

**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**, канд. техн. наук, 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

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СКОРОСТИ СТЕНДА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Розроблена математична модель і методика синтезу різних типів регуляторів швидкості стенду двомасової електромеханічної системи. Приведені експериментальні перехідні процеси стенду по швидкості з синтезованим регулятором.

Разработана математическая модель и методика синтеза различных типов регуляторов скорости стенда двухмассовой электромеханической системы. Приведены экспериментальные переходные процессы стенда по скорости с синтезированными регулятором.

**Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами.** При синтезе систем управления сложными многомассовыми электромеханическими системами с упругими и нелинейными элементами используют стенды, имитирующие структуру объекта управления.

**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 рассматриваются в работах [1-8].

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка математической модели и методики синтеза типовых и робастных регуляторов скорости вращения двигателей стенда двухмассовой электромеханической системы, а также экспериментальное исследование динамических характеристик синтезированных систем на стенде.

**Результаты исследований.** Стенд двухмассовой электромеханической системы содержит две одинаковые электрические машины постоянного тока, роторы которых связаны между собой пружиной с жесткостью. На роторах каждой машины установлены оптические дискретные датчики углового положения, с помощью которых измеряются и угловые скорости роторов двигателей.

Для синтеза системы управления необходима математическая модель стенда как объекта управления. Рассмотрим математическую модель исследовательского стенда двухмассовой электромеханической системы при управлении скоростью валов двигателей.

Приведем основные уравнения динамики движения роторов первого и второго двигателей

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

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

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

$$M_{\Sigma} = M_y + M_{вт}.$$

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

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

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

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

$$M_{д1} = C_1 \Phi_1 I_{я1};$$

$$M_{д2} = C_2 \Phi_2 I_{я2},$$

где  $C_1, C_2$  – конструктивные постоянные двигателей;  $\Phi_1, \Phi_2$  – потоки возбуждения двигателей.

Уравнения равновесия ЭДС якорных цепей двигателей имеют следующий вид

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

$$T_{\vartheta 2} \frac{dI_{я2}}{dt} + I_{я2} = \frac{1}{R_2} [U_{я2} - K_2 \Phi_2 \omega_{д2}].$$

Так как частота коммутации широтно-импульсных преобразователей усилителей мощности УМ<sub>1</sub>, УМ<sub>2</sub>, питающих якорные цепи двигателей, составляет около 7 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  $\omega_1$  вращения первого двигателя, момент упругости  $M_y$  пружины связывающей валы двигателей, скорость  $\omega_2$  вращения вала второго двигателя и ток якорной цепи второго двигателя  $I_{я2}$ . Тогда вектор состояния примет следующий вид

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

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:

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline \frac{1}{T_{\text{э}1}} & \frac{-C_1\Phi_1}{R_1T_{\text{э}1}} & & & \\ \hline \frac{C_1\Phi_1}{J_{\text{д}1}} & \frac{-\beta - \beta_{c1}}{J_{\text{д}1}} & \frac{-1}{J_{\text{д}1}} & \frac{\beta}{J_{\text{д}1}} & \\ \hline & C & & -C & \\ \hline & \frac{\beta}{J_{\text{д}2}} & \frac{1}{J_{\text{д}2}} & \frac{-\beta - \beta_{c2}}{J_{\text{д}2}} & \frac{C_2\Phi_2}{J_{\text{д}2}} \\ \hline & & & \frac{-C_2\Phi_2}{R_2T_{\text{э}2}} & \frac{-1}{T_{\text{э}2}} \\ \hline \end{array};$$

$$B = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{K_{\text{ум}1}}{R_1T_{\text{э}1}} & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \frac{K_{\text{ум}2}}{R_2T_{\text{э}2}} \\ \hline \end{array};$$

$$F = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline \frac{1}{J_{\text{д}1}} & \\ \hline & \\ \hline & \frac{1}{J_{\text{д}2}} \\ \hline & \\ \hline \end{array}.$$

**Результаты моделирования и экспериментальных исследований.** Рассмотрим вначале переходные процессы с пропорциональным регулятором, замкнутым по скорости вращения второго двигателя. Переходные процессы переменных состояния показаны на рис. 1. Коэффициент усиления П-регулятор  $K_p=0,15$  подобран таким образом, чтобы переходный процесс скорости вращения второго двигателя находился на границе устойчивости. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления пропорционального регулятора приводило к расходящимся переходным процессам. Как видно из рис. 1 переходный процесс по скорости в установившемся режиме имеет незатухающие колебания. Время первого согласования скорости вращения второго двигателя на уровне 6 рад/с составляет 1,4 с.

Рассмотрим переходные процессы в регуляторе скорости с П-регулятором при подаче на вход большого задающего воздействия, так что установившееся значение скорости вращения второго двигателя равно 20 рад/с, при этом время первого согласования скорости вращения второго двигателя уменьшилось до 0,8 с. Это, по-видимому, про-

изошло в связи с тем, что в начальный период времени переходного процесса произошло более быстрое страгивание первого и второго двигателей и влияние сухого трения уменьшилось.

