

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С АВТОНАСТРОЙКОЙ РЕГУЛЯТОРА В ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.В. Кожевников, Т.Н. Кочнева, Н.В. Кочнев

Представлена математическая модель системы управления линеаризованной двухмассовой электромеханической системой с модальным регулятором. Исследованы показатели качества переходных процессов в системе управления, дано их сравнение с характеристиками структуры подчиненного регулирования. Показана высокая эффективность модального управления электроприводами с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления. Рассмотрены методы автоматической настройки модального регулятора системы, показана эффективность применения для автонастройки регулятора метода прямого поиска по шаблону по сравнению с генетическими алгоритмами.

Ключевые слова: модальное управление, двухмассовая электромеханическая система, автонастройка регулятора, генетический алгоритм, метод прямого поиска.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из самых эффективных инструментов управления технологическими переменными промышленных установок, непосредственно связанными с качеством и количеством выпускаемой продукции, служат электромеханические системы (ЭМС) — электрические приводы, включающие в себя силовую преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и исполнительный орган. Работа ЭМС зачастую сопровождается упругими деформациями, которые вызывают колебания системы, что негативно сказывается на сроке службы оборудования и приводит к росту потерь электроэнергии. Поэтому в современных автоматизированных системах управления должны учитываться эти негативные факторы и в алгоритмах их следует предусматривать работы методы снижения негативных последствий от различных колебаний.

В настоящее время для подавляющего большинства применяемых в промышленности ЭМС характерно использование одноконтурных систем автоматизированного управления с типовыми П,

ПИ, ПИД-регуляторами или систем подчиненного регулирования (СПР) координат. Для инерционных объектов невысокого порядка, характеризующихся отсутствием взаимного влияния координат состояния и выраженных колебательных свойств, такое решение оправдано и позволяет строить системы автоматического управления, отвечающие достаточно высоким технологическим требованиям. Подобные системы пригодны и для более сложных объектов, но при невысоких технических требованиях к качеству процессов управления. Однако применение СПР в системах с нежесткой механикой не всегда дает удовлетворительные результаты.

Существующие системы управления автоматизированными приводами динамических систем не всегда могут обеспечить стабильность технологического процесса [1]. Колебательные процессы имеют случайный характер и, как правило, очень зашумлены, поэтому электромеханические динамические системы в таких случаях должны быть малочувствительными к изменению основных характеристик элементов электропривода (момента

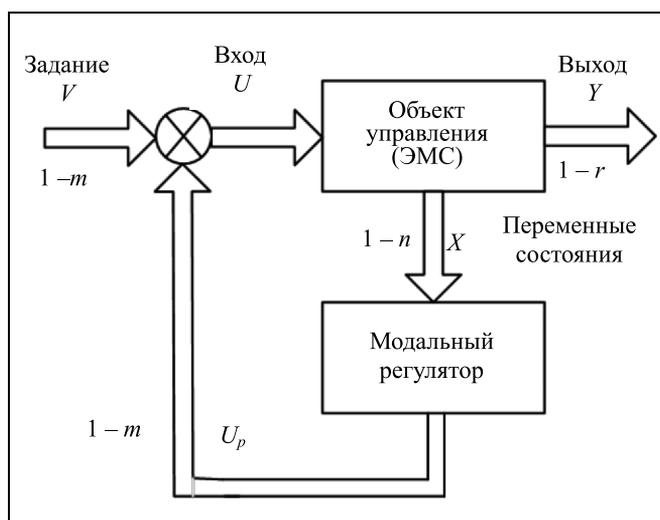


Рис. 1. Схема системы модального управления

инерции, коэффициента жесткости) в достаточно широком диапазоне, определяемом особенностями технологического процесса [1, 2].

Применение модального управления предоставляет разработчику широкие возможности в обеспечении требуемых показателей качества протекания процессов и устойчивости систем управления, поэтому в последние десятилетия вопросам анализа и синтеза систем модального управления уделяется большое внимание, см., например, работы [3–7].

Главные преимущества модального управления: синтезированная система модального управления объектом не требует проверки на устойчивость (так как она заранее должна быть устойчивой и обладать требуемой степенью устойчивости) и введения дополнительных корректирующих устройств (так как она сама уже удовлетворяет требуемым показателям качества).

Общий вид структуры модального управления электромеханической системой приведен на рис. 1, где m — размерность вектора параметров выхода модального регулятора U_p , n — размерность вектора переменных состояния X , r — размерность вектора переменных выхода объекта управления Y , V — вектор сигнала задания.

1. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суть модального управления состоит в определении численных значений коэффициентов передачи безынерционных обратных связей по всем переменным состояниям объекта с целью обеспечения заданного распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы автома-

тизированного управления. В зависимости от порядка системы таких коэффициентов может быть достаточно много, что повлечет за собой как сложность и громоздкость формул, так и последующих расчетов, а для высокого порядка системы — невозможность формирования такого аналитического представления, которое можно использовать в расчетах.

Несмотря на свой значительный потенциал, модальный метод проектирования регуляторов в настоящее время нечасто применяются в инженерной практике, поскольку:

- чаще всего реальные объекты нелинейные и в отдельных случаях даже не имеют постоянной структуры, и применение модального метода, изначально предназначенного для синтеза линейных систем, в разработке систем управления такими объектами до сих пор оставалось проблематичным;

- параметры модальных регуляторов (коэффициенты обратной связи) не несут достаточно очевидной смысловой нагрузки и потому при «ухудшении» параметров объекта не могут быть настроены непосредственно разработчиком, как в случае с традиционными регуляторами;

- будучи аналитическим, метод модального синтеза в большей степени, чем классические методы, зависит от точности модели системы.

Применение методов модального управления в решении задач электроприводной техники — сравнительно молодое направление, применение в этой области различных интеллектуальных инструментов встречается довольно редко. Также, несмотря на большое число работ, посвященных модальному синтезу систем управления, не предложено универсальных каких-либо решений в плане частичной или полной автоматизации процесса автоматизации формирования параметров настройки регуляторов без использования аналитических зависимостей.

Для решения подобных задач нужны новые эффективные подходы, можно найти в теории искусственного интеллекта.

2. СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Модальный регулятор преобразует вектор состояния $X(t)$ объекта в вектор управления $U(t)$.

Необходимо найти матрицу коэффициентов K , обеспечивающую желаемые показатели качества замкнутой по вектору состояния системы управления: перерегулирование σ , характеризующее уровень демпфирования системы или степень плав-

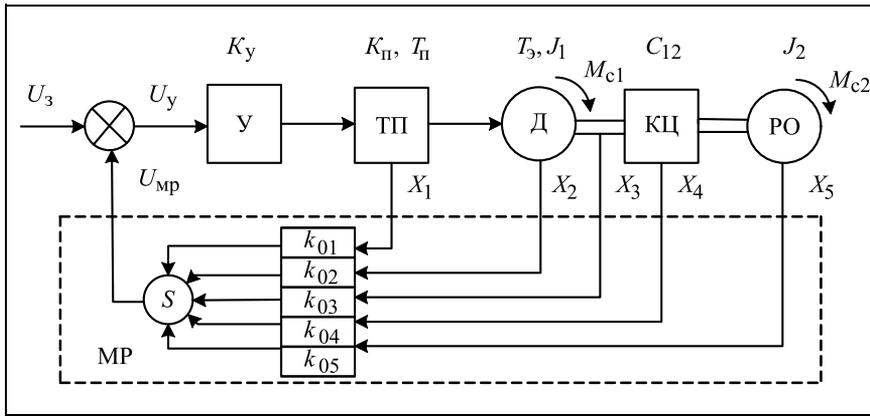


Рис. 2. Функциональная схема двухмассовой ЭМС с модальным регулятором

циентом передачи K_d , сопротивлением якорной цепи $R_я$, электромагнитной $T_э$ и электромеханической T_m постоянными времени, угловой скоростью ω и моментом трения M_{c1} ; модальный регулятор с коэффициентами передачи входов $K_{01} - K_{05}$ и сумматором S ; упругое звено кинематическая цепь (КЦ) с коэффициентом жесткости C_{12} ; рабочий орган (РО) с моментом инерции J_2 и моментом сопротивления M_{c2} .

ности рабочего органа; время переходного процесса $t_{пн}$, время первого достижения установившегося значения скорости $t_{п}$, характеризующее быстродействие системы; жесткость β_3 или статизм δ механической характеристики электропривода.

Существует множество типовых нормированных уравнений эталонных моделей. В работе [8] показано, что для модального управления электроприводом лучшей совокупностью характеристик обладают полином Бесселя, стандартные формы, минимизирующие интеграл модуля ошибки, и полином Грехема — Летропа.

В работе [9] разработана математическая модель определения параметров модального регулятора желаемой формы, исследованы показатели качества переходных процессов для рассматриваемого объекта, оценены показатели эффективности применения модальных регуляторов в системах управления электрических приводов.

