

УДК 007.52+681.52

К СИНТЕЗУ РОБАСТНО-АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

О. З. ХАСАНОВ¹, З. М. ХАСАНОВ²

¹legnix@mail.ru, ²zimfirm@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 06.11.2018

Аннотация. Показано, что робастно-адаптивная система с эталонной моделью позволяет в значительной мере компенсировать динамические эффекты со стороны взаимосвязанных электроприводов роботизированного технологического комплекса, такие как взаимовлияние каналов управления и переменность нагрузки приводов. Для повышения качества управления движением используются для каждого участка траектории взаимосвязанные линеаризованные динамические модели, характеристики которых уточняются в процессе работы. Стратегия управления строится на базе теории нелинейного робастно-адаптивного управления и корректируется по мере уточнения математической модели динамики. Приведены структурные схемы САУ, алгоритмы управления и методика проектирования робастно-адаптивных САУ электроприводами.

Ключевые слова: робастно-адаптивные САУ; структурный синтез; математическая модель; динамика движения; векторно-матричные дифференциальные уравнения; многосвязные электропривода.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс постоянного совершенствования робастно-адаптивных систем автоматического управления (САУ) взаимосвязанными электроприводами роботизированного технологического комплекса (РТК) базируется в том числе на самых современных достижениях системного анализа и проектирования сложных САУ. Системный подход состоит еще в том, что будущие робастно-адаптивные системы управления недопустимо рассматривать без учета всей полноты и сложности строения, целостности, многосвязного взаимодействия и взаимообусловленности всех составляющих взаимосвязанных подсистем между собой и внешней технической средой. Именно в

сложности и целесообразности синтеза новых многосвязных подсистем робастно-адаптивных САУ рождается новое качество, которое отсутствовало у элементов ее составляющих.

Прецизионные сложные исполнительные механизмы роботизированного технологического комплекса, приводимые в движение соответствующими многосвязными электроприводами, имеют несферические эллипсоиды инерции, произвольно расположенные относительно осей вращения. Последнее приводит к тому, что при взаимосвязанном движении электроприводов в результате действия инерционных, центробежных и гироскопических сил движение одного из электроприводов вызывает возмущающие взаимосвязанные моменты, при-

ложенные к остальным электроприводам. Появляются незапланированные сложные перекрестные связи между взаимосвязанными электроприводами РТК. Такие связи взаимодействия друг с другом ухудшают динамику многосвязных подсистем робастно-адаптивных САУ и системы управления в целом.

Динамика многосвязных электроприводов (ЭП), нелинейности (в том числе люфты, трение), погрешности и собственные шумы, изменения и отклонения параметров и другие особенности, обусловленные резким изменением технологических условий (реальные факторы), односторонние и взаимные перекрестные связи, порождаемые спецификой практической реализации исполнительных механизмов электроприводов – все эти факторы являются определяющими для обеспечения достижения высоких технических параметров. Основными показателями ЭП являются точность позиционирования (до 20 мкм), скорость вращения вала ЭП изменяется в широких пределах (до 1:20000) и имеются высокие требования к точности поддержания скорости вращения (до $\pm 0,02\%$).

ЗАДАЧИ РОБАСТНО-АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ РТК

Известные к настоящему времени результаты теории робастно-адаптивных САУ позволяют во многих случаях синтезировать алгоритмы адаптивного управления, гарантирующие устойчивость и заданное качество систем при существенной неопределенности параметров объекта управления и внешних воздействий. Однако далеко не все прикладные задачи синтеза робастно-адаптивных регуляторов поддаются точному решению известными методами. Поэтому одной из актуальных задач теории остается расширение областей применимости методов синтеза робастно-адаптивных регуляторов для многосвязных сложных электроприводов РТК [1].

Другой важной задачей является разработка новых эффективных методик анализа динамики синтезированных многосвязных робастно-адаптивных регуляторов. Дей-

ствительно, имеющиеся результаты зачастую позволяют судить лишь о достижимости цели управления в системе и не говорят о скорости и характере ее достижения, т.е. о динамике процессов адаптации.