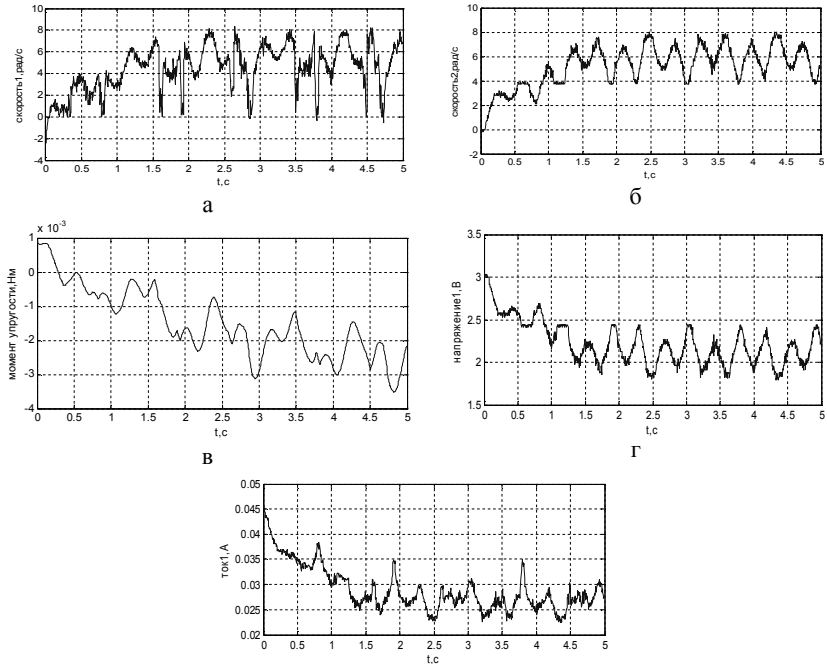


Рис. 1. Переходные процессы: а) скорости вращения первого двигателя; б) скорости вращения второго двигателя; в) момента упругости; г) напряжения на якровой цепи первого двигателя; д) тока якровой цепи первого двигателя с типовым П регулятором при разгоне двигателей до скорости 6 рад/с.

Рассмотрим теперь переходные процессы стенда по скорости с робастным регулятором. Переходные процессы переменных состояния показаны на рис. 2. Параметры робастного регулятора выбраны таким образом, что замкнутая этим регулятором система управления стендом также находится на границе устойчивости. Дальнейшее повышение быстродействия робастного регулятора приводило к потере устойчивости системы управления стендом. Как видно из рис. 2, время первого

согласования скорости вращения второго двигателя на уровне 20 рад/с составляет 0,8 с.

Для повышения быстродействия системы увеличим весовой множитель при ошибке системы в 10 раз. При этом время первого согласования уменьшилось в 3,2 раза и составляет 0,25с., однако в системе устанавливаются практически незатухающие колебания. Для уменьшения колебательности в системе с робастным регулятором добавим в вектор цели сигнал, пропорциональный моменту упругости с весовым множителем  $C_1(3,2)=10^6$ . При этом в системе с робастным регулятором перерегулирование уменьшилось и составляет 10% по скорости второго двигателя, однако время первого согласования увеличилось в 1,6 раз и составляет 0,4 с.

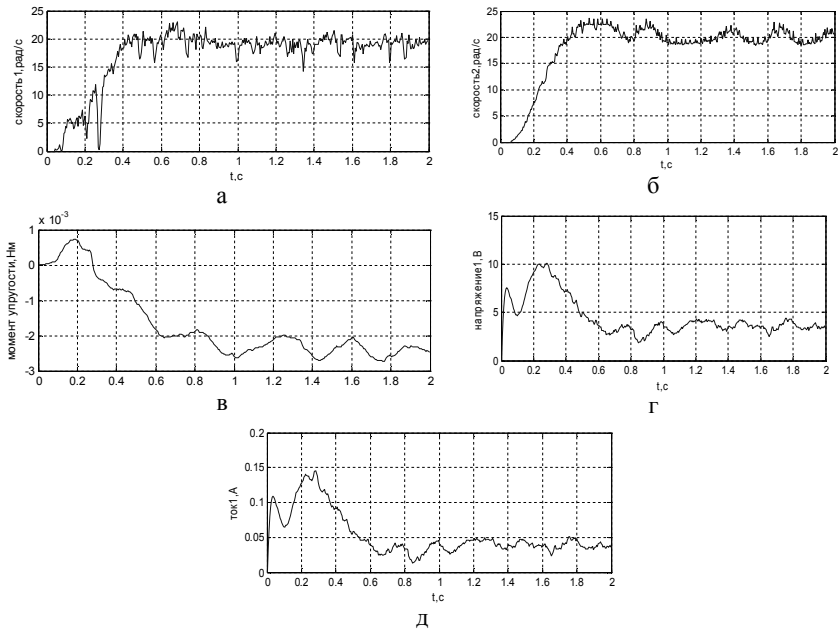


Рис. 2. Переходные процессы: а) скорости вращения первого двигателя; б) скорости вращения второго двигателя; в) момента упругости; г) напряжения на якровой цепи первого двигателя; д) тока якровой цепи первого двигателя с робастным регулятором при разгоне двигателей до скорости 20 рад/с.

**Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления.** Разработана математическая модель и методика синтеза типовых и робастных регуляторов скорости станда двухмассовой электромеханической системы. Приведены экспериментальные характеристики станда с синтезированной системой робастного управления. Применение робастного регулятора скорости вращения двигателей станда позволило уменьшить время первого согласования скорости вращения в 2 раза.

**Список литературы:** 1. *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др.* Математическая модель станда двухмассовой электромеханической системы / Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2009. – №7. – С. 110-117. 2. *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др.* Робастное управление стандом двухмассовой электромеханической системы // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: "Проблеми автоматизированного електропривода. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПИ", 2010. – №28. – С. 180-181. 3. *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др.* Синтез робастного регулятора станда двухмассовой электромеханической системы / Технічна електродинаміка. Тем. випуск.: Силова електроніка та енергоефективність. – 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 політехнічного університету "ХПИ". Сер.: Електротехніка, електроніка і електропривод. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 2. – С. 98-101. 5. *Зеленов А.Б., Пошилов Е.В., Щелоков А.Г.* Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом// Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сер.: Електротехніка, електроніка і електропривод. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 12. – С. 472-475. 6. *Войтенко 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., 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 02.11.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Лушков В.С.*