

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПИ", Харьков
И.В. БОВДУЙ, мл. науч. сотр., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков
А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков
Е.В. ВИНИЧЕНКО, мл. науч. сотр., НТЦ МТО НАН Украины,
Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТЕНДА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Розроблена математична модель імітаційного стенду двомасової електромеханічної системи та виконано експериментальне визначення параметрів такої моделі.

Разработана математическая модель имитационного стенда двухмассовой электромеханической системы и проведено экспериментальное определение параметров такой модели.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. При синтезе систем управления сложными многомассовыми электромеханическими системами с упругими и нелинейными элементами, необходима математическая модель, адекватная реальной системе. Достоверность результатов, полученных в ходе синтеза систем управления сложными многомассовыми электромеханическими объектами может быть проверена только при работе с реальным объектом. Одним из подходов к решению данной проблемы является использование стендов, повторяющих структуру объекта управления. При этом, первоначальная отладка регуляторов и сравнение их эффективности работы в условиях, максимально приближенных к реальным, выполняется на таком стенде, содержащем все необходимые элементы.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Исследовательские стенды для отладки программного обеспечения систем управления преобразователями с учетом особенностей кинематических связей между приводным двигателем и рабочим механизмом выпускаются многими электротехническими фирмами. Однако стоимость подобных стендов многократно превышает первоначальную стоимость серийных преобразователей и двигателей. В работах [1-2] рассматриваются вопросы разработки таких стендов.

Цель работы. Разработка математической модели стенда двухмассовой электромеханической системы и исследование ее динамических характеристик.

Изложение материала исследования, полученных научных

результатов. Стенд двухмассовой электромеханической системы, схема которого показана на рис. 1, содержит две одинаковые электрические машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа ДПТ-25-Н2, роторы которых связаны между собой пружиной с жесткостью C . Предполагается, что одна машина будет работать в двигательном режиме, а другая в генераторном, с помощью которой будет имитироваться активный момент нагрузки. При необходимости, первая машина может также работать в режиме торможения. На роторах каждой машины установлены оптические дискретные датчики углового положения ДП₁, ДП₂ с помощью которых измеряются также и угловые скорости роторов.

На валах каждой машины установлены тормозные устройства так, что моменты сухого трения каждой машины равны естественному моменту сухого трения машины и регулируемому с помощью тормозных устройств дополнительному моменту внешнего трения. Необходимость механических тормозов на роторах обеих машин обусловлена тем, что предполагается отладка алгоритмов управления при движении на малых скоростях, когда возникают фрикционные колебания, параметры которых определяются упругой связью между роторами машин и сухим трением на валах машин. Такой режим прилипания и срыва характерен при движении подвижных частей исполнительного двигателя и рабочего органа многих машин и механизмов с трением на малых скоростях. Причем, в ряде случаев такой режим работы является нормальным, а для многих механизмов такой режим работы является аварийным.

Для измерения угла поворота вала двигателей ввиду малых конструктивных размеров и требования отсутствия дополнительных масс вносимых датчиками, использован оптический датчик PAN3101, фирмы PixArt Imaging Inc., применяемый для измерения линейных перемещений в оптических манипуляторах. Датчик обладает высокой разрешающей способностью, до 800 срi, и быстродействием, что позволяет измерять линейную скорость до 0,53 м/с. Разрешающая способность по углу поворота датчика зависит от его месторасположения относительно центра вала двигателя и при необходимости может быть увеличена. Данные измерений считываются по последовательному интерфейсу в МК, где используются как технологические в процессе управления и информационные для передачи в ПЭВМ.

Принимаем такие положительные направления вращения первого и второго двигателей, при которых положительные значения напряжений на якорных цепях двигателей приводят к увеличению скоростей вращения двигателей. Положительное значение момента упругости соответствует положительной разности углов между первым и вторым двигателем та-

ким образом, что положительное значение момента упругости приводит к разгону второго двигателя и к торможению первого двигателя. Тогда получим следующие уравнения динамики движения роторов первого и второго двигателей

$$J_{\text{д1}} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\text{д1}} - M_{\Sigma} - M_c(\omega_1),$$

$$J_{\text{д2}} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{д2}} + M_{\Sigma} - M_c(\omega_2),$$

В этих уравнениях суммарный момент M_{Σ} , передаваемый пружиной, равен сумме моментов упругости M_y и момента вязкого трения $M_{\text{вт}}$, так что

$$M_{\Sigma} = M_y + M_{\text{вт}}.$$

Для моментов упругости M_y и момента вязкого трения $M_{\text{вт}}$ получим следующие уравнения

$$M_y = C(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$M_{\text{вт}} = \beta(\omega_1 - \omega_2).$$