Получить строгое математическое решение указанных выше двух задач для реальных адаптивных САУ многосвязными объектами обычно не удается. Постановка задач проектирования робастно-адаптивных САУ многосвязными ЭП содержит достаточно сложное математическое описание взаимосвязанных объектов управления и целый ряд дополнительных требований и ограничений, с учетом которых аналитическое решение делается необходимым, а иногда вообще невозможным. Поэтому все большее внимание привлекают приближенные методы синтеза, основанные на упрощении исходной задачи, сведению ее к задаче с известным решением. При этом имеющееся решение используется при синтезе в качестве прототипа. Прототип является первым приближением к искомому решению и уточняется на последующих этапах проектирования.

Кроме того, для большинства операций плазменного нанесения покрытий известные адаптивные регуляторы являются недостаточно гибкими. Как правило, в техпроцессах нанесения покрытий появляются необходимость корректировать положения исполнительных механизмов РТК ввиду непредвиденных изменений рельефа обрабатываемой поверхности, координат кромки или края детали, а также всех параметров техпроцесса плазменного нанесения покрытий (скорость движения лазерно-плазменной головки, мощность излучения, диаметр покрытия на обрабатываемой поверхности и т.д.). Поэтому построение эффективных робастно-адаптивных САУ для сложных многосвязных ЭП, характеризующимся взаимосвязанными упругими механическими связями, является весьма актуальной задачей. Это связано с повышением требований к динамической точности всех подсистем контроля и регулирования, а также к качеству процессов регулирования с повышением полосы пропускания вплоть до частот, сопоставимых с частотой механиче-

ского резонанса взаимосвязанной упругой механической системы РТК. Кроме того, на САУ электроприводами РТК накладываются ограничения на взаимосвязанные скорости вращения валов двигателей, вытекающие из ограничения ресурсов управления по напряжению на обмотках двигателей и прочностных соображений, а также ограничения на электромагнитные моменты электродвигателей, вытекающие из ограничений на токи силовых преобразователей, питающих многосвязные электродвигатели.

Использование при синтезе многосвязных робастно-адаптивных САУ взаимосвязанными электроприводами объектно-ориентированных подходов, когда многосвязные системы создаются как сумма подсистем с определенными, заранее рассчитанными характеристиками, ведет к потере взгляда на целостность всей системы. Даже использование «оптимальных» САУ не гарантирует получение требуемых показателей качества управления во всем диапазоне условий и режимов работы. Кроме того, обнаружение допущенных ошибок синтеза во время пуско-наладочных работ или эксплуатации связано большими финансовыми затратами и большой вероятностью внесения новых ошибок при проведении реконструкции.

Альтернативой традиционному подходу синтеза многосвязных робастно-адаптивных систем автоматического управления является системный метод, учитывающий возможные взаимосвязи между всеми САУ, подсистемами, особенности функционирования каждой из них по отдельности, и реализуемый, исходя из постоянного учета целостного характера всего комплекса многосвязных робастно-адаптивных САУ электроприводами. Здесь научно обоснованно увязываются локальные оптимумы, взаимосвязанные цели с глобальным критерием эффективности каждой робастно-адаптивной САУ, стыкуются программные задачи и согласуются взаимосвязанность работы каждого электропривода. Все процессы системного синтеза строятся в виде замкнутых итерационных циклов переработки информации, и основными техническими средствами реализации этих циклов

выступают различные виды имитационного и математического моделирования. Модели систем и подсистем являются эффективным инструментом для достижения и решения целей и задач в процессе системного анализа и синтеза.

Эффективным путем улучшения динамических свойств адаптивных САУ, преодоления противоречивости требований к быстродействию, устойчивости и точности является использование нелинейных методов робастно-адаптивного управления. Можно использовать следующие алгоритмы: при больших рассогласованиях используется структура, обеспечивающая высокое быстродействие алгоритмы релейного управления, а при малых – высокую точность с низкими параметрами колебательности переходных процессов алгоритмы адаптивного управления. Эту идею можно использовать при отсутствии колебательности для сложных задач повышения точности с помощью нелинейных методов адаптивного управления. Например, применением систем с переменной структурой с использованием скользящих режимов, движение в которых не зависит от параметров многосвязных объектов управления. Важным инструментом упрощения математического описания таких систем являются метод разделения движений [2].

