

УДК 62-83-52

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ И ЗАЗОРАМИ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ

ИВАНКОВ В.А., инж., ТАРАРЫКИН С.В., ТЮТИКОВ В.В., доктора техн. наук, КРАСИЛЬНИКЪЯНЦ Е.В., канд. техн. наук

Представлена методика синтеза систем взаимосвязанных электроприводов с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах, основанная на принципах модального управления и применении безынерционных регуляторов состояния.

Ключевые слова: двухдвигательные электроприводы, метод пространства состояний, модальное управление.

MODAL CONTROL OF INTERCONNECTED ELECTRICAL DRIVES WITH BUMPING LINKS AND GAPS IN KINEMATIC TRANSMISSIONS

V.A. IVANKOV, engineer, S.V. TARARYKIN, Ph.D. V.V. TYUTIKOV, Ph.D. E.V. KRASILNIKYANTS, Ph.D.

This paper represents the system synthesis method of interconnected electrical drives with bumping links and gaps in kinematic transmissions, which is based on the modal control principles and inertia-free condition regulators usage.

Key words: twin-engine electrical drives, state space method, modal control.

Практические задачи управления многими промышленными механизмами предполагают регулирование скорости и положения исполнительного механизма, соединенного с электроприводом через упругую кинематическую передачу, содержащую зазор. К такого рода объектам управления относятся опорно-поворотные устройства различного назначения, металлообрабатывающие станки, механизмы металлургического производства и т.п. Системы регулирования для них рационально строить по принципу электромеханической выборки зазора на основе реверсивных многодвигательных электроприводов с индивидуальными силовыми преобразователями с учетом упругих механических передач от электродвигателей к общей массе.

К числу основных требований, предъявляемых к указанным электроприводам, относятся высокие показатели надежности работы, а также точности и быстродействия при управлении движением общей массы. Однако для обеспечения требуемого качества управления в системах с упругими связями использование принципов подчиненного регулирования координат не всегда эффективно.

Известны [1–5] способы управления двухдвигательным электроприводом с зазорами в кинематических передачах по принципам электромеханического торсионного (распора) и подчиненного регулирования координат (тока и скорости), основанные на раздельном формировании управляющих воздействий на каждый электродвигатель в зависимости от разности заданного и действительного значений скорости общей массы, применении корректирующих воздействий на электродвигатели по сумме их скоростей таким образом, что в определенном диапазоне скоростей и моментов нагрузки общей массы электродвигатели развивают моменты разного знака (направления), исключая тем самым влияние зазоров на динамику системы, а за пределами этого диапазона работают в тандеме, развивая одинаковые по величине и знаку моменты и обеспечивая тем самым максимальную перегрузочную способность объединенного электропривода.

Однако при выходе значений скорости и нагрузочного момента общей массы за пределы установленного диапазона в системах [1–3] происходит раскрытие зазоров передач, возникают колебательные процессы в электрической и механической частях электропривода, что приводит к их повышенному износу, снижению надежности системы и ухудшению качества управления движением рабочего органа. При этом в системах [1–5] упругие звенья в кинематических пе-

редачах приводят к еще более значительному ухудшению показателей качества и надежности работы САУ.

Для сохранения работоспособности механизмов с упругими звеньями при использовании каскадного управления необходимо снижать быстродействие электропривода так, чтобы полоса пропускания САУ была в несколько раз меньше низшей собственной частоты механизма. Однако для современных электроприводов регламентируемая полоса пропускания частот [6] соизмерима с собственными частотами большинства механизмов, поэтому упругие свойства объектов управления в настоящее время ограничивают возможности использования традиционного построения систем электропривода и являются серьезным препятствием при обеспечении качественных характеристик управления механизмами.

Поскольку повышение жесткости конструкции чаще всего экономически нецелесообразно, решение проблемы увеличения быстродействия упругих механизмов при заданном качестве регулирования заключается не в увеличении их резонансных частот, а в их подавлении средствами управления, что возможно при использовании регуляторов, обладающих большим числом степеней свободы. Таким образом, при синтезе САУ упругой многодвигательной ЭМС основой построения ее структуры становится применение теории пространства состояний. Заданное качество переходных процессов формируется на основе использования регуляторов с безынерционными обратными связями и динамических полиномиальных регуляторов в контуре главной обратной связи [7].

