

УДК 621.311.6:62-83(045)

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-87-94

## Регулирование координат системы с двухдвигательным электромеханическим торсионом

И.С. Полющенко

Рассмотрена электромеханическая система, в которой управление взаимосвязанными электроприводами осуществляется по принципу электромеханического распора. Указанный принцип применен в редукторной кинематической передаче для устранения влияния люфта на динамику и точность регулирования координат.

Предложена схема следящей электромеханической системы с независимым регулированием положения и моментов распора, а также с учетом упругих свойств кинематической передачи. По сравнению с аналогичными системами она обладает улучшенными динамическими свойствами и повышенной точностью регулирования координат. Указанный эффект достигается путем совместного использования последовательных и параллельных корректирующих звеньев. Также представлена методика синтеза этой системы. Параллельные корректирующие звенья использованы для формирования динамических свойств электромеханической системы в соответствии с принципами модального управления. Последовательные регуляторы своим форсирующим действием компенсируют инерционности подчиненных им контуров. Наличие интегрирующих составляющих в контурах регулирования положения и движущих моментов позволяет обеспечить астатизм первого порядка при реакциях на управляющие и возмущающие воздействия. По сравнению с аналогичной системой регулирования в предложенной следящей системе достигнуто повышение добротности по скорости, снижение транспортного запаздывания и сокращение длительности протекания переходных процессов при желаемом их апериодическом характере, при этом не требуются дополнительные измерительные устройства и цепи. Синтез системы осуществляется, исходя из компромисса быстродействия, демпфирования колебаний и точности регулирования координат.

Исследование электромеханической системы, выполненное методом имитационного моделирования в системе компьютерной математики Matlab/Simulink, показало ее работоспособность при обработке задающих и возмущающих воздействий, а также соответствие динамических свойств и точности регулирования координат расчетным значениям. Приведенная система регулирования координат взаимосвязанных электроприводов может быть использована в различных системах управления движением, к которым предъявляются высокие требования по точности и динамике.

*Ключевые слова:* регулирование координат, модальное управление, взаимосвязанные электроприводы, электромеханический распор, упругая электромеханическая система.

*Для цитирования:* Полющенко И.С. Регулирование координат системы с двухдвигательным электромеханическим торсионом // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 87—94. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-87-94.

## Coordinate Control in a System Involving a Dual-Motor Electromechanical Torsion

I.S. Polyushchenkov

The article discusses an electromechanical system containing interconnected electric drives that are controlled according to the principle of an electromechanical thrust. This principle is applied in a gear-type kinematic transmission to eliminate the effects of backlash on the coordinate control dynamic and accuracy characteristics.

The scheme of a servo electromechanical system involving independent control of thrust position and torques, and taking into account the kinematic transmission elastic properties is proposed. In comparison with similar systems, the proposed system has better dynamic properties and higher accuracy of the coordinate control. The above-mentioned effect is achieved through a combined use of series- and parallel-connected compensating elements. The procedure used for synthesizing this system is also presented. The parallel-connected compensating elements were used to obtain the electromechanical system's dynamic properties according to the modal control principles. The series-connected controllers compensate the inertia of their subordinate loops by producing a leading action. Owing to the availability of integrating components in the position and driving torque control loops, the control system ensures zero-position-error performance in responding to both control and disturbing inputs. In comparison with a similar control system, the proposed servo system features a better quality factor in speed, a shorter transport lag, and shorter duration of transients while securing their desired aperiodic pattern, and there is no need to use additional measurement devices or circuits. The system is synthesized proceeding for a compromise between the response speed, oscillation damping ratio, and coordinate control accuracy.

The considered electromechanical system was investigated by simulating it in the Matlab/Simulink software package environment. The system simulation results have demonstrated its operability in responding to reference (setpoint adjustment) and disturbing inputs, as well as the conformity of the dynamic properties and coordinate control accuracy to their design values. The described coordinate control system with interconnected electric drives can be used in a variety of motion control systems that shall meet high requirements for accuracy and dynamics.

*Key words:* coordinate control, modal control, interconnected electric drives, electromechanical thrust, elastic electromechanical system.

*For citation:* Polyushchenkov I.S. Coordinate Control in a System Involving a Dual-Motor Electromechanical Torsion. MPEI Vestnik. 2018;2:87—94. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-87-94.

К электромеханическим системам (ЭМС) предъявляются высокие требования по точности и динамике управления. Это требует учета таких факторов, как люфты и упругие связи в кинематических передачах, которые снижают точность и ухудшают качество регулирования координат. Данным влиянием нельзя пренебречь, если требуемая полоса пропускания ЭМС соизмерима с собственной частотой ее механической части, а допустимая ошибка регулирования — с величиной люфта, что характерно для антенных установок, телескопов, станков и манипуляторов [1 — 3]. Для устранения влияния люфтов существуют различные технические средства. Однако, безлюфтовые редукторы изнашиваются и требуют технического обслуживания. Применение устройств электромагнитной или механической фиксации может усложнить конструкцию, а также снизить показатели точности и динамики. Использование тихоходных высокомоментных электрических двигателей ограничено их конструктивным исполнением и требованиями к охлаждению.