Все сказанное в совокупности определяет достаточно высокую сложность многосвязных задач анализа и синтеза робастно-адаптивных САУ многосвязными электроприводами, причем вследствие нелинейности объектов и ограничений, накладываемых на взаимосвязанные адаптивные САУ, не существуют общих аналитических методов решения этих задач. Необходимо ввести ряд упрощающих допущений и проводить синтез робастно-адаптивных САУ путем последовательно выполняемых этапов.

Создание средств адаптации требует разработки комплекса контрольно-измерительной аппаратуры и синтеза адаптивных алгоритмов обработки сенсорной информации с целью самонастройки системы управления технологическим оборудованием в изменяющейся обстановке на производстве. Задачи выбора средств адапта-

ции и синтеза эффективных алгоритмов управления с использованием алгоритмов самонастройки и идентификации с заданным временем адаптации рассмотрены в работе [3].

К СИНТЕЗУ СТРУКТУРЫ РОБАСТНО-АДАПТИВНЫХ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ РТК

Синтез робастно-адаптивных САУ электроприводами (ЭП) осуществляется в несколько этапов. На начальном этапе разрабатывается и анализируется упрощенная многосвязная модель механической системы взаимосвязанных друг с другом электроприводов. На втором этапе учитываются дискретные по времени разные способы адаптивного управления механическими движениями взаимосвязанных электроприводов, разрабатываются разностные модели всех многосвязных движений. На третьем этапе для упрощенных адаптивных САУ синтезируются цифровые адаптивные регуляторы, обеспечивающие подавление колебательных движений, и адаптивное управление за заданными положениями исполнительных механизмов многосвязных электроприводов. Синтезированная таким образом система управления характеризуется большими коэффициентами обратной связи, использование которых необходимо для подавления большого спектра колебательных движений и обеспечения требуемой точности движения. Для обеспечения устойчивости в САУ с большим коэффициентом усиления при наличии заданного ряда ограничений и при достаточно высоком порядке даже упрощенных моделей механического движения многосвязных электроприводов (МЭП) сложно разрешимая задача при заданных больших рассогласованиях. Поэтому проводится синтез всех подсистем формирования гладких заданий на замкнутый контур регулирования с учетом всех динамических ограничений, накладываемых на все многосвязные адаптивные регуляторы. Смысл петли регулирования заключается в создании автономной системы, корректирующей свое собственное состояние, исходя из этого же состояния, в соответствии со всеми признаками. Петля регулирования

является фундаментальным свойством, обеспечивающим автономное существование САУ в рамках заданного качества.

В последующем оптимизируются параметры адаптивных регуляторов, а именно анализируются переходные процессы, реакции на синусоидально или дискретно изменяющееся задание, определяется полоса пропускания замкнутой системы в сопоставлении с разомкнутой системой. Определяется оптимальное назначение мод робастно-адаптивных САУ. Проводится компенсация сухого трения и люфта. При набросе/сбросе момента нагрузки и при движении в зоне люфта определяются как статические, так и динамические характеристики всех многосвязных электроприводов. Все сказанное в совокупности определяет достаточно высокую сложность многосвязных задач проектирования робастно-адаптивных САУ, причем вследствие нелинейности характеристик МЭП и ограничений, накладываемых на все подсистемы робастно-адаптивных САУ, не существует аналитических методов решения задачи проектирования этих САУ.

Современные требования, предъявляемые САУ РТК к характеристикам многосвязных электроприводов, приводят во многих случаях к необходимости учета динамики исполнительных механизмов при управлении их движением. Известные результаты теории адаптивных систем позволяют в определенных случаях синтезировать алгоритмы адаптивного управления, гарантирующие устойчивость и заданное качество управления перемещением при заданной неопределенности и внешних воздействий. Однако далеко не все прикладные задачи, связанные с прецизионным высокоточным перемещением, поддаются точному решению известными методами. Выбор методики синтеза зависит от двух основных факторов: вида математического описания системы и технических средств реализации блоков приводных микроконтроллеров [4].

Рассмотрим задачу синтеза робастно-адаптивных САУ с сигнальной настройкой по эталонной модели, позволяющие в значительной мере компенсировать динамические эффекты со стороны взаимосвязанных

исполнительных механизмов МЭП, возникающие при многосвязном движении электроприводов. Для сложных робастно-адаптивных алгоритмов управления значение частоты дискретизации $300,0 \div 1000,0$ Гц. При таких частотах приходится прибегать к искусственному снижению полосы пропускания из-за упругих связей, люфтов и шумов, влияние которых в данной области частот более существенно, чем погрешности аппроксимации.

