

**В.П. Казанцев, Д.А. Даденков, Д.С. Дударев**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СКОРОСТИ РАБОЧЕГО ОРГАНА МЕХАНИЗМА  
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ  
С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ**

*Рассматриваются подходы к построению микропроцессорных систем регулирования скорости на основе математических моделей упругодиссипативных электромеханических систем в терминах векторно-матричной теории управления. Предложена оригинальная процедура синтеза цифровых алгоритмов управления электроприводами на основе применения критерия предельного быстродействия и контроля полного вектора состояния объекта управления.*

В течение многих лет существует устойчивый интерес специалистов к электромеханическим системам с упругими связями, что доказывает важность и актуальность разработки и исследования систем управления данного класса.

Если к быстродействию автоматизированного электропривода не предъявляется высоких требований, а частота собственных упругих колебаний механизма достаточно велика, то влияние упругих связей на работу электропривода и характер движения рабочего органа (РО) незначительно. Однако при повышении требований к быстродействию электропривода упругость начинает влиять на работу механизма, в системе возникают колебания, что приводит к повышенному износу и поломке деталей, влияет на качество выпускаемой продукции и производительность установки.

К установкам с наличием упругих связей принято относить, например, электроприводы испытательных стендов электроэнергетических объектов [1], таких как газотурбинные двигатели

газоперекачивающих станций и газотурбинных электростанций, электроприводы бумагоделательных машин, прокатных станков и др. Основной управляемой фазовой переменной в таких объектах управления является угловая скорость вращения РО, а основным режим работы – стабилизация этой координаты в заданном диапазоне с высокой точностью при изменениях нагрузки на валу РО. Рабочий орган в силу наличия редуктора (мультипликатора) или длинного вала содержит упруго-диссипативные кинематические связи, что усложняет процесс управления выходной координатой – скоростью вращения вала рабочего органа.

Наиболее распространенным принципом построения систем управления электроприводом является принцип подчиненного управления, использующий стандартные настройки контуров регулирования [2, 3]. Однако влияние упругости часто делает невозможной реализацию необходимого для таких систем высокого быстродействия.

В связи с этим возникла необходимость разработки новых способов построения и синтеза алгоритмов цифрового управления электроприводами на основе применения критерия предельного быстродействия и контроля полного вектора состояния объекта управления, обеспечивающих плавное движение исполнительного органа при максимальном быстродействии.

При составлении математического описания электромеханической системы с упругими связями как объекта управления [2, 3] проводятся различные допущения и упрощения в описании его структурных элементов. В частности, замкнутый контур регулирования тока якоря обычно представляют простейшим апериодическим звеном, аппроксимирующим настройку такого контура на типовой технической оптимум [3]. Электромеханическую цепь представляют в виде линейной двух- или трехмассовой электромеханической системы (ДЭМС или ТЭМС) [2]. В дальнейшем в целях упрощения исследований будем пренебрегать влиянием податливости редуктора и пользоваться моделью в форме ДЭМС. Математическая модель такого объекта управления для системы стабилизации скорости вращения рабочего органа (режима малых отклонений координат) может быть представлена в виде системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 4-го порядка:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = \frac{1}{J_1}(M - \beta_1\omega_1 - M_{12}) = \frac{1}{J_1} \left[ \frac{1}{K_D} \cdot i - \beta_1\omega_1 - c_{12}\varphi_{12} - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) \right], \\ \dot{\varphi}_{12} = \omega_1 - \omega_2, \\ \dot{\omega}_2 = \frac{1}{J_2}(M_{12} - M_{C2}) = \frac{1}{J_2} [c_{12}\varphi_{12} - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - M_{C2}], \\ i = \frac{1}{T_T} \left( \frac{1}{K_T} U_y - i \right). \end{cases}$$

где  $K_T$  – передаточный коэффициент свернутого контура тока;  $T_T$  – постоянная времени свернутого контура тока;  $K_D$  – передаточный коэффициент двигателя;  $\beta_1$  – коэффициент вязкого трения;  $J_1$  – момент инерции двигателя;  $\beta_{12}$  – коэффициент диссипации механической связи;  $c_{12}$  – жесткость упругой механической связи;  $J_1$  – момент инерции секции каландра, приведенный к валу двигателя;  $M_{C1}$  – момент сопротивления, обусловленный вязким трением;  $M_{C2}$  – статический момент нагрузки секции каландра;  $M_{12}$  – крутильный момент двухмассовой механической системы;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения двигателя;  $\omega_2$  – угловая скорость вращения секции каландра;  $\varphi_{12}$  – угол скручивания длинного вала.