Выполним синтез модального регулятора для двухмассового электропривода с упругим механическим звеном. Упругое звено с коэффициентом жесткости C_{12} связывает две массы: ротора и рабочего органа с моментами инерции J_1 и J_2 . В подобной системе при определенном соотношении параметров возможен резко колебательный характер движения. Задача управления: обеспечение заданных показателей в статике и динамике, обеспечение устойчивости и стабилизации движения.

Структурная схема двухмассовой электромеханической системы с модальным регулятором приведена на рис. 2.

Основные элементы схемы: усилитель U с коэффициентом усиления K_y ; тиристорный преобразователь $ТП$ с ЭДС $E_{пн}$, коэффициентом усиления $K_{пн}$ и постоянной времени $T_{пн}$; двигатель $Д$ постоянного тока независимого возбуждения с коэффи-

циентом усиления $K_{пн}$ и постоянной времени $T_{пн}$; двигатель $Д$ постоянного тока независимого возбуждения с коэффициентом усиления K_d , сопротивлением якорной цепи $R_я$, электромагнитной $T_э$ и электромеханической T_m постоянными времени, угловой скоростью ω и моментом трения M_{c1} ; модальный регулятор с коэффициентами передачи входов $K_{01} - K_{05}$ и сумматором S ; упругое звено кинематическая цепь (КЦ) с коэффициентом жесткости C_{12} ; рабочий орган (РО) с моментом инерции J_2 и моментом сопротивления M_{c2} .

Напряжение управления U_y формируется сравнением напряжения задания U_3 и напряжения $U_{мп}$ модального регулятора MP .

Для анализа воспользуемся системой уравнений, рассмотренной в работе [9]:

$$\begin{aligned} (T_{пн}p + 1)E_{пн} &= K_y K_{пн} U_y, \\ (T_э p + 1)I_я &= (E_{пн} - \omega_1 / K_d) / R_я, \\ J_1 p \omega_1 &= I_я / K_d - M_{c1} - M_{12}, \\ M_{12} &= C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \\ J_2 p \omega_2 &= M_{12} - M_{c2}, \\ \omega_1 &= p\varphi_1, \\ \omega_2 &= p\varphi_2. \end{aligned}$$

Здесь M_{12} — упругий момент, ω_1 и φ_1 — угловая скорость и угол поворота двигателя, ω_2 и φ_2 — угловая скорость и угол поворота рабочего органа.

Выбираем переменные состояния:

$$x_1 = E_{пн}, \quad x_2 = I_я, \quad x_3 = \omega_1, \quad x_4 = M_{12}, \quad x_5 = \omega_2.$$

Решая систему уравнений относительно ω_2 , получаем уравнение разомкнутого электропривода:

$$\begin{aligned} (d_0 p^5 + d_1 p^4 + d_2 p^3 + d_3 p^2 + d_4 p + d_5) \omega_2 &= \\ &= K_0 U_y - b_0 M_{c1} / \beta - (b_1 p^4 + b_2 p^3 + b_3 p^2 + \\ &+ b_4 p + b_5) M_{c2} / \beta, \end{aligned}$$

где $K_0 = K_y K_{пн} K_d$.

Формируем коэффициенты: $d_0 = T_{пн} T_m T_э T_2^2$, $d_1 = (T_{пн} + T_э) T_m T_2^2$, $d_2 = T_m T_2^2 + T_{пн} (\gamma T_э T_m + T_2^2)$, $d_3 = T_2^2 + \gamma T_m (T_{пн} + T_э)$, $d_4 = \gamma T_m + T_{пн}$, $d_5 = 1$; $b_0 = 1$,