Так как упругий элемент – пружина является накопителем потенциальной энергии, то путем дифференцирования обеих частей исходного уравнения для упругого момента может быть получено следующее дифференциальное уравнение состояния для момента упругости

$$\frac{dM_y}{dt} = C(\omega_1 - \omega_2).$$

Моменты двигателей $M_{\text{д1}}$, $M_{\text{д2}}$ связаны с токами якорных цепей $I_{\text{я1}}$, $I_{\text{я2}}$ уравнениями

$$M_{\text{д1}} = C_1 \Phi_1 I_{\text{я1}},$$

$$M_{\text{д2}} = C_2 \Phi_2 I_{\text{я2}},$$

где C_1 , C_2 конструктивные постоянные двигателей, Φ_1 , Φ_2 потоки возбуждения двигателей.

Уравнения равновесия ЭДС якорных цепей двигателей имеют следующий вид

$$T_{\text{э1}} \frac{dI_{\text{я1}}}{dt} + I_{\text{я1}} = \frac{1}{R_1} [U_{\text{я1}} - K_1 \Phi_1 \omega_{\text{д1}}],$$

$$T_{\text{э2}} \frac{dI_{\text{я2}}}{dt} + I_{\text{я2}} = \frac{1}{R_2} [U_{\text{я2}} - K_2 \Phi_2 \omega_{\text{д2}}].$$

Для управления режимом работы основного и нагрузочного дви-

гателей M_1 и M_H , работающих в 4-х квадрантах, необходимо сформировать сигналы питающего напряжения ДПТ, измерить величины токов и углов поворота вала двигателей. Величина напряжения питания двигателей задается 8-разрядными таймерами МК, работающих в режиме ШИМ. Направление вращения двигателя задается дискретным сигналом, на основе анализа направления тока в конкретном двигателе. Формирование питающего напряжения двигателей по уровню и току выполняется 4-х канальным драйвером L293D фирмы SGS-Thomson, 2 канала которого образуют H-мост для одного двигателя.

Драйвер двигателей, работая в ключевом режиме обладает значительным динамическим диапазоном коммутации (до 5 кГц), высокой перегрузочной способностью по току (до 2-х кратного превышения тока замыкания двигателя), температурной защитой и возможностью блокировки выходного напряжения каждого моста. Для управления драйвером двигателей необходим модуль контроля запрета одновременного включения плечей H-моста, либо организовать дополнительный программный контроль состояния сигналов управления мостом.

Так как частота коммутации широтно-импульсных преобразователей усилителей мощности УМ₁, УМ₂, питающих якорные цепи двигателей, составляет около 5 кГц, то динамикой этих усилителей можно пренебречь и считать их безинерционными. Тогда получим следующие уравнения, связывающие входные напряжения U_1 , U_2 широтно-импульсных преобразователей с их выходными напряжениями, приложенными к якорным цепям $U_{я1}$, $U_{я2}$ двигателей:

$$U_{я1} = K_{ум1}U_1,$$

$$U_{я2} = K_{ум2}U_2,$$

где $K_{ум1}$, $K_{ум2}$ – коэффициенты усиления широтно-импульсных преобразователей.

Примем компоненты вектора переменных состояния в следующем виде: ток якорной цепи первого двигателя $I_{я1}$, скорость ω_1 и угол φ_1 поворота первого двигателя, момент упругости M_y пружины связывающей валы двигателей, угол φ_2 и скорость ω_2 поворота вала второго двигателя и ток якорной цепи второго двигателя $I_{я2}$. Тогда вектор состояния примет следующий вид

$$\vec{X}(t) = [I_{я1}, \omega_1, \varphi_1, M_y, \varphi_2, \omega_2, I_{я2}]^T.$$

Примем вектор управления в следующем виде

$$\vec{U} = [U_1, U_2]^T.$$

Примем вектор моментов сопротивления \vec{M} в следующем виде

$$\vec{M} = [M_{c1}, M_{c2}]^T.$$

Тогда матрицы состояния А управления В и возмущения F примут следующий вид:

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \frac{1}{T_{\text{эл}}} & \frac{-C_1\Phi_1}{R_1T_{\text{эл}}} & & & \\ \hline \frac{C_1\Phi_1}{J_{\text{д1}}} & \frac{-\beta-\beta_{c1}}{J_{\text{д1}}} & -\frac{1}{J_{\text{д1}}} & \frac{\beta}{J_{\text{д1}}} & \\ \hline & 1 & & & \\ \hline & C & & -C & \\ \hline & & & 1 & \\ \hline & \frac{\beta}{J_{\text{д2}}} & \frac{1}{J_{\text{д2}}} & \frac{-\beta-\beta_{c2}}{J_{\text{д2}}} & \frac{C_2\Phi_2}{J_{\text{д2}}} \\ \hline & & & \frac{-C_2\Phi_2}{R_2T_{\text{эл}}} & \frac{1}{T_{\text{эл}}} \\ \hline \end{array} \quad B = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{K_{\text{ум1}}}{R_1T_{\text{эл}}} & \\ \hline & \frac{K_{\text{ум2}}}{R_2T_{\text{эл}}} \\ \hline \end{array} \quad F = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline -\frac{1}{J_{\text{д1}}} & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \frac{1}{J_{\text{д2}}} \\ \hline \end{array}$$

На рис. 1 показана схема стэнда, где показаны также моменты внешнего трения M_{c1} , M_{c2} на валах двигателей.

Приведем параметры двигателей: $R_{\text{я}} = 69,17 \text{ Ом}$; $T_{\text{я}} = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $K_{\text{м}} = 0,025 \text{ Н·м/А}$; $M_{\text{E}} = 0,045 \text{ В·с/рад}$; $J_{\text{д}} = 0,16 \cdot 10^{-7} \text{ кг·м}^2$.

Для синтеза системы управления стэндом двухмассовой электро-механической системы необходима математическая модель, адекватно описывающая динамические процессы. С этой целью были произведены всесторонние испытания стэнда.

Постоянная времени электромагнитных процессов $T_{\text{э}}$ характеризует переходные процессы в якорной цепи двигателя при заторможенном роторе двигателя для устранения влияния противоЭДС двигателя. По экспериментальным зависимостям переходных процессов тока якорной цепи экспериментальные значения постоянной времени якорной цепи составит $T_{\text{э}} = 2,26 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

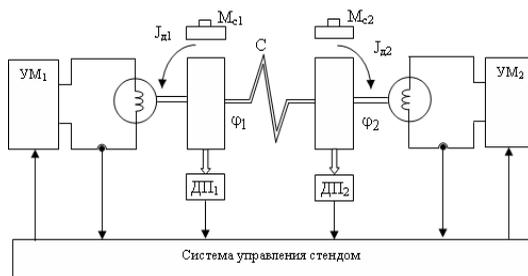


Рис. 1. Схема стэнда

Экспериментально определялись суммарные моменты инерции первого и второго двигателей: $J_{\Sigma 1} = 2 \cdot 10^{-5}$ и $J_{\Sigma 2} = 1,95 \cdot 10^{-5}$. Заметим, что эти моменты инерции в основном определяются моментами инерции дисков цифровых датчиков углового положения двигателей, так как моменты инерции собственно двигателей меньше суммарных моментов более чем на два порядка.

Кроме этих параметров экспериментально определялся также момент трогания двигателя, соответствующий напряжению трогания $U_{\text{тр}} = 1,5$ В. При этом момент трогания $M_{\text{тр}} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ Н·м.

В ходе проведения эксперимента определялась жесткость пружины. С этой целью эксперимент проходил в следующих условиях: первый двигатель заторможен, а на второй двигатель подается номинальное напряжение. При этом ток второго двигателя составлял 165,0 миллиампер, напряжение на втором двигателе равно 25,7 В, а разность углов составляет 1,44 радиана. Расчетное значение жесткости пружины при этом составляет $C = 0,0029$ Н·м/рад.

В качестве примера рассмотрим экспериментальные переходные процессы угла поворота второго двигателя при остановке первого двигателя на стенде. Эксперимент проходил в следующих условиях: на первый двигатель подается максимальное напряжение и двигатель разгоняется до максимальной скорости. Двигатели связаны пружиной. После разгона первого двигателя, его вал резко затормаживается, и записываются колебания угла поворота второго двигателя, показанные на рис. 2.