Структурная схема, соответствующая, приведенному математическому описанию ДЭМС, приведена на рис. 1.

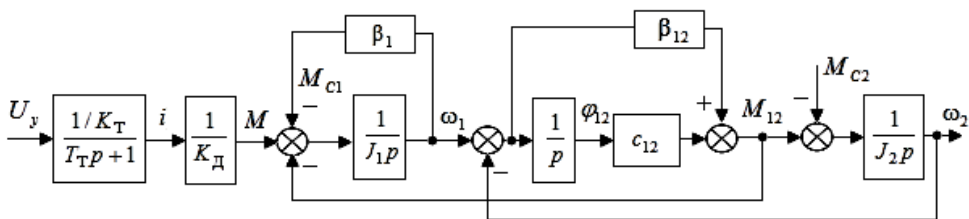


Рис. 1. Структурная схема ДЭМС

Воспользуемся векторно-матричным аппаратом описания ДЭМС, а в дальнейшем и синтеза ее системы управления. Введем векторы состояния, управления и возмущения:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{C}\mathbf{F}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{D}\mathbf{X}, \end{cases}$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор состояния,  $\mathbf{X} = [\omega_2 \quad \phi_{12} \quad \omega_1 \quad i]^T$ ;  $\dot{\mathbf{X}}$  – вектор производных состояния,  $\dot{\mathbf{X}} = [\dot{\omega}_2 \quad \dot{\phi}_{12} \quad \dot{\omega}_1 \quad \dot{i}]^T$ ;  $\mathbf{U}$  – вектор управления,  $\mathbf{U} = U_y$ ;  $\mathbf{F}$  – вектор возмущения,  $\mathbf{F} = M_{c2}$ .

Матрицы состояния  $\mathbf{A}$ , управления  $\mathbf{B}$  и возмущения  $\mathbf{C}$  (матрицы постоянных коэффициентов) имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_{12}}{J_2} & \frac{c_{12}}{J_2} & \frac{\beta_{12}}{J_2} & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{\beta_{12}}{J_2} & -\frac{c_{12}}{J_1} & -\frac{\beta_{12} - \beta_1}{J_1} & \frac{1}{J_1 K_D} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_T} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_T K_T} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В качестве исследования при построении микропроцессорной системы управления рассмотрим силовую энергетическую установку с упругими связями по схеме «электропривод постоянного тока – рабочий орган с упругими связями».

Электропривод оборудован двигателем постоянного тока П131-6К. Его параметры:  $P_n = 180$  кВт,  $U_n = 440$  В,  $I_n = 440$  А,  $n_n = 1100$  об/мин,  $\Phi_n = 4,95 \cdot 10^{-2}$  Вб,  $R_{я\Sigma} = 0,04432$  Ом. Обмоточные данные машины:  $2p = 4$ ,  $2a = 4$ ,  $W_{я} = 216$ . Данные привода, характеризующие механическую часть рабочего органа с упругими связями:

- момент инерции двигателя  $J_1 = 22,56$  кг·м<sup>2</sup>;
- момент инерции каландра  $J_2 = 101,04$  кг·м<sup>2</sup>;
- жесткость упругой механической связи  $c_{12} = 0,2845 \cdot 10^5$  Н·м/рад;
- коэффициент вязкого трения  $\beta_1 \approx 0,0278$  Н·м·с/рад;
- коэффициент диссипации механической связи  $\beta_{12} \approx 0,278$  Н·м·с/рад.

Определим оставшиеся параметры модели:

- передаточный коэффициент контура тока  $K_T = \frac{U_{y \max}}{I_{\max}} = 0,011$  Ом;
- постоянная времени контура тока  $T \approx 0,02$  с;
- передаточный коэффициент двигателя

$$K_D = \frac{\pi \cdot a}{p \cdot W_{я} \cdot \Phi_n} = 0,294 \text{ (В} \cdot \text{с)}^{-1}.$$

В качестве критерия оптимизации представляется целесообразным рассмотреть критерий предельного быстродействия, который в детерминированных дискретных линейных системах обеспечивает одновременно минимум интегральной динамической ошибки управления при отсутствии перерегулирования выходной координаты [4, 5]. Последнее очень существенно, поскольку именно скорость вращения рабочего органа не должна подвергаться колебаниям при изменениях момента нагрузки.