При формировании двухканальной системы электромеханической выборки зазора в системе с упругими связями целесообразно использовать принципы модального управления. В данной статье подробно рассмотрен способ построения САУ двухканальной торсионной системы на основе безынерционных контуров, связывающих переменные состояния с входом объекта регулирования.

Синтез двухканальной системы электромеханической выборки зазора для ЭМС с упругими звеньями выполняется на основе одноканальной структуры с модальным управлением всеми координатами состояния, в которой выделяются контур момента и контур скорости. В качестве объекта исследования, содержащего зазор и упругие связи, выбран электропривод постоянного тока с двухмассовой ЭМС в рамках задачи следящего регулирования скорости и положения (рис. 1).

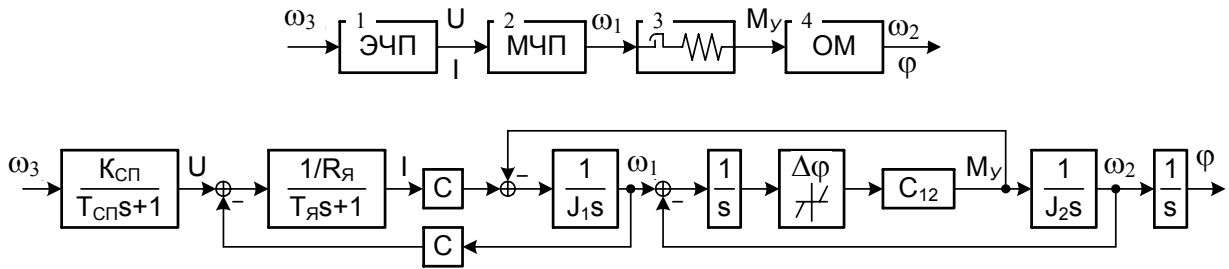


Рис. 1. Двухмассовая ЭМС с упругими звеньями и зазором: 1 – электрическая часть электропривода (ЭЧП); 2 – механическая часть электропривода (МЧП); 3 – блок упругой кинематической передачи с зазором; 4 – общая масса (ОМ); ω_3 – заданная угловая скорость; $K_{CП}$, $T_{CП}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя; $R_Я$, $T_Я$ – активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря электродвигателя; C , J_1 – конструктивный коэффициент и момент инерции ротора двигателя; $\Delta\varphi$, C_{12} – зазор и приведенный коэффициент жесткости механической передачи; J_2 – приведенный момент инерции рабочего органа; U , I , ω_1 , $M_γ$, ω_2 , φ – соответственно напряжение преобразователя, ток, частота вращения электродвигателя, упругий момент передачи, приведенная угловая скорость и положение рабочего органа; s – комплексная переменная Лапласа

При моделировании переходных процессов были приняты следующие значения параметров объекта управления:

- силовой преобразователь: $K_{CП} = 7$; $T_{CП} = 0,001$ с;
- электродвигатель: $R_Я = 3,15$ Ом; $T_Я = 0,05$ с;
- $C = 0,16$ Вб; $J_1 = 0,015$ кг·м²; $I_H = 3$ А;
- общая (вторая) масса: $\Delta\varphi = -0,05...+0,05$ рад;
- $C_{12} = 0,65$ Н·м/рад; $J_2 = 0,1$ кг·м².

Для данной двухмассовой ЭМС формируется система управления моментом и скоростью исполнительного органа (общей массы) по реакции системы на ступенчатое воздействие заданного момента распора M_p и заданной скорости общей массы ω_3 . При этом требуемое качество регулирования главной выходной координаты ω_2 обеспечивается отсутствием перерегулирования при апериодическом характере переходного процесса.

Использование метода пространства состояний позволяет обеспечить требуемое качество и заданное быстроедействие переходного процесса на основе характеристического полинома с распределением полюсов по Ньюто́ну при построении САУ на основе безынерционных контуров момента и скорости, связывающих переменные состояния с входом объекта регулирования (рис. 2).

