УДК 621.77

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, доц, НТУ "ХПИ", Харьков **И.В. БОВДУЙ**, к.т.н., научный сотрудник, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков **Е.В. ВИНИЧЕНКО**, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТЕНДА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЦИФРОВОМ УПРАВЛЕНИИ

Розроблена математична модель імітаційного стенду двомасової електромеханічної системи та наведені її експериментальні характеристики.

Разработана математическая модель имитационного стенда двухмассовой электромеханической системы и приведены ее экспериментальные характеристики.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. При синтезе систем управления сложными многомассовыми электромеханическими системами с упругими и нелинейными элементами, необходима математическая модель, адекватна 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, имитирующих 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. В работах [1-3] рассмотрены вопросы синтеза систем управления стендом для математической модели стенда при непрерывном управлении. Все современные системы управления стендами построены на цифровой элементной базе.

Цель работы. Целью данной работы является разработка матема-

ISSN 2079-3944. Bichuk HTY "XIII". 2011. № 4

тической модели стенда двухмассовой электромеханической системы как объекта управления при цифровом управлении и исследование его динамических характеристик.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. На рис. 1 показана схема стенда, где также показаны моменты внешнего трения M_{c1} , M_{c2} на валах двигателей.

Стенд двухмассовой электромеханической системы содержит две одинаковые электрические машины постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа ДПТ-25-H2, роторы которых связаны между собой пружиной с жесткостью C. На роторах каждой машины установлены оптические дискретные датчики углового положения ДП $_1$, ДП $_2$ с помощью которых измеряются также и угловые скорости роторов [4-9].

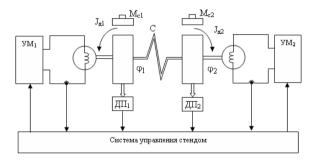


Рис. 1. Схема стенда.

Приведем основные уравнения динамики движения роторов первого и второго двигателей

$$J_{\pi 1} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\pi 1} - M_{\Sigma} - M_c(\omega_1),$$

$$J_{\text{M2}} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{M2}} + M_{\sum} - M_c(\omega_2).$$

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

$$M_{\Sigma} = M_{\rm V} + M_{\rm BT}$$
.

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

$$M_{y} = C(\varphi_{1} - \varphi_{2}),$$

 $M_{BT} = \beta(\omega_{1} - \omega_{2}).$

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 $M_{\rm nl},~M_{\rm n2}$ связаны с токами якорных цепей $I_{\rm N1},~I_{\rm N2}$ уравнениями

$$M_{\pi 1} = C_1 \Phi_1 I_{\pi 1},$$

 $M_{\pi 2} = C_2 \Phi_2 I_{\pi 2},$

где C_1 , C_2 – конструктивные постоянные двигателей;

 Φ_1 , Φ_2 – потоки возбуждения двигателей.

Уравнения равновесия ЭДС якорных цепей двигателей имеют следующий вид

$$\begin{split} T_{31} \frac{dI_{\text{M1}}}{dt} + I_{\text{M1}} &= \frac{1}{R_1} \big[U_{\text{M1}} - K_1 \Phi_1 \omega_{\text{M1}} \big], \\ T_{32} \frac{dI_{\text{M2}}}{dt} + I_{\text{M2}} &= \frac{1}{R_2} \big[U_{\text{M2}} - K_2 \Phi_2 \omega_{\text{M2}} \big]. \end{split}$$

Для управления режимом работы основного и нагрузочного двигателей M_1 и $M_{\rm H}$, 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 [4-7].

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 Н-моста, либо организовать дополнительный программный контроль состояния сигналов управления мостом.

Так как частота коммутации широтно-импульсных преобразователей усилителей мощности ${\rm YM_1},~{\rm YM_2},~{\rm питающиx}$ 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 $U_{\rm 9,1},~U_{\rm 9,2}$ двигателей:

$$U_{\text{M1}} = K_{\text{yM1}} U_1,$$

 $U_{\text{M2}} = K_{\text{vM2}} U_2,$

где $K_{\rm ym1}$, $K_{\rm ym2}$ — коэффициенты усиления широтно-импульсных преобразователей.

Примем компоненты вектора переменных состояния в следующем виде: ток якорной цепи первого двигателя $I_{\rm g1}$, скорость ω_1 и угол ϕ_1 поворота первого двигателя, момент упругости $M_{\rm y}$ пружины связывающей валы двигателей, угол ϕ_2 и скорость ω_2 поворота вала второго двигателя и ток якорной цепи второго двигателя $I_{\rm g2}$. Тогда вектор состояния примет следующий вид

$$\vec{X}(t) = \left[I_{\text{R1}}, \omega_{1}, \varphi_{1}, M_{\text{V}}, \varphi_{2}, \omega_{2}, I_{\text{R2}}\right]^{T}.$$

Примем вектор управления в следующем виде

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

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

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

Матрицы состояния A управления B и возмущения F приведенные на следующей странице.