В качестве метода синтеза оптимального дискретного (цифрового) управления можно воспользоваться методом модального управления при расположении корней характеристического уравнения замкнутой системы заведомо на отрицательной вещественной полуоси [4] или методом синтеза цифровых аperiodических регуляторов состояния [5].

Объект управления при этом представим в виде:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(kT_0) + \mathbf{C}\mathbf{F}(t);$$

$$\mathbf{U}(kT_0) = \mathbf{A}_0\mathbf{X}(kT_0) + \mathbf{B}_0\mathbf{Y}^*(kT_0) + \mathbf{C}_0\mathbf{F}(kT_0) + \mathbf{D}_0\dot{\mathbf{Y}}^*(kT_0),$$

где оптимальное управление  $\mathbf{U}(kT_0)$  представлено в виде линейной формы полного контролируемого вектора состояния, заданного состояния выходной переменной и ее производной, а также нагрузки на валу секции БДМ.

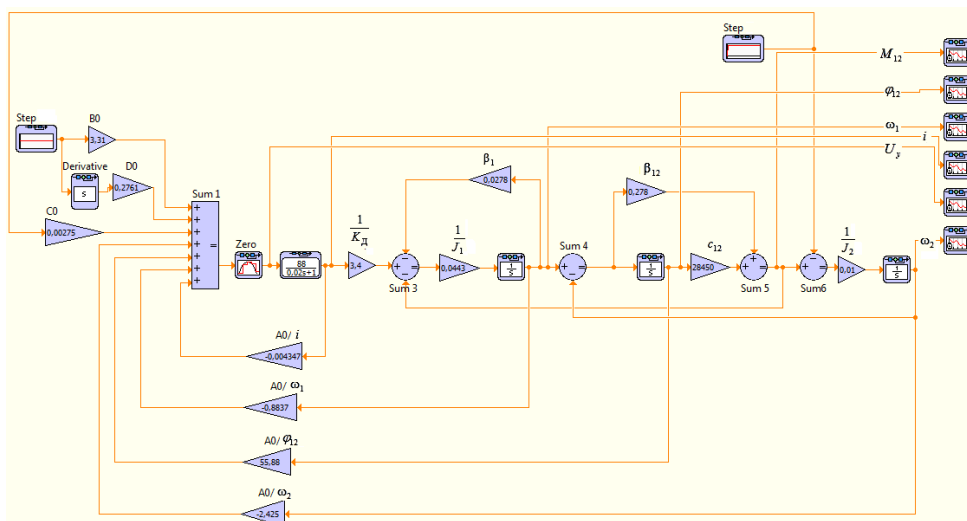


Рис. 2. Схема моделирования ДЭМС в среде LabVIEW

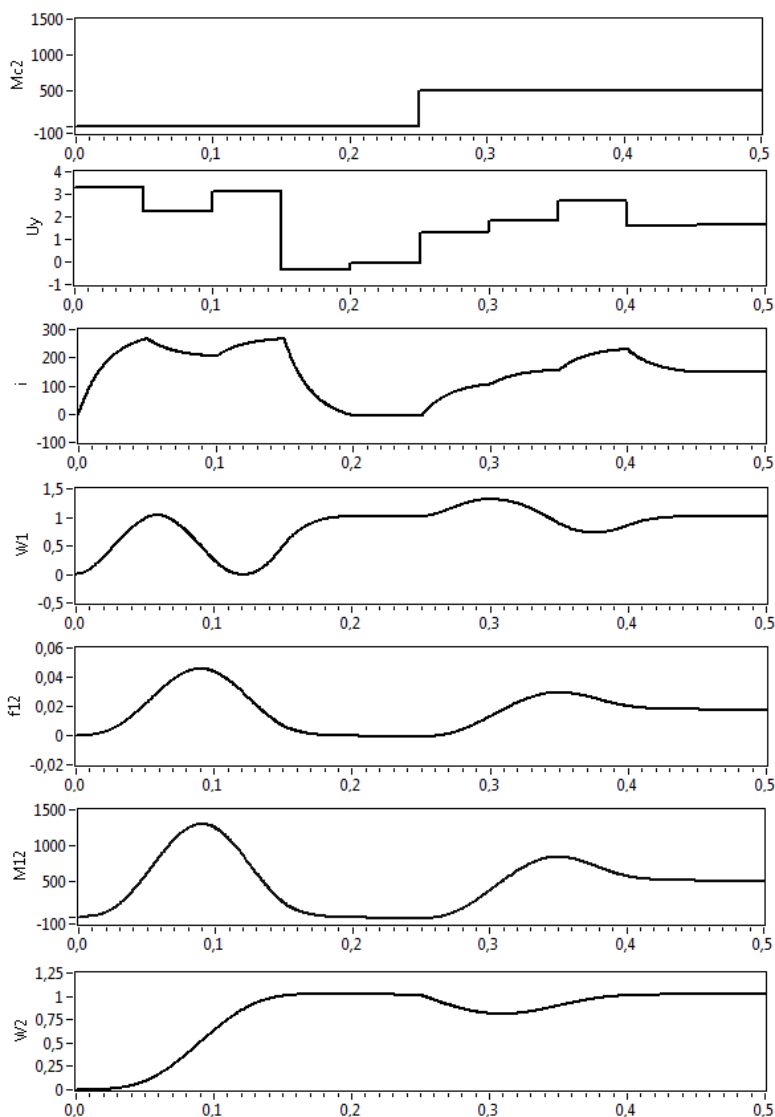


Рис. 3. Переходные процессы в ДЭМС при ступенчатых приращениях задания и нагрузки на валу электропривода

Искомые матрицы  $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0, \mathbf{C}_0, \mathbf{D}_0$  определены в результате проведения процедуры синтеза [5] для некоторого заведомо заданного такта дискретного управления. В частности, при такте  $T_0 = 0,05$  с эти матрицы имеют вид:

$$\mathbf{A}_0 = [a_{01} \ a_{02} \ a_{03} \ a_{04}] = [-2,425 \ 55,88 \ -0,8837 \ -0,004347];$$

$$\mathbf{B}_0 = [b_{01}] = 3,308; \quad \mathbf{C}_0 = [c_{01}] = 0,0275 \quad \mathbf{D}_0 = [d_{01}] = 0,2761.$$

На рис. 2 приведена схема моделирования динамики системы регулирования скорости рабочего органа механизма, соответствующей структурам и параметрам моделей объекта управления и устройства управления, приведенным выше.

В качестве тестовых воздействий на систему приняты ступенчатые воздействия, позволяющие оценить прямые оценки качества регулирования. Приращение задающего воздействия соответствует 1 рад/с (около 1 % от номинальной скорости вращения электропривода), приложено на входе системы в момент времени  $t = 0$  с. Приращение возмущающего воздействия соответствует 500 Н·м (около 30 % от номинального момента на валу электропривода), приложено в момент времени  $t = 0,25$  с.

