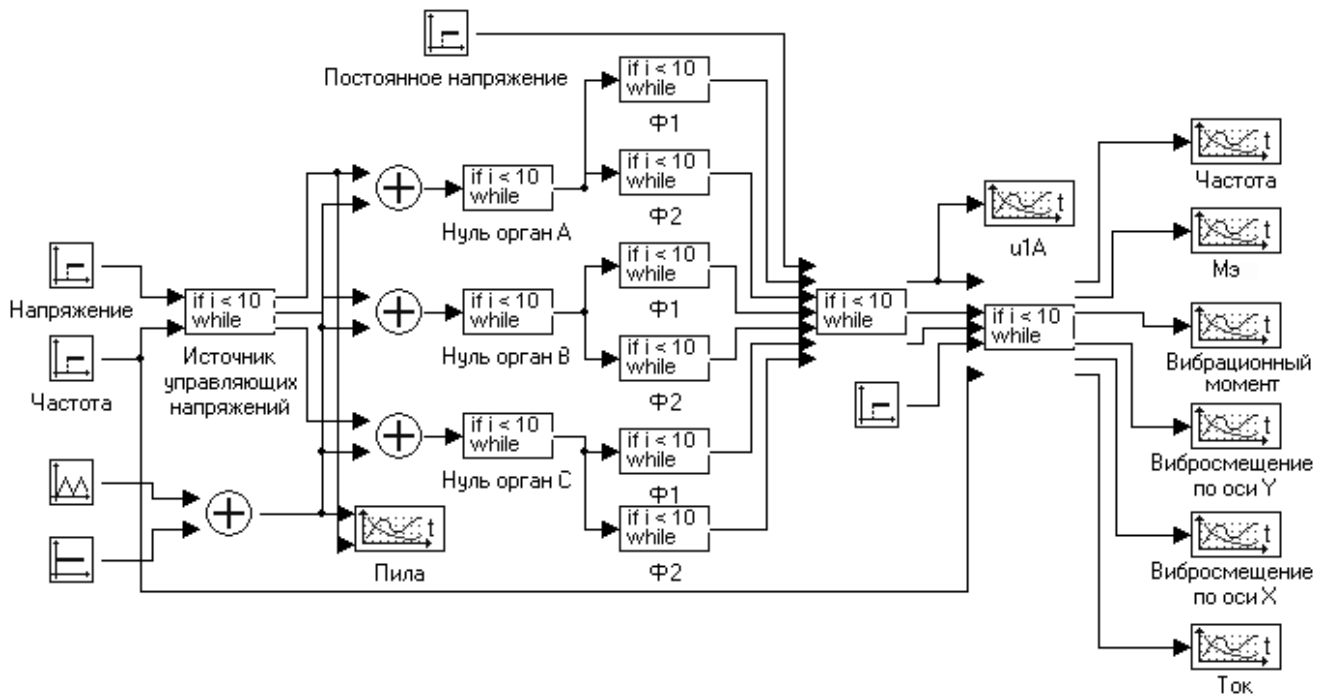


Рис. 1. Математическая модель вибрационной установки с направленными колебаниями платформы

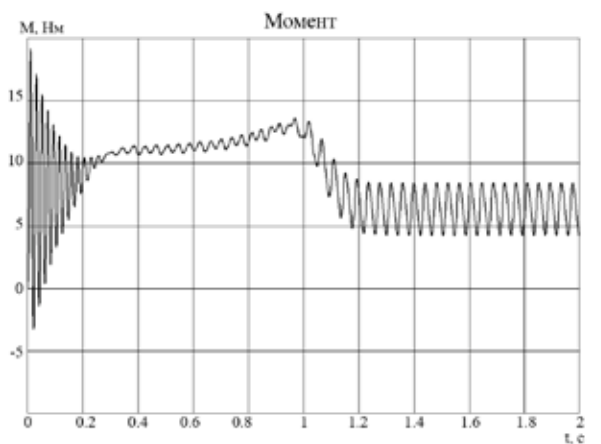
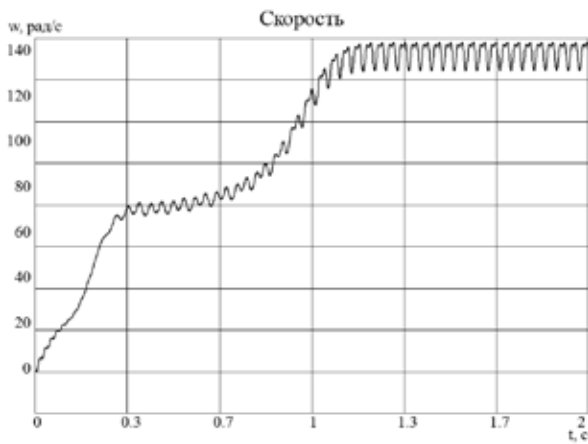