Один из подходов к компенсации люфта состоит в применении системы двухдвигательного электромеханического торсиона (распора). В таких системах используются два электропривода с индивидуальными реверсивными преобразователями, работающими на общий механизм [1, 2, 4]. Примером использования подобной системы может служить антенная установка, проектируемая на ООО НПО «Рубикон – Инновация» (г. Смоленск). Кинематическая схема ее поворотного механизма показана на рис. 1, а.

Масса поворотной платформы с антенным оборудованием составляет 50 кг. Она распределена таким образом, что платформа имеет большой момент инерции. Приведение параметров кинематической схемы к скорости вращения электрических двигателей позволяет выделить наибольшие инерционные массы и представить ее трехмассовой моделью с упругими связями [1]. Инерционные массы ИМ1 и ИМ2 образованы ро-

торами электрических двигателей и жестко соединены с ними элементами передач, а поворотная платформа образует инерционную массу ИМ0. Передачи от двигателей Дв1, Дв2 к поворотной платформе с редукторами Рд1, Рд2 и зацеплениями шестерен Ш1 — Ш0 и Ш2 — Ш0 обладают передаточными числами около 1:700. При таких передаточных числах кинематические связи следует считать упругими: их приведенные жесткости  $c_{10}, c_{20} < 10$  Н/(м·рад). Приведенные к скорости вращения двигателя люфты, находящиеся в зацеплениях шестерен и в редукторах, имеют значительную величину.

Для обеспечения системы управления информацией об угловых положениях валов электрических двигателей и поворотной платформы, а также о моментах, передающихся к ней от двигателей, использованы датчики положения ДП0, ДП1, ДП2 и тензометрические датчики моментов ДМ1 и ДМ2.

Применение распора связано с тем, что заданная точность регулирования углового положения поворотной оси соизмерима с величиной люфта при использовании передач обычного исполнения. При этом конструктивные элементы повышенной точности для схемы без распора сложны в изготовлении и имеют высокую стоимость. Так, затраты на изготовление зубчатого венца (Ш0 на рис. 1, а) повышенной точности соизмеримы со стоимостью электропривода для торсионной схемы. Использование электромеханического торсиона позволяет несколько упростить конструкцию механизма, отказавшись от механических средств распора, требующих технического обслуживания.

С управлением приводами вертикальной оси связаны две задачи: формирования распора и регулирования координат.

Известны различные способы формирования электромеханического распора [1, 2, 4], которые при согласованном управлении электроприводами позволяют распределить нагрузку между ними и переводить их из двигательного режима в генераторный в зависимости

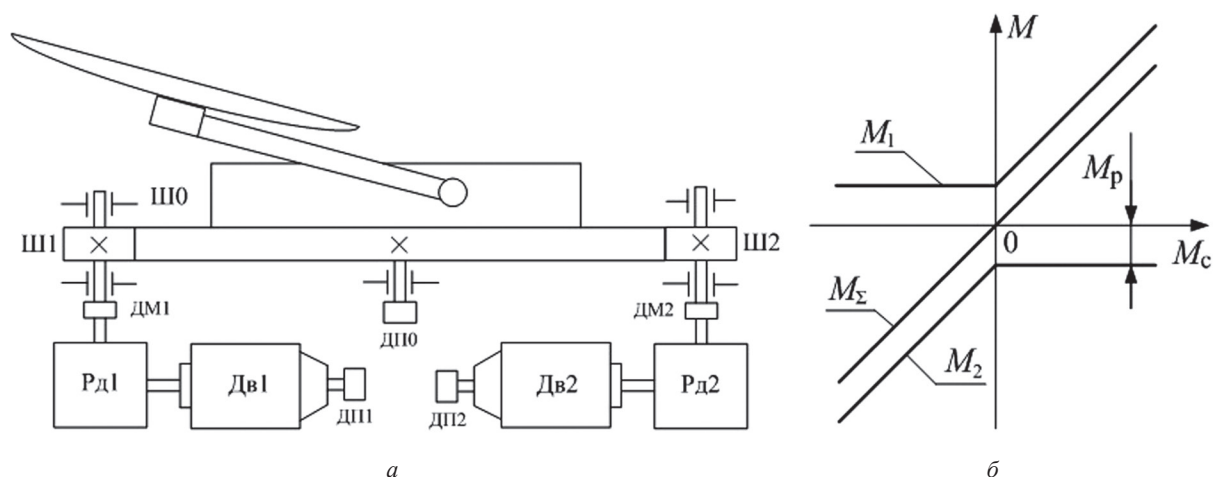


Рис. 1. Двухдвигательный привод поворотного механизма:

а — кинематическая схема; б — результирующая механическая характеристика электроприводов

от направления результирующего движущего момента. Выбор способа зависит от требуемой точности и характера движения механизма, а также от вида нагрузки. Торсионные системы, в которых оба электрических двигателя работают в двигательном режиме, создавая моменты одного направления, работоспособны в ограниченном диапазоне изменения момента нагрузки и скорости движения, а при реверсе надежность распора не обеспечивается [1]. Электроприводы поворотного механизма антенны осуществляют слежение, для которого характерно реверсирование движения. Кроме того, из-за значительной парусности антенны на поворотный механизм действует знакопеременная ветровая нагрузка. Активная составляющая нагрузки возникает при изменении положения неуравновешенных масс в поле силы тяжести при движении основания антенной установки, например на палубе корабля. Все это способствует раскрытию люфтов и, следовательно, для формирования электромеханического распора наиболее подходит способ со стабилизацией моментов распора [1, 2, 4]. На рис. 1, б показана результирующая механическая характеристика электроприводов для такого случая. Однако, движущий момент заданного направления создает только один из электроприводов и требуется завысить в 2,2...2,4 раза установленную мощность двигателей по сравнению с расчетной мощностью механизма, а затраты на оборудование для торсионной схемы должны окупаться выполнением заданных требований.