Результаты моделирования приведены на рис. 3. Графики отражают переходные процессы шести координат электропривода (сверху вниз): приращение возмущающего воздействия (Н·м); дискретное управление (В); ток якоря (А); скорость вращения вала электродвигателя (рад/с); угол скручивания упругого вала, приведенный к валу двигателя (рад); крутильный момент, приведенный к валу двигателя (Н·м); скорость вращения вала рабочего органа, приведенная к валу двигателя (рад/с).

#### **Выводы:**

1. Переходные процессы в замкнутом контуре регулирования скорости электропривода как по задающему, так и по возмущающему воздействию являются оптимальными по быстродействию и заканчиваются за 4 такта дискретного управления. При такте управления, равном 0,05 с, время переходных процессов составляет 0,2 с.

2. При ступенчатом приращении заданной скорости отработка задания осуществляется плавно без перерегулирования скорости. При этом демпфирование упругих колебаний осуществляется преимущественно электродвигателем (см. рис. 3, четвёртая кривая), а не за счет диссипации энергии упругодиссипативной механической связи.

3. При ступенчатом приращении нагрузки на валу рабочего органа (ситуация в теоретическом плане критическая) на 30 % динамический провал скорости не превышает 0,2 рад/с, что составляет менее 0,2 % номинальной скорости вращения электродвигателя (115 рад/с). Статическая ошибка теоретически равна нулю.

### Библиографический список

1. Интеллектуализация испытаний конвертированных газотурбинных установок для электроэнергетики / Б.В. Кавалеров, В.П. Казанцев, И.А. Шмидт, А.Н. Рязанов, К.А. Один // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 1(47). – С. 84–88.

2. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.

3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

4. Ту Ю. Современная теория управления: пер. с англ. / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1971. – 472 с.

5. Казанцев В.П., Петренко В.И. Синтез дискретных систем управления линейными объектами произвольного порядка // Информационные управляющие системы / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1995. – С. 99–105.

Получено 05.09.2012