Контур момента. Для синтеза параметров регуляторов в контуре момента необходимо воспользоваться векторно-матричным описанием объекта управления, составленного по системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} s X_M(s) = A_M X_M(s) + B_M \omega_3(s); \\ \omega_2(s) = C_M X_M(s), \end{cases} \quad (2)$$

где $X_M(s)$, $\omega_3(s)$ и $\omega_2(s)$ – векторы переменных состояния, входных воздействий и выходных координат; A , B и C – матрицы состояния, входа и выхода, соответственно.

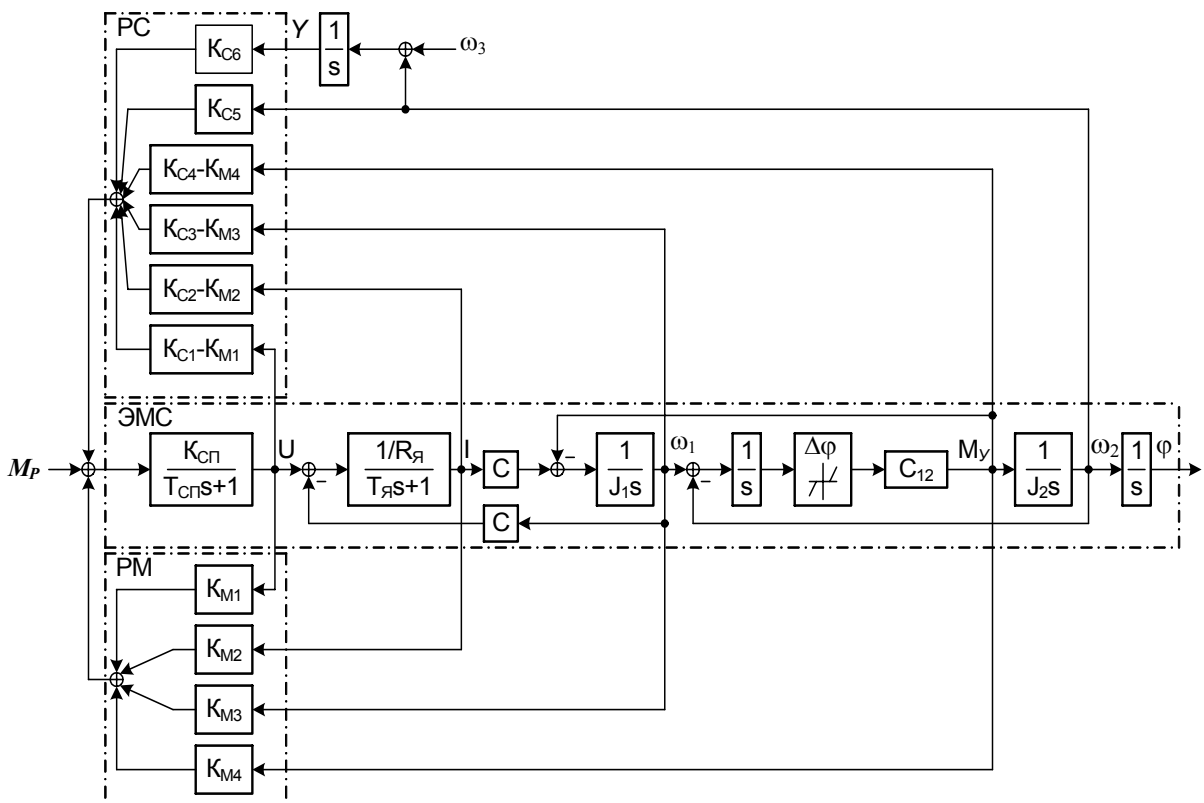


Рис. 2. Одноканальная ЭМС с регуляторами состояния момента и скорости

Для ЭМС заданной структуры $X_M = [U \ I \ \omega_1 \ M_y]$, а система уравнений (2) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} sU = -\frac{1}{T_{СП}}U + \frac{K_{СП}}{T_{СП}}M_p; \\ sI = \frac{1}{R_яT_я}U - \frac{1}{T_я}I - \frac{c}{T_яR_я}\omega_1; \\ s\omega_1 = \frac{c}{J_1}I - \frac{1}{J_1}M_y; \\ sM_y = c_{12}\omega_1. \end{cases} \quad (3)$$