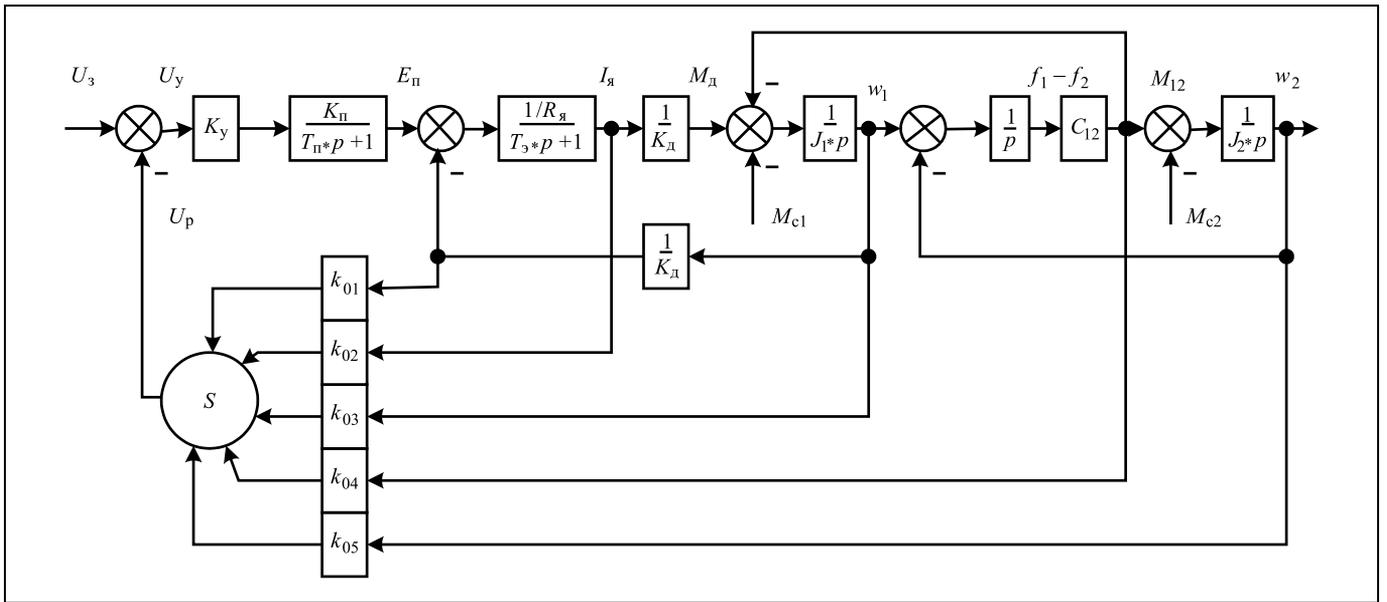


Рис. 3. Структурная схема модели двухмассовой ЭМС с модальным регулятором

$$b_1 = T_{\pi} T_3 T_1^2, \quad b_2 = (T_{\pi} + T_3) T_1^2, \quad b_3 = T_1^2 + T_{\pi} (T_3 + \beta / C_{12}), \quad b_4 = T_{\pi} + T_3 + \beta / C_{12}, \quad b_5 = 1.$$

Здесь $T_m = J_1 / \beta$ — механическая постоянная времени двигателя; $T_2 = \sqrt{J_2 / C_{12}} = 1 / \Omega_2$ — резонансная постоянная времени рабочего органа, Ω_2 — его резонансная частота; $T_1 = \sqrt{J_1 / C_{12}} = 1 / \Omega_1$ — резонансная постоянная времени ротора, Ω_1 — его резонансная частота; $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ — коэффициент распределения моментов инерции; β — жесткость механической характеристики разомкнутого электропривода.

Составим уравнение замыкания:

$$U_y = U_3 + \Sigma k_{0i} x_i = U_3 - (k_{01} E_{\pi} + k_{02} I_{я} + k_{03} \omega_1 + k_{04} M_{12} + k_{05} \omega_5).$$

Выразив переменные через ω_2 , получим:

$$(D_0 p^5 + D_1 p^4 + D_2 p^3 + D_3 p^2 + D_4 p + D_5) \omega_2 = K_0 U_y - B_0 M_{с1} / \beta - (B_1 p^4 + B_2 p^3 + B_3 p^2 + B_4 p + B_5) M_{с2} / \beta,$$

где коэффициенты $D_0 = d_0$, $D_1 = d_1 + k_1 T_3 T_m T_2^2$, $D_2 = d_2 + (k_1 + k_2) T_2^2$, $D_3 = d_3 + k_1 (\gamma T_3 T_m + T_2^2) + k_3 T_2^2$, $D_4 = d_4 + (k_1 + k_2) \gamma T_m + k_4 (\gamma - 1) T_m + k_3 \beta / C_{12}$, $D_5 = 1 + k_1 + k_3 + k_5$; $B_0 = 1 + k_1 + k_2$, $B_1 = b_1$, $B_2 = b_2 + k_1 T_3 T_1^2$, $B_3 = b_3 + (k_1 + k_2) T_1^2$, $B_4 = b_4 + k_1 (T_3 + \beta / C_{12})$, $B_5 = 1 + k_1 + k_2 + k_4$.