Что касается задачи регулирования координат, то точность и динамика зависят от структуры замкнутой системы регулирования и математической модели, положенной в основу ее синтеза [1, 5, 6].

Торсионная ЭМС с последовательной коррекцией, описанная в [1], имеет сравнительно низкое качество управления при снижении жесткости кинематических передач. Под влиянием упругих связей требуется понизить быстродействие системы регулирования по сравнению со стандартными настройками на технический и симметричный оптимумы. В [2, 4] приведено решение задач управления движением торсионной ЭМС с упругими связями с использованием параллельной коррекции на основе модального управления. По точности и качеству регулирования координат, а также поддержанию электромеханического распора при воздействии возмущающих факторов, наиболее совершенным вариантом, из числа описанных в [2, 4], является следящая система, изображенная на рис. 2.

На схеме рис. 2 целевая координата (положение) и моменты распора регулируются отдельно. Для учета влияния упругих связей УС1 и УС2 использованы контуры регулирования моментов упругого взаимодействия, индивидуальные для каждого электропривода. Положение регулируется общим контуром с регулятором РП и датчиком ДПО. Электроприводы создают моменты  $M_1$  и  $M_2$ , которые всегда имеют неизменные противоположные направления и в зависимости от знака управляющего воздействия  $M_{дв}$  могут быть движущими или генераторными моментами распора  $M_p$ . Следовательно, один из электроприводов всегда работает в двигательном режиме, а другой в генераторном. Для переключения направления движущего момента использованы нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2 с однонаправленными характеристиками вход-выход. Момент  $M_{\Sigma}$ , приложенный к общей массе, равен сумме моментов электроприводов, как показано на рис. 1, б.

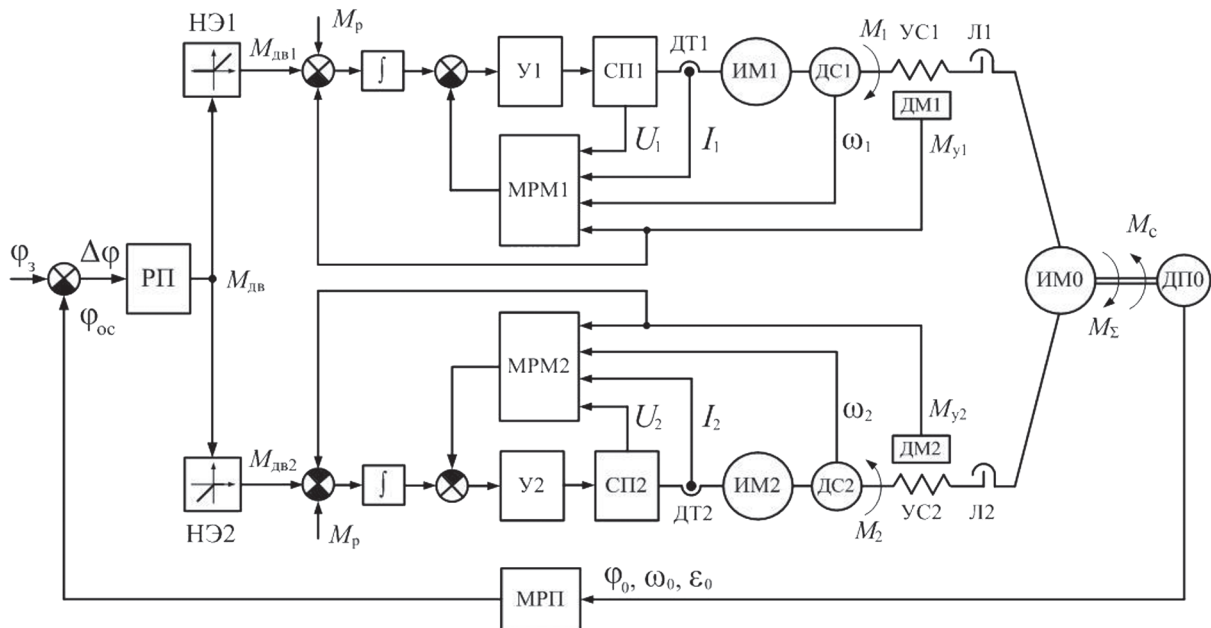


Рис. 2. Функциональная схема следящей электромеханической системы по схеме электромеханического распора с модальным управлением

В результате согласованного управления электроприводами люфт Л1–Л2 закрыт в статических и динамических режимах. Распор формируется автоматически, независимо от величины люфта и поддерживается во всем диапазоне изменения момента нагрузки.

Модальные регуляторы положения МРП и моментов МРМ1 и МРМ2 представляют собой совокупности обратных связей по переменным состояниям и совместно с усилителями У1, У2 и регулятором РП используются для формирования динамических свойств контуров. Для измерения переменных состояний, а именно, напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  силовых преобразователей СП1 и СП2, токов  $I_1$ ,  $I_2$  и скоростей вращения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  электроприводов, моментов упругости  $M_{y1}$  и  $M_{y2}$  использованы датчики напряжений, токов ДТ1 и ДТ2, моментов ДМ1 и ДМ2, положения ДПО, а скорость и ускорение вычисляются.