На основе данных уравнений формируются матрицы состояния, входа и выхода по структуре объекта управления для контура момента 4-го порядка при условии, что скорость общей массы равна нулю ($\omega_2 = 0$):

$$A_M = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{СП}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_яT_я} & -\frac{1}{T_я} & -\frac{c}{T_яR_я} & 0 \\ 0 & \frac{c}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} \\ 0 & 0 & c_{12} & 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$B_M = \begin{bmatrix} \frac{K_{СП}}{T_{СП}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_M = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Соответствующая передаточная функция входа-выхода приобретает вид:

$$H_M(s) = \frac{M_y(s)}{M_p(s)} = \frac{b_0}{A_M(s)}; \quad (5)$$

$$A_M(s) = s^4 + \sum_{m=0}^3 a_m s^m,$$

где b_0, a_0, \dots, a_3 – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами системы.

С учетом параметров электропривода постоянного тока с двухмассовой ЭМС (1) передаточная функция объекта принимает следующую числовую форму:

$$H_M(s) = \frac{308196}{s^4 + 1020s^3 + 20039s^2 + 39546s + 562900} \quad (6)$$

а соответствующие матрицы объекта имеют вид:

$$A_M = \begin{bmatrix} -1000 & 0 & 0 & 0 \\ 6.35 & -20 & -1.016 & 0 \\ 0 & 10.667 & 0 & -66.667 \\ 0 & 0 & 0.65 & 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$B_M = \begin{bmatrix} 7000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_M = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Апериодический процесс с минимальным перерегулированием при отработке ступенчатого воздействия по моменту обеспечивается желаемым распределением полюсов характеристического полинома по Ньютону

$$A_{Ж}(s) = s^4 + \sum_{m=0}^3 a_{Жm} s^m \quad (8)$$

в соответствии с формулой

$$t_H = \frac{n + 2\sqrt{n-1}}{\Omega_0}, \quad (9)$$

где t_H – время нарастания переходной характеристики; n – порядок системы; Ω_0 – среднегеометрический корень характеристического полинома.

Коэффициенты матрицы обратных связей $K_{M1} \dots K_{M4}$ вычисляются на основе сравнения коэффициентов заданного (5) и желаемого (8) полиномов при соответствующих степенях для случая $t_H = 0,1$ с среднегеометрическим корнем $\Omega_0 = 74,6 \text{ с}^{-1}$:

$$K_M = [a_0 - a_{Ж0} \quad a_1 - a_{Ж1} \quad \dots \quad a_{n-1} - a_{Ж(n-1)}]; \quad (10)$$

$$K_M = [0.103 \quad -0.625 \quad -3.474 \quad -62.412]. \quad (11)$$

Полученные коэффициенты являются параметрами регулятора момента в двухмассовой ЭМС (рис. 2), обеспечивая передаточную функцию с динамичным аperiодическим процессом.

Контур скорости. Аналогичным способом по системе дифференциальных уравнений объекта (2) составляется векторно-матричное описание объекта регулирования для контура скорости с астатизмом первого порядка при $X_C = [U \ I \ \omega_1 \ M_y \ \omega_2 \ Y]$, который обеспечивается при использовании переменной состояния Y – интегральной составляющей главной выходной координаты ω_2 .

Формируются матрицы состояния, входа и выхода A_C, B_C и C_C :

$$A_C = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{СП}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_яT_я} & -\frac{1}{T_я} & -\frac{c}{R_яT_я} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{12} & 0 & -c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$B_C = \begin{bmatrix} \frac{K_{СП}}{T_{СП}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