СИНТЕЗ РОБАСТНО-АДАПТИВНЫХ САУ С СИГНАЛЬНОЙ НАСТРОЙКОЙ ПО МОДЕЛИ

Модель динамики движения исполнительных механизмов многосвязных электроприводов описывается системой дифференциальных уравнений вида [5]

$$\begin{cases} dx_i/dt_i = F(x_i, u_i, \xi_i) + \psi_i \\ x_i(t_0) = x_i^0 \\ t \geq t_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где x_i – n -мерный вектор состояния динамики движения исполнительных механизмов многосвязных электроприводов; u_i – m -мерный вектор управлений; ξ_i – k -мерный вектор параметров ψ_i – n -мерный вектор внешних возмущений, удовлетворяющие системе ограничений

$$\begin{cases} x_i(t) \in G_{x_i} \subset R \\ u_i(t) \in G_{u_i} \subset R^m \\ \xi_i(t) \in G_{\xi_i} \subset R^k \\ \psi_i(t) \in G_{\psi_i} \equiv \{(\psi_i) \div \|\psi_i(t)\| \leq c_{\psi}, t \geq t_0 \end{cases}. \quad (2)$$

Здесь G_{x_i} , G_{u_i} , G_{ξ_i} , G_{ψ_i} – замкнутые, ограниченные известные множества, c_{ψ} – заданное положительное число.

В том случае, когда вектор состояний динамики движения исполнительных механизмов имеет канонический вид

$$x_i = \text{col}(q_0, q_1, \dots, q_r),$$

где q_i – m -мерный вектор обобщенных координат, то уравнение (1) представим

$$\begin{cases} dx_i/dt_i = A_i \cdot x_i(t) + B_i \cdot w_i(t) \\ w_i(t) = R_i(x_i, \xi_i, \psi_i) + Q_i(x_i, \xi_i)u_i \end{cases}, \quad (3)$$

здесь

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & I_{n-m} \\ 0_m & 0_m \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ I_n \end{pmatrix},$$

$R_i(x_i, \xi_i, \psi_i)$ – заданная вектор функция, $Q_i(x_i, \xi_i)$ – заданная матрица функция, имеющая обратную. Такое управление при заданных граничных условиях порождает многосвязное движение электроприводов $x_i(t)$.

Управляемость модели динамики (3) означает, что для каждого электропривода в МЭП существует своя постоянная $m \times n$ – матрица C_i такая, что $n \times n$ матрица $\Gamma_i = A_i + B_i \times C_i$ является устойчивой, а модель (3) стабилизируема. Это означает, что любое адаптивное движение $x_i(t_{\text{дв}})$, $t_{\text{дв}} \geq t_0$ являющееся частным решением уравнения (3) при некотором $x_i(t_0) \neq x_{i(0)}$, асимптотически устойчиво в целом.

Для повышения эффективности и надежности функционирования МЭП, каждая система управления должна быть оснащена необходимой сенсорной системой, обеспечивающей робастную адаптацию к возможным изменениям геометрических параметров обрабатываемых деталей и параметров технологического процесса плазменного нанесения покрытий.

Пусть компоненты векторов состояния \bar{x}_i , задающих воздействий \bar{y}_i и адаптивной настройки \bar{j}_i управляемых параметров наблюдаемы с периодом дискретизации T_d . Эти допущения будут сняты соответственно на этапах синтеза алгоритмов идентификации и при решении задачи формирования вектора задающих воздействий. Ограничения на компоненты вектора \bar{x}_i могут быть сведены к ограничениям на модуль или скорость изменения вектора управления \bar{u}_i , а те, в свою очередь, к ограничениям на вектор задающих воздействий \bar{y}_i . Темп изменения задающих воздействий определяются