В данной системе при регулировании положения общей массы обеспечивается астатизм первого порядка по задающему и возмущающему воздействиям — моменту нагрузки  $M_c$ . Астатическим свойством система обладает и при регулировании моментов распора, чем обеспечивается их стабилизация при движении общей массы ИМ0. Астатические свойства системы достигнуты благодаря использованию интегрирующего И-регулятора положения и И-регуляторов моментов упругого взаимодействия.

Анализ системы позволяет указать недостатки, отрицательно влияющие на точность и динамику:

- характеристический полином замкнутого контура регулирования положения имеет восьмой порядок, и для задания динамических свойств этого контура требуется использовать модальный регулятор, состоящий также из восьми обратных связей по переменным состояниям;
- использование И-регуляторов моментов упругости не позволяет замкнуть контур положения по коор-

динамам электрических двигателей и силовых преобразователей. Модальный регулятор положения МРП может быть образован только обратными связями по координатам общей массы, из которых сравнительно легко измерить или вычислить ее положение, скорость движения и ускорение;

- недостаточное количество обратных связей, образующих редуцированный модальный регулятор положения, приводит к влиянию некомпенсированной инерционности на точность и динамику. Это влияние может быть в некоторой мере уменьшено при повышении быстродействия регулирования моментов распора или при снижении быстродействия контура регулирования положения;

- для ограничения тока (электромагнитного момента) электроприводов требуются обратные связи с отсечками. При их расчете с учетом влияния на динамику требуется отдельная процедура синтеза.

Предложены модернизированная структура системы регулирования координат упругой ЭМС с электро-механическим торсионом и методика синтеза ее параметров с целью повышения точности, быстродействия и качества управления в целом.

### Содержание и методология разработки

На рис. 3 показана функциональная схема системы регулирования координат модернизированной торсионной ЭМС, в которой (по сравнению с исходной системой) достигнуты повышенная точность и улучшенная динамика. Решение задач улучшения динамики и повышения точности состоит в совместном использовании последовательных и параллельных корректирующих звеньев. Параллельные модальные регуляторы предназначены для формирования динамических свойств контуров системы управления, а последовательные — для компенсации инерционности

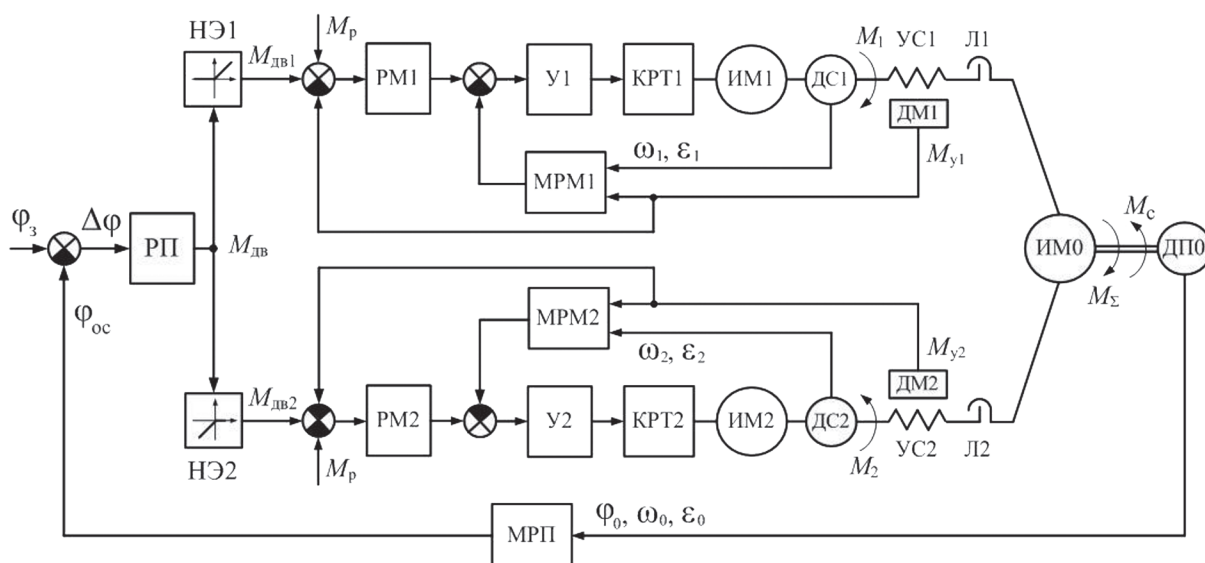


Рис. 3. Функциональная схема модернизированной следящей электромеханической системы с электромеханическим распором

подчиненных им объектов управления. В модернизированной системе дополнительно введены контуры регулирования токов (электромагнитных моментов) электрических двигателей.

Контуры в схеме на рис. 3 выделены таким образом, чтобы последовательные регуляторы не были сложнее пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов, а для параллельной коррекции использовались координаты, доступные для прямого измерения или легко вычисляемые. В ЭМС могут быть использованы различные типы электрических двигателей, при управлении которыми формируются линейные механические характеристики, например, двигатели постоянного тока независимого возбуждения, асинхронные или синхронные двигатели с векторным управлением.