С учетом (1) матрицы приобретают следующий вид:

$$A_C = \begin{bmatrix} -1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.35 & -20 & -1.016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.667 & 0 & -66.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.65 & 0 & -0.65 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$B_C = \begin{bmatrix} 7000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Для получения аperiodического процесса при регулировании скорости выбирают желаемое распределение полюсов характеристического полинома по Ньютону в соответствии с формулой (9). При этом темп формирования управляющего воздействия по скорости устанавливается в 2 раза ниже темпа управляющего воздействия в контуре момента (при $t_H = 0,2 \text{ с}$ $\Omega_0 = 52,4 \text{ с}^{-1}$). В результате коэффициенты матрицы обратных связей $K_{C1} \dots K_{C6}$ принимают значения

$$K_C = [0.101 \quad -0.793 \quad -6.029 \quad -234.188 \quad -763.06 \quad -6716.767]. \quad (14)$$

Принимая во внимание, что регулятор скорости использует информацию о тех же координатах состояния, что и регулятор момента, параметры регулятора скорости $K_{C1} \dots K_{C6}$ следует скорректировать с учетом идентичных переменных состояния, участвующих в управлении моментом, составив соответствующие разности:

$$K_C^* = [K_{C1} - K_{M1} \quad K_{C2} - K_{M2} \quad K_{C3} - K_{M3} \quad K_{C4} - K_{M4} \quad K_{C5} \quad K_{C6}]. \quad (15)$$

Итоговые параметры для регулятора скорости примут вид

$$K_C^* = [-0.002 \quad -0.168 \quad -2.555 \quad -174.331 \quad -763.06 \quad -6716.767]. \quad (16)$$

Полученные коэффициенты являются параметрами регулятора скорости в двухмассовой ЭМС (рис. 2), обеспечивая передаточную функцию с динамичным аperiodическим процессом. Таким образом, одноканальная структура управления скоростью общей массы двухмассовой ЭМС с упругим звеном позволяет построить подчиненные контуры управления моментом и скоростью на основе модального управления по полному вектору состояния координат.

Основным недостатком одноканальной структуры является то, что при изменении направления вращения исполнительного органа или при воздействии момента сопротивления на общую массу возможно раскрытие зазора, что значительно ухудшает качество переходного процесса, поэтому необходимо сформировать торсионную структуру выборки зазора в рамках двухканальной системы управления.

Двухканальная система выборки зазора основана на предложенном способе управления взаимосвязанными электроприводами, при котором реализуется динамичное переключение тормозящего и двигательного управляющего воздействия в каждом из каналов в зависимости от направления перемещения исполнительного органа (рис. 3).

На катоде диода 18 и аноде диода 22 формируются основные управляющие воздействия для задания движущих моментов соответственно первому и второму электроприводам, а на выходах модальных регуляторов 19 и 23 – дополнительные управляющие воздействия соответственно первому и второму электроприводам.

Все модальные регуляторы и сумматоры могут быть выполнены на базе суммирующих операционных усилителей или реализованы как усилители-сумматоры на элементах цифровой техники. В качестве задатчиков скорости и момента могут использоваться регулируемые источники напряжения, а в качестве интеграторов – операционные усилители в режиме интегрирования или блоки цифрового интегрирования. В качестве датчиков координат электроприводов и общей массы могут использоваться соответствующие измерительные устройства любого типа.

Параметры каждого из модальных регуляторов момента 19, 23, формирующих дополнительные управляющие воздействия на первый и второй электроприводы, настраиваются так, чтобы обеспечить заданное распределение корней характеристического уравнения каждого электропривода, полученного при условии отсутствия движения общей массы. Это распределение корней должно обеспечить более быструю (в несколько раз) динамику процессов формирования моментов распора, по сравнению с динамикой управления скоростью общей массы, и при любом ее движении гарантировать надежную компенсацию влияния зазоров за счет стабилизации значений тормозных моментов на уровнях, определяемых задатчиками 20 и 24, несмотря на присутствие упругих звеньев в кинематических передачах.

Параметры общего модального регулятора скорости 25 рассчитываются так, чтобы обеспечить заданное распределение корней характеристического уравнения системы, состоящей из одного электропривода с присоединенной общей массой. Это распределение корней должно обеспечивать требуемую техническим заданием динамику управления движением рабочего органа со стороны движущего электропривода. После этого расчетные параметры, определяющие силу обратных связей по всем координатам состояния электропривода, корректируются с учетом параметров (коэффициентов усиления) обратных связей, уже введенных по этим координатам на входы модальных регуляторов момента. Для более точной коррекции параметров единого регулятора скорости темпы формирования дополнительных управляющих воздействий на электроприводы со стороны регуляторов момента должны задаваться одинаковыми. В итоге совокупное действие модальных регуляторов скорости и момента обеспечивает высокие показатели точности и быстродействия при управлении движением общей массы в соответствии с задаваемыми блоком 26 уровнями ее скорости, несмотря на присутствие зазоров и упругих звеньев в кинематических передачах.