Коэффициенты передачи системы модального управления:

$$k_1 = K_y K_{\pi} k_{01}, \quad k_2 = K_y K_{\pi} k_{02} / R_{я}, \quad k_3 = K_y K_{\pi} K_{д} k_{03}, \\ k_4 = K_y K_{\pi} k_{04} / (R_{я} K_{д}), \quad k_5 = K_y K_{\pi} K_{д} k_{05}.$$

Далее выбирается нормированное уравнение эталонной модели пятого порядка в форме нормируемого оператора дифференцирования S для замкнутого по обратным связям электропривода по желаемым значениям перерегулирования $\sigma_{жел}$ и времени переходных процессов $t_{пп, жел}$:

$$S^5 + c_1 S^4 + c_2 S^3 + c_3 S^2 + c_4 S + 1 = 0.$$

Находим общие коэффициенты усиления МР при задании базисной частоты ω_6 :

$$k_1 = (d_0 c_1 \omega_6 - d_1) / (T_m T_3 T_2^2), \\ k_2 = (d_0 c_2 \omega_6^2 - d_2) / (T_m T_2^2) - k_1, \\ k_3 = [(d_0 c_3 \omega_6^3 - d_3) - k_1 (\gamma T_m T_3 + T_2^2)] / T_2^2, \\ k_4 = [(d_0 c_4 \omega_6^4 - d_4) - (k_1 + k_2) \gamma T_m] / T_m (\gamma - 1), \\ k_5 = [(d_0 c_5 \omega_6^5 - d_5) - (k_1 + k_3)].$$

При определении коэффициентов k_i желательно выполнение условия $k_i > 0$, что соответствует отрицательным обратным связям и обеспечивает робастность системы (низкую чувствительность к

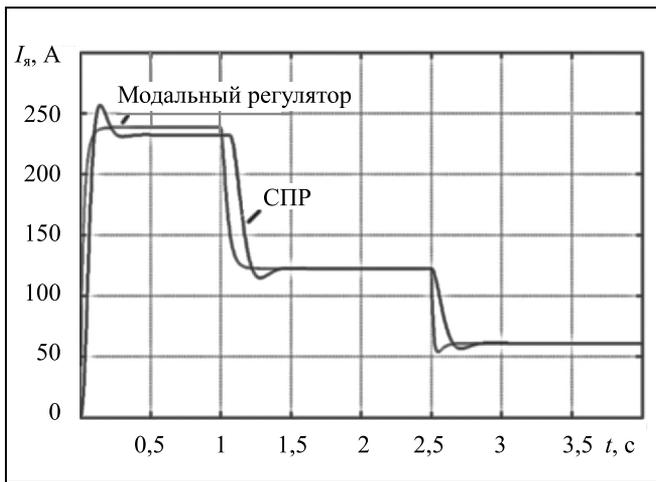


Рис. 4. Графики изменения тока якоря двигателя постоянного тока

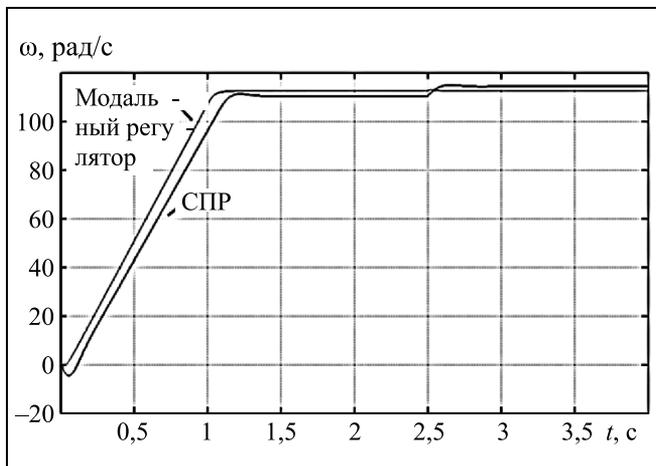


Рис. 5. Графики изменения угловой скорости двигателя постоянного тока

изменениям параметров режима в контурах x_j). При $k_1 \geq 0$ ограничивается значение базисной частоты:

$$\omega_6 \geq d_1/(d_0 c_1) = (1/T_3 + 1/T)_n/c_1.$$

Определяем коэффициенты собственно модального регулятора:

$$\begin{aligned} k_{01} &= k_1/(K_y K_n), \\ k_{02} &= k_2 R_y/(K_y K_n), \\ k_{03} &= k_3/(K_y K_n K_d), \\ k_{04} &= k_4 K_d R_y/(K_y K_n), \\ k_{05} &= k_5/(K_y K_n K_d). \end{aligned}$$

Механическая характеристика замкнутого электропривода:

$$\omega_2 = \frac{K_0 U_3}{1 + k_1 + k_3 + k_5} - \frac{(1 + k_1 + k_2) M_{c1} + (1 + k_1 + k_2 + k_4) M_{c2}}{\beta(1 + k_1 + k_3 + k_5)}.$$

Здесь M_c — момент трения в двигателе и передаче, M_{c2} — момент сопротивления рабочего органа, приведенный к двигателю.