Синтез системы регулирования проводится для одного из электроприводов, начиная с внутреннего контура, при условии, что люфты закрыты. Контуры регулирования токов КРТ1, КРТ2 на примере электроприводов постоянного тока имеют пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы РТ (рис. 4), предназначенные для компенсации электромагнитной инерции якорных цепей ЯЦ. Регуляторы тока настраиваются на максимальное быстродействие, ограниченное полосой пропускания силовых преобразователей, при минимальном перерегулировании (техническом оптимуме) [7].

Следует отметить, что использование КРТ упрощает реализацию ограничения токов электроприводов по сравнению с исходной системой управления.

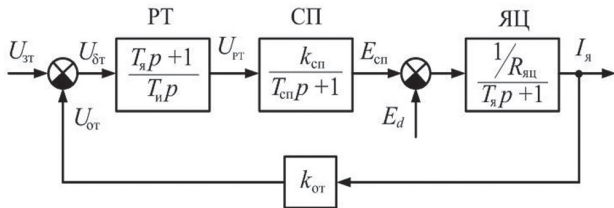


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования тока

Схема двухконтурной структуры регулирования момента упругости кинематической передачи, показанная на рис. 5, поясняет выбор обратных связей, образующих модальный регулятор момента МРМ внутреннего контура, и структуры последовательного регулятора момента РМ внешнего контура.

Требуется обеспечить заданную динамику регулирования момента распора и его астатическую стабилизацию. Объект управления внутреннего контура образован контуром тока КРТ, настроенным на технический оптимум, инерционной массой ИМ электропривода и упругой связью УС. Характеристический полином объекта управления имеет третий порядок, и для его коррекции модальный регулятор должен состоять из обратных связей по трем переменным состояния. Считается, что возмущающие воздействия отсутствуют  $M_n = 0, \omega_0 = 0$ .

Для замыкания внутреннего контура выбраны обратные связи по координатам — моменту упругости  $M_y$ , скорости вращения  $\omega$  и ускорению  $\epsilon$  ротора электрического двигателя, так как в замкнутой системе каждая из них независимо от остальных обратных связей корректирует коэффициенты характеристического полинома. Вместо обратной связи по ускорению ротора для упрощения может быть использована обратная связь по току якорной цепи (электромагнитному моменту) двигателя.

Синтез модального регулятора проводится, исходя из равенства коэффициентов характеристического полинома замкнутого контура и эталонного полинома, у которого задано желаемое расположение корней на комплексной плоскости и, следовательно, динамика системы. При этом коэффициенты должны быть выражены через параметры объекта управления и коэффициенты обратных связей. Эталонный полином выбирается при компромиссе быстродействия и качества регулирования. Мерой быстродействия являются базовая частота  $\Omega$  и нормированная длительность  $\tau$  реакции на скачок задающего воздействия, а мерой качества — перерегулирование  $\sigma$  [7].

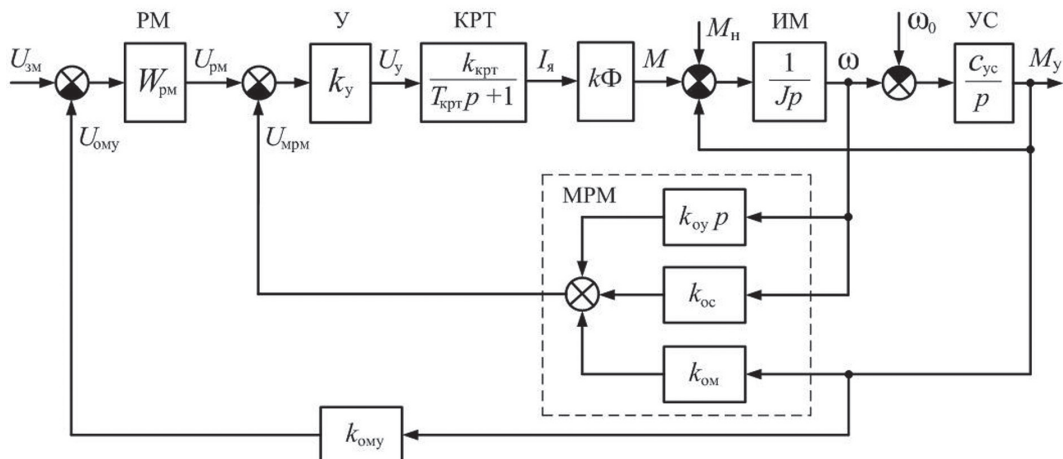


Рис. 5. Структурная схема контура регулирования момента упругости

Внутренний контур не имеет астатизма по возмущающим факторам и при движении общей массы или наличии момента нагрузки момент распора не равен заданной величине. Для устранения данного недостатка обычно в контур вводят интегральную составляющую. Однако при использовании обратной связи по току (электромагнитному моменту) двигателя (даже с интегральной составляющей регулятора) астатическая стабилизация момента распора при наличии возмущающих воздействий не обеспечивается, поэтому использована структура, в которой внутренний контур, замкнутый модальным регулятором, охвачен внешним контуром с регулятором РМ (рис. 5). Указанный регулятор, в отличие от И-регулятора в исходной схеме (рис. 2), имеет пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие. Форсирующее действие ПИД-регулятора компенсирует инерционность внутреннего контура, а именно, два его полюса. Этим обеспечивается более динамичное регулирование момента распора по сравнению с исходной системой.