При изменениях блоком 26 заданного уровня или направления скорости общей массы, а также под воздействием внешних возмущений может изменяться знак выходного сигнала регулятора 25. При этом разделительные диоды 18, 22 формируют основное управляющее воздействие соответствующего знака только на тот электропривод, который в данный момент должен быть движущим. Сумматоры 27–30 обеспечивают одновременное поступление на входы модального регулятора скорости 25 сигналов обратных связей по координатам состояния обоих электроприводов, что исключает задержки времени при смене функций электроприводов (движущий-тормозящий) и при наличии разделительных диодов 18, 22, не допускающих одновременной работы электроприводов в движущем режиме, сохраняет высокие динамические показатели системы при реверсе.

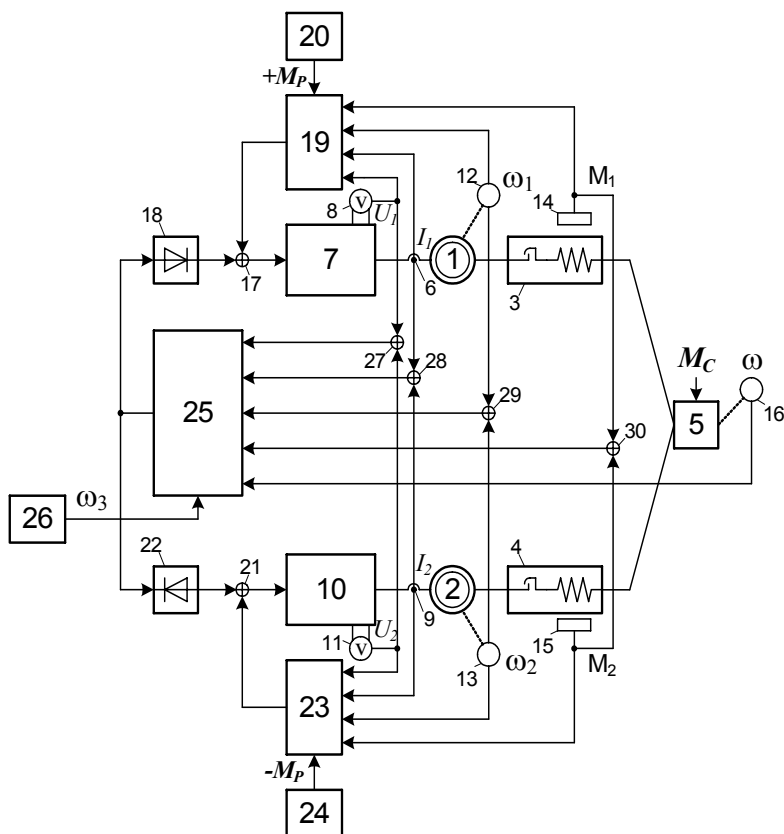


Рис. 3. Двухканальная ЭМС с общим регулятором скорости: U_1, I_1, ω_1 и M_1 – напряжение, ток, угловая скорость электродвигателя и момент упругости кинематической передачи первого электропривода; U_2, I_2, ω_2 и M_2 – напряжение, ток, угловая скорость электродвигателя и момент упругости кинематической передачи второго электропривода; ω_3, M_p, ω и M – заданное значение скорости, момент распора, действительное значение скорости и момент нагрузки общей массы; блоки двухканальной системы управления: 1, 2 – электродвигатели; 3, 4 – упругие кинематические передачи с зазорами; 5 – общая масса (общий рабочий орган); 6, 9 – датчики тока в обмотках преобразователей; 7, 10 – силовые преобразователи электроприводов; 8, 11 – датчики напряжения на преобразователях; 12, 13 – датчики скорости на электродвигателях; 14, 15 – датчики момента на соответствующих кинематических передачах; 16 – датчик скорости на валу общей массы; 17, 21 – сумматоры основных и дополнительных управляющих воздействий; 18, 22 – разделительные диоды; 19, 23 – модальные регуляторы момента; 20 – задатчик положительного момента распора; 24 – задатчик отрицательного момента распора; 25 – модальный регулятор скорости; 26 – задатчик скорости; 27-30 – сумматоры идентичных координат состояния электроприводов