Если пренебречь моментом трения, то жесткость механической характеристики замкнутой системы

$$\beta_3 = \frac{\beta(1 + k_1 + k_3 + k_5)}{1 + k_1 + k_2 + k_4}.$$

Таким образом, выбранные переменные состояния различно воздействуют на жесткость β_3 :

- обратные связи по току и моменту уменьшают жесткость;
- обратные связи по скорости увеличивают жесткость механической характеристики.

Чтобы модальный регулятор повышал жесткость при любой настройке, надо выбрать другой набор переменных состояния, например:

$$\begin{aligned} x_1 &= dI_a/dt; & x_2 &= \varepsilon_1 = d\omega_1/dt; & x_3 &= \omega_1; \\ x_4 &= \varepsilon_2 = d\omega_2/dt; & x_5 &= \omega_2. \end{aligned}$$

В этом случае жесткость увеличится до величины

$$\beta_3 = \beta(1 + k_1 + k_3 + k_5) > \beta.$$

Основные показатели качества переходных режимов определены также для стандартной двухконтурной СПР с контурами регулирования тока и скорости. Моделирование переходных режимов осуществлялось в пакете MATLAB [11].

Проведено исследование процесса управляемого пуска системы с номинальной нагрузкой. В качестве возмущения выбран сброс 50 % нагрузки через 2,5 с. Сравнение графиков изменения параметров режима при управлении и возмущении приведены на рис. 4 и 5.

Результаты сравнения изменения основных параметров при управлении и возмущении (время переходного процесса $t_{\text{пн}}$, перерегулирование σ , статическая ошибка ε и показатель колебательности M) сведены в табл. 1.

Перерегулирование σ характеризует динамическую ошибку начала переходного процесса, а показатель колебательности M — число полных колебаний до достижения установившегося режима.

Таблица 1

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	При управлении				При возмущении			
		$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M
Ток якоря	САУ с МР	0,7	45	0	1,5	0,8	25	0	1,5
	САУ с СПР	1,8	35	0	9	6,0	35	0	12
Скорость w_2	САУ с МР	0,7	0	0	0,5	0,8	5	5	1,5
	САУ с СПР	1,8	5	-5	9	6,0	15	10	12

Сравнение параметров показывает, что САУ ЭМС с модальным управлением по всем показателям существенно превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по эффективности сглаживания колебаний и, особенно, по быстродействию: время переходных процессов $t_{пп}$ в контуре тока и скорости уменьшается от 1,8 с до 0,7 с, т. е. в 2,5 раза при реакции на управление, и от 6,0 с до 0,8 с, т. е. в 7,5 раза при реакции на возмущение; показатель колебательности M уменьшается от 9,0 до 1,5, т. е. в 6 раз при реакции на управление, и от 12 до 1,5 с, т. е. в 8 раз при реакции на возмущение. Модальная САУ превосходит также систему с подчиненным регулированием по перерегулированию σ (снижается от 5 % до нуля) и допустимой статической ошибке ε (снижается от 10 % до нуля).

3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционные методы синтеза регуляторов не всегда дают удовлетворительный результат для объектов высокого порядка. В этой связи особое значение приобретают методы синтеза регуляторов, позволяющие сформировать регулятор для объекта сколь угодно высокого порядка.

В связи с повышением возможностей средств вычислительной техники появляется множество различных методов расчета и алгоритмов, достаточно легко реализуемых программно, но в то же время позволяющих быстро и качественно решать задачи, заменяя собой сложные расчеты.

Одними из наиболее перспективных являются методы, основанные на применении методов генетических алгоритмов или прямого поиска по шаблону [10–12].

Рассмотрим применение этих методов для оптимизации автонастройки модальных регуляторов по критерию минимума интеграла ошибки. В этом случае отпадает необходимость в расчетах, система

сформирует требуемые параметры обратных связей автоматически в режиме реального времени.

Идентификация объекта осуществляется по переходной характеристике замкнутой системы управления. Система может работать в режиме предварительной настройки (off-line) и режиме реального времени (on-line).