В результате последовательной и параллельной коррекции внешний контур имеет полином второго порядка, а его передаточная функция может быть выражена через показатели динамики

$$W_{\text{крп}}(p) = \frac{k_{\mu}}{p^2 + \Omega_{\mu}p + k_{\mu}k_{\text{ому}}} = \frac{k_{\mu}}{H_{\mu 2}p^2 + H_{\mu 1}\Omega_{\mu}p + H_{\mu 0}\Omega_{\mu}^2},$$

где  $k_{\mu}$  — коэффициент усиления прямого канала внешнего контура;  $\Omega_{\mu}$ ,  $\Omega_{\mu}$  — базовые частоты внутреннего и внешнего контуров;  $k_{\text{ому}}$  — коэффициент обратной связи по моменту упругого взаимодействия;  $H_{\mu i}$  — коэффициенты нормированного характеристического полинома внешнего контура.

Выбрав эталонный характеристический полином и задав, таким образом, динамические свойства внешнего контура, можно рассчитать коэффициенты обратных связей по ускорению  $k_{\text{оу}}$  и скорости  $k_{\text{ос}}$  вращения двигателя, моменту упругости  $k_{\text{ом}}$ , а также коэффициенты последовательных регуляторов по соотношениям, связывающим указанные коэффициенты с параметрами электроприводов и показателями динамики. Практи-

чески быстродействие внешнего контура ограничено и задается с учетом динамики силового преобразователя

$$t_{\mu} = (3,5 \dots 4)T_{\text{сп}}; \quad \Omega_{\mu} = \tau_{\mu}/t_{\mu},$$

где  $\tau_{\mu}$ ,  $t_{\mu}$  — нормированная и действительная длительности переходного процесса;  $T_{\text{сп}}$  — постоянная времени силового преобразователя.

Динамика регулирования моментов распора обоих электроприводов должна быть настроена одинаково, а момент распора задан в пределах 10...20 % от номинального момента электроприводов [1].

На рис. 6 показана структурная схема контура регулирования положения (КРП) общей массы.

В отличие от исходной системы для достижения более динамичного управления в модернизированной системе используется ПИД-регулятор положения РП. Передаточная функция прямого канала КРП имеет пять полюсов, два из которых (ненулевые) следует компенсировать форсирующим действием ПИД-регулятора РП. В замкнутом контуре оставшиеся три полюса корректируются модальным регулятором положения МРП, образованным обратными связями по положению  $\Phi_0$ , скорости движения  $\omega_0$  и ускорению  $\epsilon_0$  общей массы.

В результате коррекции передаточная функция замкнутого контура регулирования положения имеет следующий вид:

$$W_{\text{крп}}(p) = \frac{k_{\phi}}{p^3 + k_{\phi}k_{\text{оу}0}p^2 + k_{\phi}k_{\text{ос}0}p + k_{\phi}k_{\text{оп}0}} = \frac{k_{\phi}}{H_{\phi 3}p^3 + H_{\phi 2}\Omega_{\phi}p^2 + H_{\phi 1}\Omega_{\phi}^2p + H_{\phi 0}\Omega_{\phi}^3}, \quad (1)$$

где  $\Omega_{\phi}$  — базовая частота контура регулирования положения;  $H_{\phi i}$  — коэффициенты нормированного характеристического полинома;  $k_{\phi}$  — коэффициент усиления прямого канала КРП;  $k_{\text{оу}0}$ ,  $k_{\text{ос}0}$ ,  $k_{\text{оп}0}$  — коэффициенты обратных связей по ускорению, скорости и положению.

Контур регулирования положения, согласно принципу модального управления, может быть настроен по критериям быстродействия, точности и качества управления. При заданном качестве управления (перегулировании  $\sigma_{\phi}$ ) введена длительность переходного процесса  $t_{\phi}$  или добротность по скорости  $D_{\omega}$ , которая характеризует установившуюся ошибку  $\Delta\phi$  при дви-

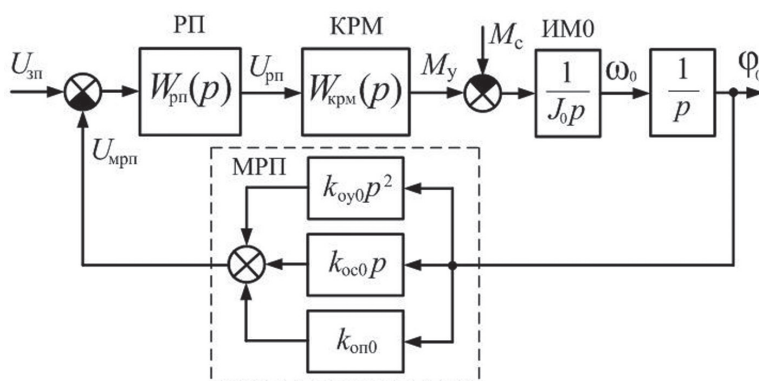


Рис. 6. Структурная схема контура регулирования положения общей массы

жении с постоянной скоростью заводки  $\omega_3$ . Нормированный полином третьего порядка с нормированным быстродействием  $\tau_\varphi$  выбирается в зависимости от перерегулирования  $\sigma_\varphi$ .