Рис. 2. Переходные процессы скорости и момента системы при эффекте Зоммерфельда

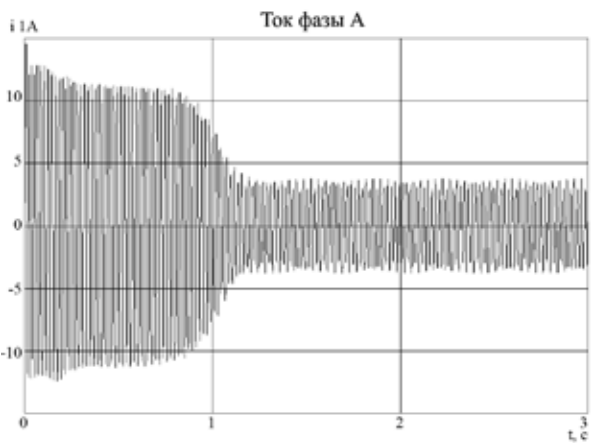
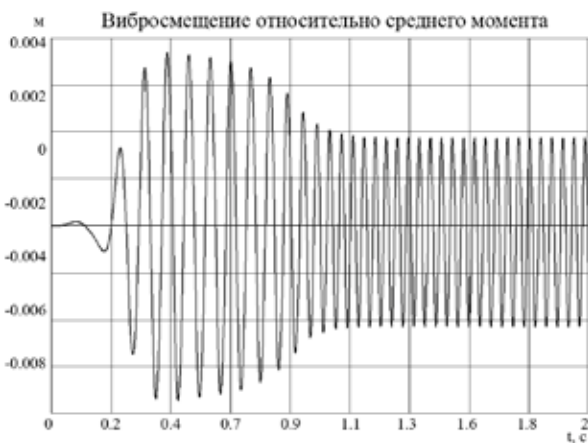


Рис. 3. Графики переходных процессов вибросмещения и тока фазы при эффекте Зоммерфельда

В системе без обратной связи были получены графики переходных процессов в случае так называемого эффекта Зоммерфельда, характеризующегося зависанием установки на резонансной частоте в процессе пуска в резонансный режим. Этот процесс характеризуется большой величиной амплитуды колебаний и тока фазы на участке, соответствующем резонансной частоте. Далее параметры системы выбираются таким образом, чтобы избежать эффекта Зоммерфельда. На рисунке 2 показаны графики частоты вращения вала и момента на валу вибродвигателя. На рисунке 3 показаны графики амплитуды вибро смещения платформы и тока фазы двигателя.

Частным случаем стабилизации амплитуды колебаний является поддержание максимальной амплитуды, то есть нахождение и поддержание резонансного режима работы. Для нахождения и поддержания резонанса в модели используется алгоритм выхода на заранее известную частоту [2], полученную из параметров системы:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (10)$$

где ω_0 – резонансная частота,

k – жесткость системы,

m – эффективная масса системы.

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.

Условием, при котором запускается подпрограмма поиска резонанса, является выход двигателя в номинальный режим. В математической модели ПК МВТУ это реализовано с помощью сравнения текущей скорости двигателя с его номинальной скоростью. Из графиков на рисунках 4 и 5 видно, что при настройке пусковой ток меньше, чем на рисунке 2.

На рисунке 6 представлена схема реализации в программном комплексе МВТУ математической модели одно-массовой вибрационной системы направленных колебаний с системой управления, включающей ПИД-регулятор.

В предыдущих случаях график переходного процесса скорости отличается выраженной колебательностью в связи с наличием источника вынуждающих колебаний на валу. Использование ПИД-регулятора в системе управления позволяет снизить колебательность процесса, что видно на рисунке 7. Также можно отметить уменьшение момента при пуске.

Как видно на рисунке 8, требуемое значение вибро смещения устанавливается за промежуток времени, сравнимый со временем переходного процесса частоты вращения без остаточных явлений от перерегулирования.