В САУ (рис. 6) применяется автонастройка модального регулятора электропривода путем формирования матрицы коэффициентов обратных связей K_{oc} при сравнении показателей режимов эталонной модели $X_{эт}$ и объекта управления $Y-X$ и доведении их рассогласования до заданной ошибки регулирования D . Блок настройки выполняет расчет оптимальных параметров K_{oc} согласно заданной структуре объекта в соответствии с принципами модального управления. Блок управления формирует типовой тестовый сигнал U_3 .

Метод прямого поиска представляет собой реализацию двух соответствующих алгоритмов прямого поиска, называемых как обобщенный алго-

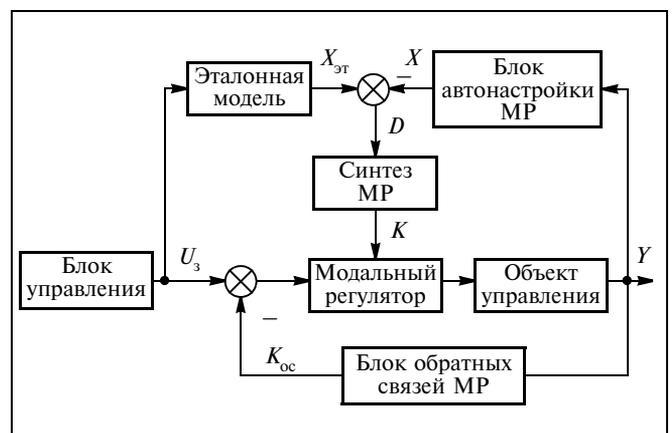


Рис. 6. Схема модального управления с автонастройкой модального регулятора

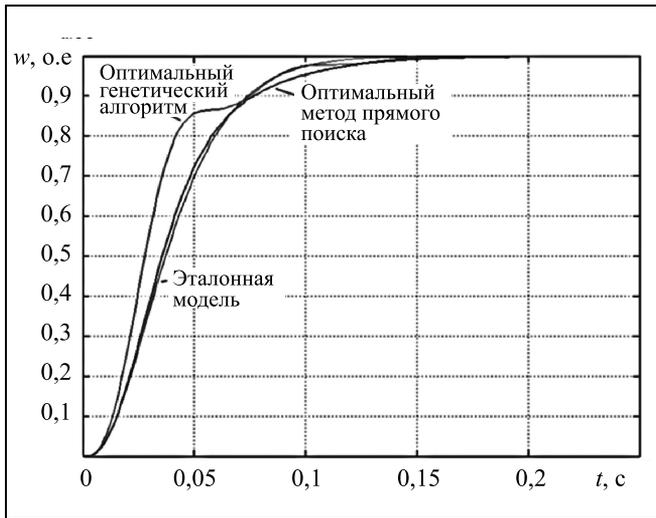


Рис. 7. Графики изменения относительной скорости электромеханической системы при различных вариантах автонастройки модального регулятора

ритм непосредственного поиска (GPS) и как алгоритм сеточного адаптивного поиска (MADS) [11]. На каждом шаге расчета производится поиск некоего набора точек, называемого ячейкой вокруг текущей точки — точки, которая представляет собой результат расчета в зависимости от предыдущего шага выбранного алгоритма. Если данный алгоритм выходит на некую точку в ячейке, в которой отмечается улучшение целевой функции по сравнению с текущей точкой, то новая точка принимает статус текущей точки для последующего шага выбранного алгоритма.

В рамках применения данного метода коэффициенты модального регулятора подбираются не путем сложных расчетов, а автоматически с помощью применения генетического алгоритма или метода прямого поиска.

Рассмотрим процесс пуска двухмассовой электромеханической системы при заданном времени регулирования 0,25 с. Графики изменения относительной угловой скорости ω для эталонной модели и системы управления с автонастройкой модального регулятора приведены на рис. 7.

Оптимизация реализована для биномиальной эталонной модели с минимизацией интеграла модуля ошибки при обеспечении максимального быстродействия САУ.

Параметры режима оптимизации с помощью генетического алгоритма приведены в табл. 2.

Параметры режима оптимизации методом прямого поиска приведены в табл. 3.

В результате моделирования процесс оптимизации с помощью генетического алгоритма для

нахождения/подбора коэффициентов модального регулятора сошелся за 50 итераций при времени вычислений 92,3 с и значении интеграла модуля ошибки 17,4. Процесс оптимизации методом прямого поиска обеспечил сходжение за 25 итераций при времени вычислений 8,6 с и значении интеграла модуля ошибки 4,31.