Исходя из вида передаточной функции (1), все коэффициенты характеристического полинома контура регулирования положения корректируются обратными связями. Следовательно, для контура может быть задана любая динамика, однако его быстродействие следует ограничить с учетом динамики регулирования моментов распора

$$t_\varphi = (2,5 \dots 3)t_\mu; \quad \Omega_\varphi = \tau_\varphi / t_\varphi.$$

Следует отметить, что в характеристическом полиноме контура регулирования положения исходной системы имеются коэффициенты при старших степенях  $p$ , которые не корректируются обратными связями по положению скорости и ускорению общей массы. Для снижения их влияния на динамику разница  $t_\varphi$  и  $t_\mu$  должна быть значительной. При ограниченном быстродействии регулирования моментов распора это достигается путем снижения быстродействия регулирования положения.

Для оценки точности и быстродействия регулирования положения использовано следующее соотношение

$$D_\omega = \frac{\omega_3}{\Delta\varphi} = \Omega_\varphi \frac{H_{\varphi 0}}{H_{\varphi 1}} = \frac{\tau_\varphi H_{\varphi 0}}{t_\varphi H_{\varphi 1}},$$

позволяющее сделать вывод о повышении точности модернизированной системы по сравнению с исходной системой. При равном с исходной системой быстродействии (величине  $t_\varphi$ ) и апериодических переходных процессах ее добротность повышена на 30%. При расчетах для исходной системы использован характеристический полином восьмого порядка с  $\tau_\varphi = 13$ ,  $H_{\varphi 0} = 1$ ,  $H_{\varphi 1} = 8$ , а для модернизированной системы — полином третьего порядка с  $\tau_\varphi = 6,3$ ,  $H_{\varphi 0} = 1$ ,  $H_{\varphi 1} = 3$ . Недостатком предложенной системы регулирования является сложность ее настройки, что, однако, характерно для систем с модальным управлением.

### Математическое моделирование

Исследование электромеханической системы выполнено методом компьютерного моделирования в системе Matlab/Simulink и показало соответствие расчетных и модельных показателей точности и динамики регулирования координат. На рис. 7 представлены