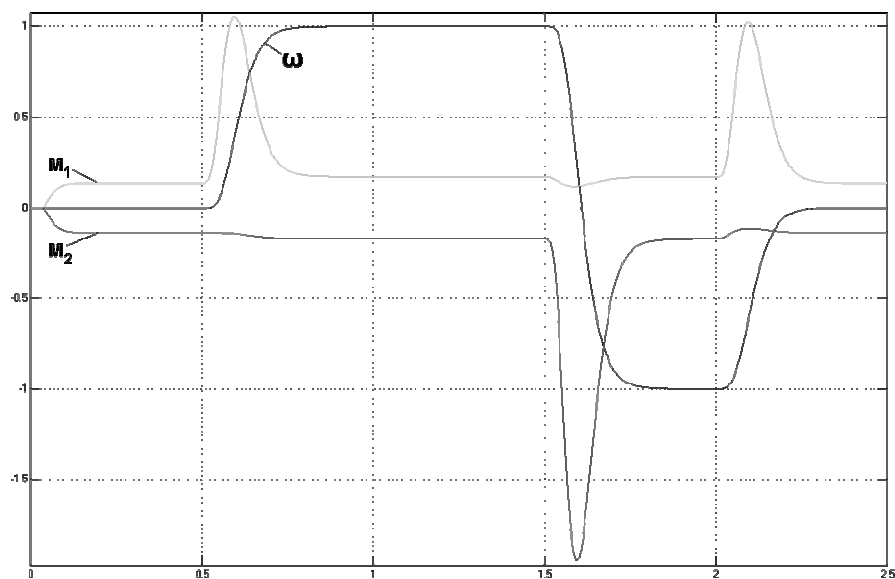


Рис. 4. Диаграммы переходных процессов в двухканальной системе с общим регулятором скорости

При работе взаимосвязанных электроприводов во всех режимах, включая режим задания нулевой скорости общей массы, модальными регуляторами 19, 23 обеспечивается высокое качество стабилизации моментов распора, благодаря чему исключается раскрытие зазоров кинематических передач, повышается их износостойкость и надежность работы.

На рис. 4 приведены диаграммы изменений основных координат состояния электроприводов при пуске, реверсе и останове без момента нагрузки общей массы, полученные в программном комплексе Matlab. Графики изменений координат электроприводов в различных переходных режимах подтверждают достижение технического результата в системе, реализующей предложенный способ управления электроприводами.

Список литературы

1. А.с. СССР № 864477, кл. Н 02 Р 5/46, 1981.
2. А.с. СССР № 1075360, кл. Н 02 Р 5/46, 1984.
3. А.с. СССР № 1115191, кл. Н 02 Р 5/46; В 23 Q 15/00, 1984.
4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005.
6. ГОСТ 27803-88. Электроприводы, регулируемые для станкостроения и робототехники. Общие требования.
7. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Системы координирующего управления взаимосвязанными электроприводами. – Иваново: ИГЭУ, 2000.

Тарарыкин Сергей Вячеславович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электроники и микропроцессорных систем, проректор по учебной работе,
телефон (4932) 26-97-53,
e-mail: tsv@ispu.ru

Тютиков Владимир Валентинович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорных систем,
телефон (4932) 26-97-53,
e-mail: tvv@ispu.ru

Красильникьянц Евгений Валерьевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник Учебно-исследовательского центра
электронных систем ЭИМС,
телефон (4932) 26-97-03.

Иванков Вадим Алексеевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электроники и микропроцессорных систем,
телефон (4932) 26-97-03,
e-mail: terehov@eims.ispu.ru