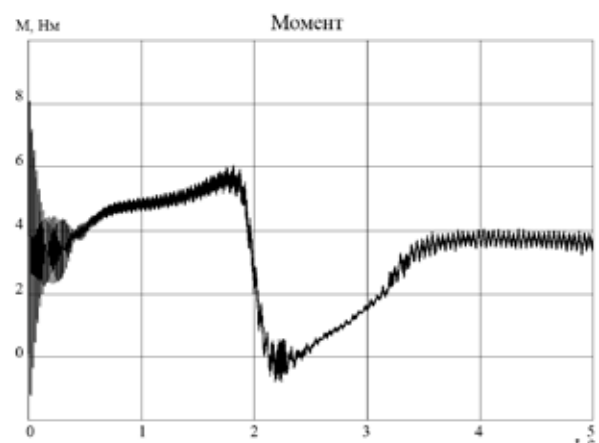
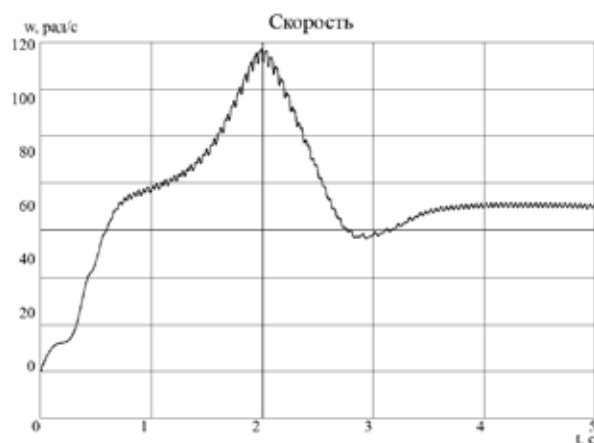


Рис. 4. Графики переходных процессов скорости и момента в системе, настроенной на резонанс

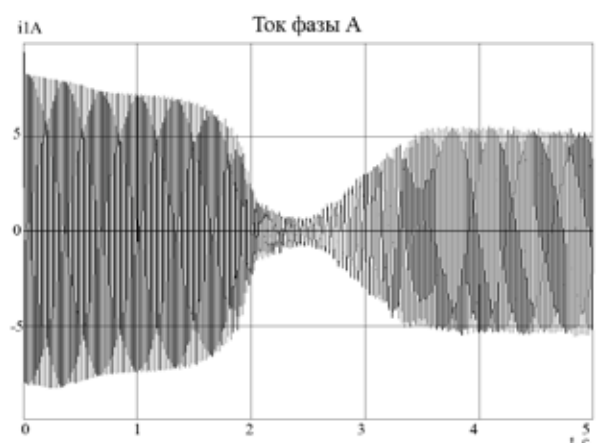
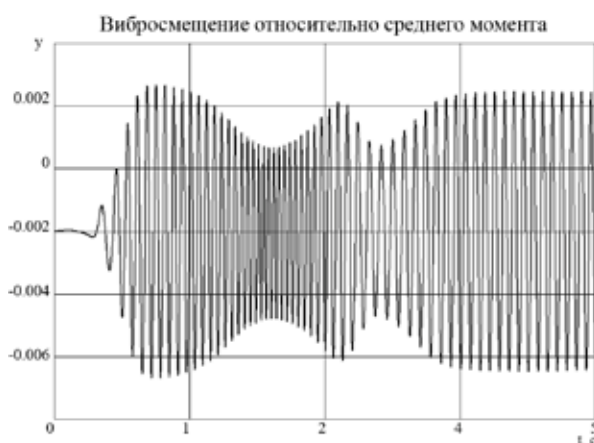


Рис. 5. Графики переходных процессов вибро смещения и тока фазы в системе, настроенной на резонанс

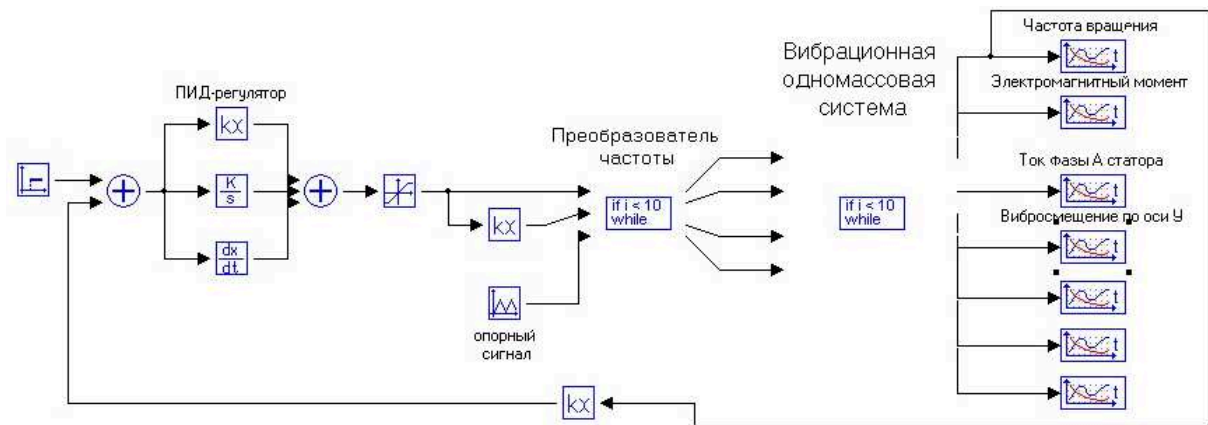


Рис. 6. Схема реализации математической модели вибрационной установки с направленными колебаниями платформы с системой управления, включающей ПИД-регулятор