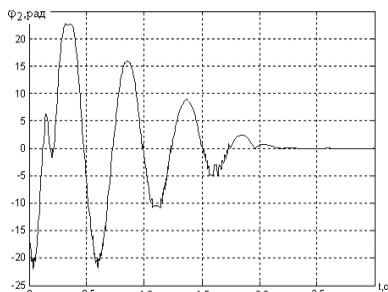


Рис. 2. Переходный процесс угла поворота второго двигателя при остановке первого двигателя

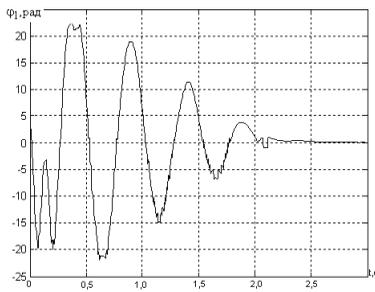


Рис. 3. Переходный процесс угла поворота первого двигателя при остановке второго двигателя

Как следует из рисунка, в системе возникают собственные механические колебания частотой 1,97 Гц. На рис. 3 показаны переходные процессы для случая, когда двигатели поменяли местами. Как следует из рисунка 3, в

системе возникают собственные механические колебания частотой 2,03 Гц. Таким образом, в переходных процессах стэнда двухмассовой электромеханической системы возникают собственные механические колебания частотой около 2 Гц, обусловленные наличием упругой связи между валами приводного двигателя и двигателя, имитирующего рабочий механизм.

Для проверки правильности расчетного и экспериментального определения параметров механической части стэнда выполним следующие проверочные расчеты. При торможении вала двигателя в системе устанавливаются собственные механические колебания частотой около 2 Гц. Принимая модель такой системы в виде одномассовой электромеханической системы, так как вал одного двигателя резко остановлен и фактически жестко закреплен, а вал второго двигателя совершает свободные механические колебания частотой 2 Гц, при жесткости пружины $C = 0,0029 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$, момент инерции подвижной массы составляет $J = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, что соответствует экспериментально определенным значениям суммарных моментов инерции первого и второго двигателей.

В качестве примера на рис. 4 показан переходный процесс момента упругости разработанной математической модели стэнда при подаче на вход первого двигателя номинального напряжения. Как видно из этого рисунка, в системе возникают собственные механические колебания частотой около 2,5 Гц. На рис. 5 показан переходный процесс момента упругости разработанной математической модели стэнда при подаче на вход второго двигателя номинального напряжения. Как видно из этого рисунка, в системе также возникают собственные механические колебания частотой около 2,5 Гц.

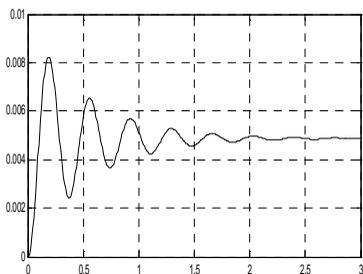


Рис. 4. Переходный процесс момента упругости при подаче на вход первого двигателя номинального напряжения

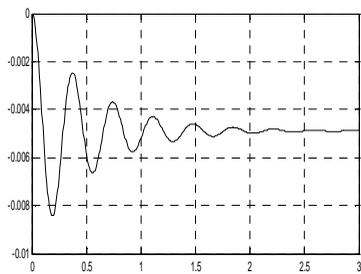


Рис. 5. Переходный процесс момента упругости при подаче на вход второго двигателя номинального напряжения

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана математическая модель стенда двухмассовой электромеханической системы, определены ее параметры и приведены динамические характеристики стенда и математической модели.

Список литературы: 1. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федорик Р.В. Практическая реализация цифровых САУ в среде пакета Матлаб с использованием платформы реального времени "QNX TARGET" // Вісник НТУ "ХПИ". Сер. Електротехніка, електроніка і електропривод. – 2002. – № 2, Т. 1. – С. 98-101. 2. Зеленов А.Б., Полилов Е.В., Щелоков А.Г. Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом // Вестник НТУ "ХПИ". Сер. Електротехніка, електроніка і електропривод. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – № 12. – Т. 2. – С. 472-475. 3. Войтенко В.П., Хоменко М.А. Встраиваемая система позиционирования с нейрорегулятором // Технічна електродинаміка, тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – Київ – 2008, Ч. 1. – С. 71-74. 4. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами / Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 320 с. 5. Кузьминов А.Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. – М.: Радио и связь, 2004. – 168 с. 6. Трапперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров. / Пер. с нем. – К.: "МК Пресс", 2006. – 208 с. 7. Гук М.Ю. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. / 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 1072 с. 8. CodeVisionAVR v.1.23.8d User Manual. Rev. 17.5.2003: Pavel Naiduc and HP Info Tech S.R.L., 2003. – 200 с. 9. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Издательский дом "Додека-XXI", 2007. – 592 с.

Поступила в редколлегию 05.02.2009