Для этого непрерывного объекта управления построим его дискретный аналог

$$\vec{x}_{\mathrm{\Pi}}\left(k+1\right) = A_{\mathrm{\Pi}}\vec{x}_{\mathrm{\Pi}}\left(k\right) + B_{\mathrm{\Pi}}\vec{u}\left(k\right) + F_{\mathrm{\Pi}}M_{c}\left(k\right),$$
 где $A_{\mathrm{\Pi}} = \mathrm{I} + \frac{A_{0}\Delta}{1!} + \frac{A_{0}^{2}\Delta^{2}}{2!} + ... + \frac{A_{0}^{n}\Delta^{n}}{n!}$;

							W		Ι.		
	1	$-C_1\Phi_1$				1	K_{ym1}				
							$R_1T_{\ni 1}$			1	
	T_{91}	R_1T_{91}				;	141231		, F =		
	$C_{\mathbf{l}}\Phi_{\mathbf{l}}$	$-\beta-\beta_{c1}$	1	β						$J_{\mu 1}$	
	$J_{\rm \chi 1}$	$J_{\mu 1}$	$J_{\mu 1}$	$J_{\mu 1}$							
		1				B =					
A =		С		- C					İ		
				1							1
		β	1	$-\beta-\beta_{c2}$	$C_2\Phi_2$			К _{ум2}			$J_{\mu 2}$
		$J_{\mu 2}$	$J_{\mu 2}$	$J_{\mu 2}$	$J_{\mu 2}$						- д2
				$-C_2\Phi_2$	_ 1			R_2T_{92}			
				R_2T_{22}	T_{22}						

Для полученной исходной дискретной системы представим матрицы управления $B_{\rm д}$ по входному напряжению и матрицу $F_{\rm d}$ по вектору моментов сопротивления в следующем виде:

При управлении двигателем постоянного тока от широтноимпульсного преобразователя с помощью программно-аппаратных средств напряжение на якорной цепи двигателя изменяется с частотой коммутации ключей мостовой схемы. Примем математическую модель изменения напряжения на якорных цепях двигателей в виде звеньев чистого запаздывания с временем запаздывания, равному периоду дискретности работы управляющего контроллера. Тогда разностные уравнения динамики, описывающие изменение напряжений на якорных цепях двигателей, в цифровой системе, примут следующий вид

$$U_{\Pi 1}(\kappa+1) = U_1(\kappa),$$

 $U_{\Pi 2}(\kappa+1) = U_2(\kappa).$

Введем вектор состояния этой дискретной системы в следующем виде:

$$\vec{X}(t) = [I_{\text{g1}}, \omega_{1}, \varphi_{1}, M_{\text{y}}, \varphi_{2}, \omega_{2}, I_{\text{g2}}, U_{\text{д1}}, U_{\text{д2}}]^{T}$$
.

Тогда с учетом введенных обозначений блоков матриц состояния и управления вспомогательной дискретной системы матрицы состояния, управления по вектору задающих напряжений на якорной цепи двигателей и матрица возмущения F по моментам сопротивлений разомкнутой системы примут следующий вид:

По полученным матрицам состояния, управления по заданиям на-

ISSN 2079-3944. Bichuk HTY "XIII". 2011. № 4

пряжений на якорные цепи двигателей и возмущения по моментам сопротивлений могут быть построены переходные процессы исходной системы управления.

Рассмотрим теперь упрощенную математическую модель стенда при цифровом управлении для случая, когда система управления замкнута по углу поворота второго двигателя. При этом для упрощения синтеза системы управления постоянными времени якорных цепей двигателей будем пренебрегать. Для синтеза такой системы управления необходима математическая модель стенда как объекта управления углом поворота второго двигателя. При этом первый двигатель является приводным, а второй двигатель является нагрузочным.

Введем вектор состояния в следующем виде

$$\vec{x}(t) = [\omega_1, M_y, \omega_2, \varphi_2].$$

Тогда матрицы состояния A, управления B и возмущения F по моменту сопротивления на второй двигатель примут следующий вид

A =	$-\frac{C_E C_{\rm M}}{R J_1} -$	$\frac{\beta}{J}$	$-\frac{1}{J}$	$\frac{\beta}{J}$			$\frac{C_M}{RJ_1}$			
	C			-C		, B =	1	F =	1	١.
	$\frac{eta}{J_2}$		1	β		<i>B</i> -		' <i>F</i> –		
			$\overline{J_2}$	$\overline{J_2}$					J_2	
				1						

Параметры этой математической модели уже определены по экспериментальным характеристикам, снятым на стенде.

Для этого непрерывного объекта управления построим его дискретный аналог

$$\vec{x}_{\mathrm{J}}\left(k+1\right) = A_{\mathrm{J}}\vec{x}_{\mathrm{J}}\left(k\right) + B_{\mathrm{J}}\vec{u}\left(k\right) + F_{\mathrm{J}}M_{\mathrm{C}}\left(k\right),$$
 где $A_{\mathrm{J}} = \mathrm{I} + \frac{A_{0}\Delta}{1!} + \frac{A_{0}^{2}\Delta^{2}}{2!} + ... + \frac{A_{0}^{n}\Delta^{n}}{n!}$.