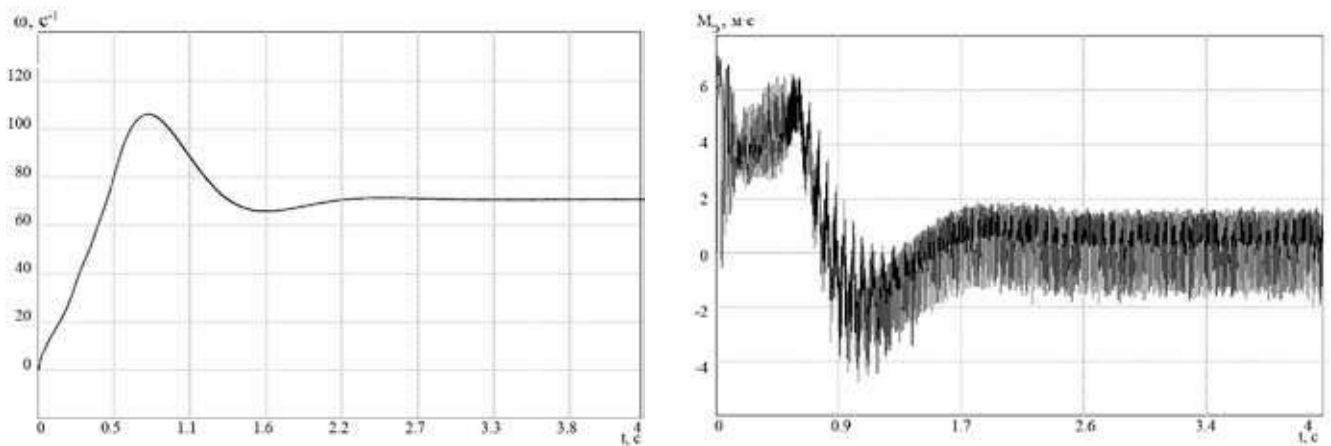


Рис. 7. Графики переходных процессов скорости и момента в системе стабилизации амплитуды колебаний с применением ПИД-регулятора

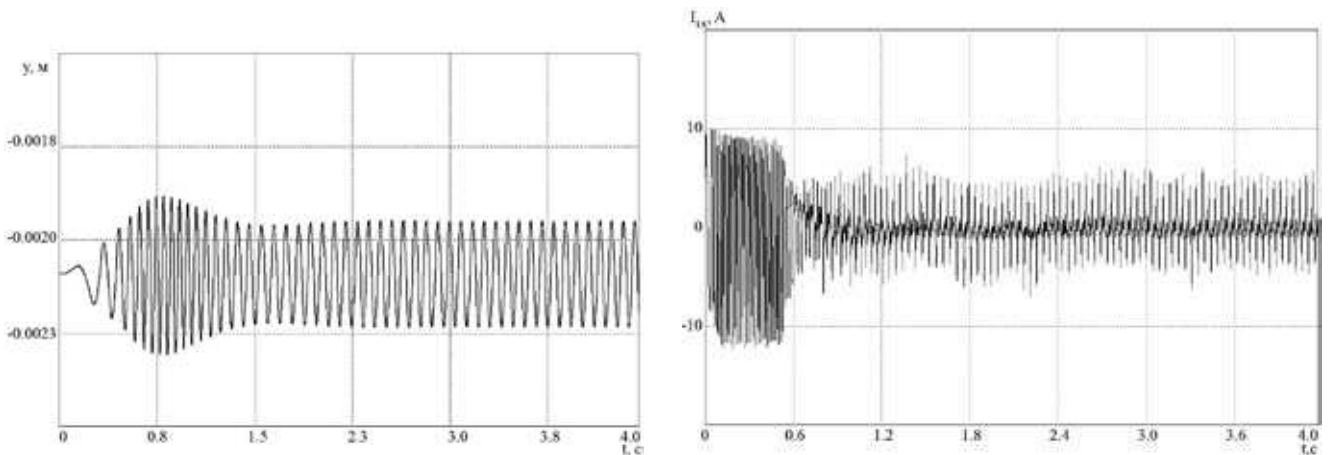


Рис. 8. Графики переходных процессов вибросмещения и тока фазы в системе с ПИД-регулятором

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе математической модели и результатов имитационного моделирования в программном комплексе МВТУ была выявлена возможность построения одно-массовой системы направленных колебаний с системой стабилизации амплитуды колебаний, в том числе в резонансном режиме, на основе асинхронного дебалансного электропривода с частотным управлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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