Таблица 2

Параметры оптимальной настройки генетического алгоритма

Параметр	Алгоритм	Режим настройки	Значение
Тип популяции	Double vector	Объем популяции	20
Исходная функция	Uniform	—	
Начальная популяция	Initial population	—	[0;1]
Ранжирование	Scaling function	Rank	—
Селекция	Selection	Stochastic uniform	—
Воспроизведение	Elite count Crossover fraction	—	2 0,8
Мутация	Mutation	Gaussian	0,2
Пересечение	Crossover	Intermediate	1,0
Миграция	Forward Interval	—	0,2 20

Таблица 3

Параметры оптимальной настройки алгоритма прямого поиска

Параметр	Алгоритм	Режим настройки	Значение
Метод поиска	GPS Positive Basis 2N	Complete poll	On
Порядок поиска	Random	—	—
Путь поиска	MADS	—	On
Параметры сетки	Accelerator	—	On
Использование констант	Initial penalty	25	20
Использование памяти	Cache	On	On



ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВВОДЫ

Разработана математическая модель системы управления линеаризованной двухмассовой электромеханической системы с модальным регулятором в режиме автонастройки.

Показана высокая эффективность модального управления электроприводами с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Моделирование в программном пакете MATLAB показали большую эффективность оптимизированной автонастройки модального регулятора методом прямого поиска по сравнению с генетическими алгоритмами.

Полученные результаты дают возможность продолжить исследования, направленные на повышение эффективности управления электромеханическими системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем* / Под ред. А.А. Колесникова. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. — Ч. III. — 656 с.
2. *Тарарыкин С.В., Тютиков В.В.* Робастное модальное управление динамическими системами // *Автоматика и телемеханика*. — 2002. — № 5. — С. 41–55.
3. *Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В.* Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 216 с.
4. *Кузиков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. — М.: Машиностроение, 1976. — 184 с.

5. *Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э.* Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 911 с.
6. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. — 832 с.
7. *Панкратов В.В., Нос О.В.* Специальные разделы теории автоматического управления. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. — Ч. 1. Модальное управление и наблюдатели. — 248 с.
8. *Булындин М.Г.* Исследование эталонных моделей систем модального управления // *Современные научные исследования и инновации*. — 2013. — № 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/11/28937> (дата обращения: 09.12.2014).
9. *Кочнева Т.Н., Кожевников А.В., Кочнев Н.В.* Синтез модального регулятора и оценка эффективности модального управления для двухмассовых электромеханических систем // *Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал*. — Череповец: ЧГУ. — 2013. — Т. 2, № 4 (52). — С. 15–22.
10. *Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В.* Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами // *Электротехника*. — 1999. — № 5. — С. 2–6.
11. *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User's Guide*. — URL: www.mathworks.com (дата обращения: 19.10.2015).
12. *Кожевников А.В., Волков В.Н.* Разработка функции самонастройки системы управления электроприводом на базе генетического алгоритма // *Автоматизация и современные технологии*. — 2015. — № 2. — С. 41–45.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Кожевников Александр Вячеславович — канд. техн. наук, зав. кафедрой, ✉ kojevnikovav@chsu.ru,

Кочнева Татьяна Николаевна — аспирантка, ✉ elprivod@chsu.ru,

Кочнев Николай Викторович — канд. техн. наук, доцент, ✉ ko4neff.nikolaj@yandex.ru,

Череповецкий государственный университет.

Читайте в ближайших номерах

- ✓ **Байбулатов А.А.** Метод расчета максимального времени модификации программного обеспечения с длительным, итерационным процессом разработки
- ✓ **Буре В.М., Парилина Е.М., Седаков А.А.** Консенсус в социальной сети с двумя центрами влияния
- ✓ **Ведешенков В.А.** Организация диагностирования одиночных неисправных компонентов цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа размера 7×7 с двумя путями между двумя абонентами
- ✓ **Глумов В.М., Крутова И.Н., Суханов В.М.** Особенности гиросиловой стабилизации собираемой на орбите большой космической конструкции
- ✓ **Клочков В.В., Чернер Н.В.** Повышение эффективности управления производственным потенциалом предприятий в составе интегрированных структур
- ✓ **Кулинич А.А.** Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Когнитивный и семиотический подходы в информатике и управлении
- ✓ **Новиков Д.А.** Кибернетика 2.0
- ✓ **Пляскина Н.И., Харитонов В.Н.** Стратегическое управление и согласование интересов институциональных участников ресурсных мегапроектов