При управлении двигателем постоянного тока от широтноимпульсного преобразователя с помощью программно-аппаратных средств напряжение на якорной цепи двигателя изменяется с частотой коммутации ключей мостовой схемы. Примем математическую модель изменения напряжения на якорных цепях двигателей в виде звеньев чистого запаздывания с временем запаздывания, равному периоду дискретности работы управляющего контроллера. Тогда разностное уравнение динамики, описывающие изменение напряжения на якорной цепи первого двигателя, в цифровой системе, примет следующий вид

$$U_{\Pi^1}(\kappa+1)=U_1(\kappa),$$

Введем вектор состояния этой дискретной системы в следующем виде:

$$\vec{x}(t) = [\omega_1, M_y, \omega_2, \varphi_2, U_{\pi 1}].$$

Тогда с учетом введенных обозначений матриц состояния, управления и исходной дискретной системы матрицы состояния, управления B по заданию на напряжение на якорной цепи первого двигателя и матрица возмущения F по моменту сопротивления разомкнутой системы примут следующий вид:

По полученным матрицам состояния, управления по заданию на напряжение первого двигателя и возмущения по моменту сопротивления на второй двигатель могут быть построены переходные процессы исходной цифровой системы управления.

Результаты моделирования экспериментальных И исследований. На рис. 2 показаны экспериментальные переходные процессы переменных состояния: а) угла поворота первого двигателя; б) угла поворота второго двигателя; в) скорости угла поворота первого двигателя; г) скорости угла поворота второго двигателя; д) момента упругости вала двигателей и е) напряжения на якорной цепи первого двигателя стенда типовым П-регулятором. Сравнение экспериментальных переходных процессов, полученных на стенде двухмассовой электромеханической системы c модельными переходными процессами, полученными на ЭВМ, показывает их достаточно хорошее совпадение.

Однако экспериментальные переходные процессы переменных состояния скоростей вращения роторов двигателей и напряжения на якорной цепи двигателя, полученные на стенде, содержат высокочастотные составляющие, а модельные переходные процессы этих же переменных состояния изменяются более плавно. Заметим, что на качество переходных процессов существенное влияние оказывают характеристики нелинейностей исполнительных двигателей и именно они определяют потенциальную точность системы.

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления Разработана математическая модель стенда двухмассовой электромеханической системы при цифровом управлении. Приведены экспериментальные динамические характеристики стенда.

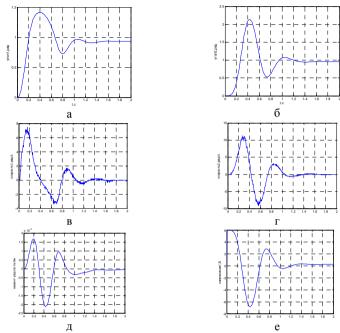


Рис. 2. Переходные процессы а) угла поворота первого двигателя; б) угла поворота второго двигателя; в) скорости угла поворота первого двигателя; г) скорости угла поворота второго двигателя; д) момента упругости вала двигателей и е) напряжения на якорной цепи первого двигателя стенда с типовым П-регулятором.

Список литературы: 1. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Математическая модель стенда двухмассовой электромеханической системы / Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2009. – № 7. – С. 110-117. 2. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Робастное управление стендом двухмассовой электромеханической системы / Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 28. – С. 180-181. 3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Синтез робастного регулятора стенда двухмассовой электромеханической системы / Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – Київ: 2009. – Ч. 2. – С. 98-103. 4. 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 Національного технічного університету "ХПИ". Тем. вып. "Электротехника, электроника и электропривод". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 2. – С.

98-101. **5**. Зеленов А.Б., Полилов Е.В., Щелоков А.Г. Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Тем вып. "Электротехника, электроника и электропривод". — Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. — № 12. — С. 472-475. **6**. Войменко В.П., Хоменко М.А. Встраиваемая система позиционирования с нейрорегулятором // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2008. — С. 71-74. **7**. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами: Пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2003. — 320 с. **8**. *Кузьминов А.Ю*. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. — М.: Радио и связь, 2004. — 168 с.



Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф., заведующий отделом Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины. Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления.



Никитина Татьяна Борисовна, к.т.н., докторант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета "ХПИ", защитила кандидатскую диссертацию в 2001 году по синтезу систем управления главными электроприводами блюминга в режиме пробуксовки валков



Волошко Александр Валерьевич, м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Бовдуй Игорь Валентинович, к.т.н., с.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Виниченко Елена Владимировна м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины

Поступила в редколлегию 25.01.2011 Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.

ISSN 2079-3944. Bichuk HTY "XIII". 2011. № 4