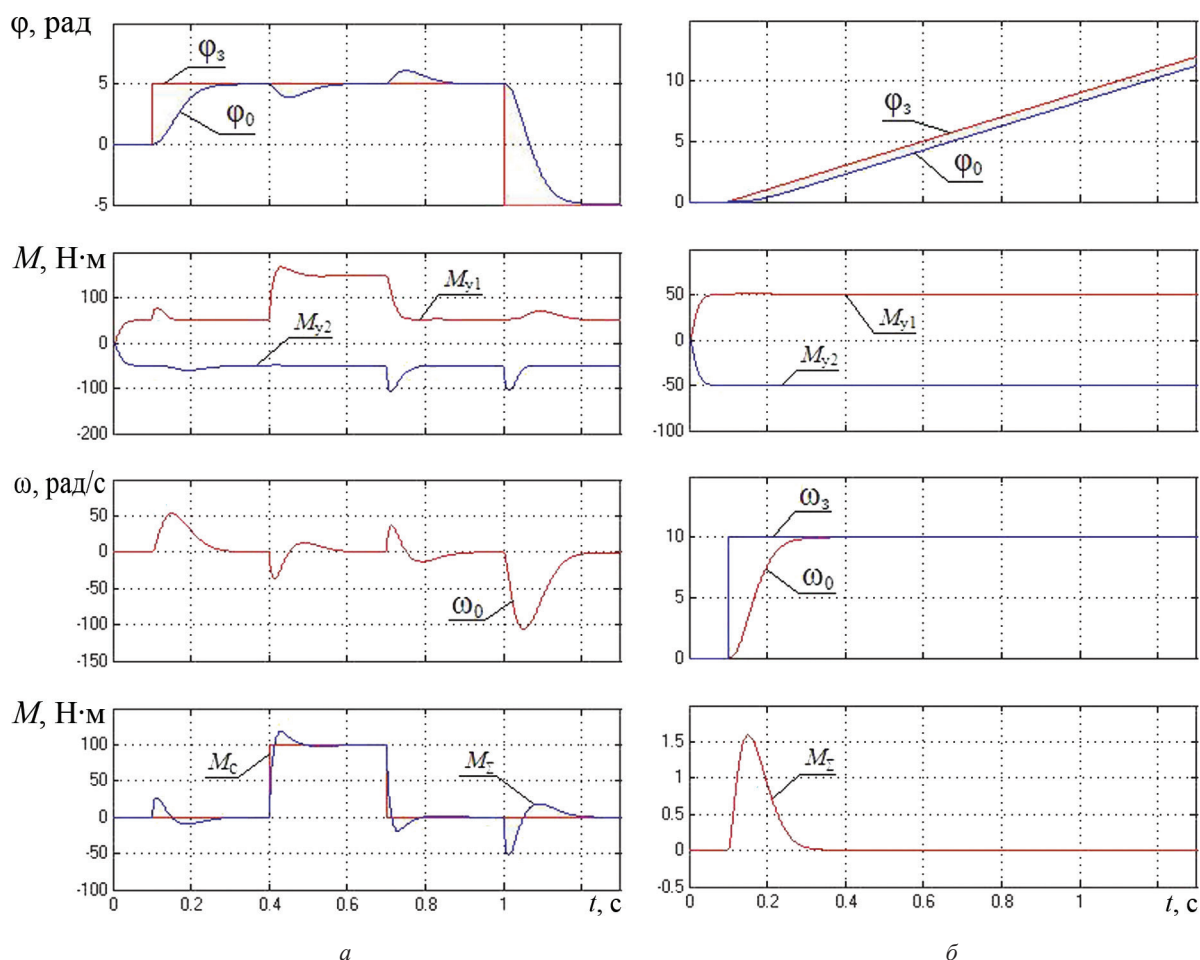


Рис. 7. Переходные процессы в электромеханической системе:

а — при скачке задающего воздействия, приложении и снятии нагрузки, реверсе; б — при движении с постоянной скоростью заводки

графики изменения координат электромеханической системы при отработке скачка задающего воздействия, приложении и снятии нагрузки, реверсе, а также движении с постоянной скоростью заводки. Во всех случаях предварительно отработан процесс электромеханической выборки люфта при его первоначальном раскрытии на произвольный угол. Процесс имеет заданный аperiodический вид и расчетную длительность. Графики демонстрируют астатические свойства ЭМС при регулировании положения и стабилизации моментов распора. Стабилизацией моментов распора на заданном уровне и динамикой их регулирования гарантируется, что элементы кинематической передачи находятся в зацеплении и люфт не раскрывается под воздействием нагрузки и в переходных режимах движения ЭМС, в том числе при реверсе.

Переходные процессы при регулировании положения имеют заданные аperiodический характер ( $\sigma_{\varphi} = 0$ ) и время достижения установившегося значения. При воздействии момента нагрузки ошибка регулирования положения равна нулю. Фактически она зависит от решающей способности датчика положения. Модельная добротность по скорости соответствует расчетной величине  $D_{\omega} = 13,3 \text{ с}^{-1}$ . Переключение между двигательным и генераторным режимами электроприводов происходит в зависимости от направления движущего момента.

## Выводы

Предложена модернизированная структура системы регулирования координат упругой ЭМС с электромеханическим торсионом. Структурные решения на основе модального управления и последовательной коррекции позволяют реализовать астатическое регулирование положения и моментов распора и по сравнению с исходной электромеханической системой повысить быстродействие и точность регулирования координат.

Предложенные рекомендации по синтезу параметров системы управления позволяют настраивать ее на заданные показатели быстродействия, характера протекания переходных процессов и точности.

## Литература

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982.
2. Пат. № 2316886 РФ. Способ управления взаимосвязанными электроприводами (варианты) / С.В. Тарарыкин, В.А. Иванков, В.В. Тютиков, Е.В. Красильникьянц // Бюл. изобрет. 2008. № 4.
3. Саранцев С.С. Структурно-параметрический синтез электропривода с нелинейностью типа «люфт» в кинематической цепи: автореф. ... канд. техн. наук. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013.

4. Иванков В.А. Разработка и исследование цифровой системы контурно-позиционного управления редукторными электроприводами многоцелевых металлорежущих станков: автореф. ... к.т.н. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2008.

5. Абрахим А.А. Управление скоростью трехмассового радиотелескопа на основе модального адаптивного управления // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 145.

6. Благодаров Д.А. и др. Развитие систем управления электроприводами с упругими связями // Электротехника. 2015. № 1. С. 26—28.

7. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издат. дом МЭИ, 2015.

## References

1. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. Upravlenie Elektroprivodami. L.: Energoizdat, 1982. (in Russian).
2. Пат. № 2316886 РФ. Sposob Upravleniya Vzaimosvyazannymi Elektroprivodami (Varianty) / S.V. Tararykin, V.A. Ivankov, V.V. Tyutikov, E.V. Krasil'nik'yants // Byul. Izobret. 2008;4. (in Russian).
3. Sarantsev S.S. Strukturno-parametricheskij Sintez Elektroprivoda s Nelineynost'yu Tipa «Lyuft» v Kinemacheskoy Tsepi: Avtoref. ... Kand. Tekhn. Nauk. Samara: Samarskiy Gos. Tekhn. Un-t, 2013. (in Russian).
4. Ivankov V.A. Razrabotka i Issledovanie Tsifrovoy Sistemy Konturno-pozitsionnogo Upravleniya Reduktornymi Elektroprivodami Mnogotsel'evykh Metallorezhushchikh Stankov: Avtoref. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskij Un-t, 2008. (in Russian).
5. Abrakhim A.A. Upravlenie Skorost'yu Trekhmassovogo Radioteleskopa na Osnove Modal'nogo Adaptivnogo Upravleniya. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2013;2:145. (in Russian).
6. Blagodarov D.A. i dr. Razvitie Sistem Upravleniya Elektroprivodami s Uprugimi Svyazyami. Elektrotehnika. 2015;1:26—28. (in Russian).
7. Anuchin A.S. Sistemy Upravleniya Elektroprivodov. M.: Izdat. Dom MPEI, 2015. (in Russian).

## Сведения об авторе

Полушечков Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханических систем филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

## Information about author

Polyushchenkov Igor S. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanical systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: polyushenckov.igor@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2017