блоками функционально-оперативного разгона, стабилизации и торможения. Тогда на основе принятых допущений модель динамики многосвязных электроприводов описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{d\bar{x}_i(t_i)}{dt_i} = A_i(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) \cdot \bar{x}_i(t_i) + \\
 & + B_i(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) \cdot \bar{u}_i(x_i, t_i) + \\
 & + C_{1i}(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) \cdot \bar{s}_{1i}(x_i, j_{1i}, t_i) + \\
 & + D_{1i}(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) \cdot \bar{j}_{1i}(x_i, t_i); \\
 & \bar{y}_i(x_i, t_i) = F_i(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) \cdot \bar{x}_i(y_i, t_i) + \\
 & + C_{2i}(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) \cdot \bar{s}_{2i}(y_i, j_{2i}, t_i) + \\
 & + D_{2i}(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) \cdot \bar{j}_{2i}(Y, t_i); \\
 & \bar{z}_i(x_i, y_i, t_i) = H_i(x_i, y_i, t_i) \cdot \bar{x}_i(y_i, t_i); \\
 & x_i(0) = \text{const}; u_i(x_i, 0) = \text{const}; \\
 & s_{1i}(x_i, 0) = \text{const}; j_{1i}(x_i, 0) = \text{const}; \\
 & y_i(x_i, 0) = \text{const}; s_{2i}(x_i, 0) = \text{const}; \\
 & j_{2i}(x_i, 0) = \text{const}; z_i(x_i, y_i, 0) = \text{const},
 \end{aligned} \right\} i_i \quad (4)$$

где $\bar{x}_i(t_i)$ – n -мерные вектора состояния исполнительных механизмов МЭП; $\bar{u}_i(x_i, t_i)$ – q -мерные вектора управления и входят в (4) линейно; $\bar{y}_i(t_i)$ – m -мерные вектора выходных координат исполнительных механизмов МЭП; $\bar{s}_{1i}(x_i, j_{1i}, t_i)$ – k_1 -мерные вектора случайных процессов типа «белого шума», возмущающие состояние $\bar{x}_i(t_i)$; $\bar{s}_{2i}(y_i, j_{2i}, t_i)$ – k_2 -мерные вектора случайных процессов типа «белого шума», возмущающие выходных координат $\bar{y}_i(x_i, t_i)$; $\bar{j}_{1i}(x_i, t_i)$ – m_1 -мерные вектора адаптивной настройки регулируемых параметров $\bar{x}_i(t)$; $A_i(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) = A_i(b_i)$ и $B_i(x_i, s_{1i}, j_{1i}, t_i) = B_i(b_i)$ – $n \times n$ и $n \times q$ -мерные функциональные матрицы, непрерывные и ограниченные вместе со своими частными производными для всех x_i, t_i ; $C_{1i}(b_i)$ и $D_{1i}(b_i)$ – $k_1 \times k_1$ и $m_1 \times m_1$ -мерные матрицы. Матрица $F_i(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) = F_i(c_i)$ размером $p \times n$ ($p \leq n$) устанавливает связь между векторами $\bar{x}_i(t_i)$ и $\bar{y}_i(t_i)$; $C_{2i}(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) =$

$= C_{2i}(c_i)$ и $D_{2i}(x_i, s_{2i}, j_{2i}, t_i) = D_{2i}(c_i)$ – $k_2 \times k_2$ и $m_2 \times m_2$ - мерные матрицы; $\bar{z}_i(x_i, y_i, t_i) = \bar{z}_i(a_i)$ – n -мерные вектора выходных переменных, $H_i(x_i, y_i, t_i) = H_i(a_i)$ – $n \times n$ -мерная выходная матрица системы.

Если за критерий адаптивного управления примем минимизацию ошибки управления, обеспечивающего выполнение

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[z_i^T(a_i) R_{1(i)}(a_i) y_i(x_i, t_i) + u_i^T(x_i, t_i) R_{2(i)}(a_i) u_i(x_i, t_i) \right] dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

здесь положительно определенные симметричные весовые матрицы $R_{1(i)}(a_i)$ и $R_{2(i)}(a_i)$ имеют размерность $p \times p$ и $q \times q$ соответственно. Учет второго члена в критерии (5) позволяет при его минимизации иметь управляющие сигналы ограниченной амплитуды, что особенно важно при синтезе реальных алгоритмов управления.

Определим для заданной последовательности $(t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$, где $n \in N$) такое управление $\bar{u}_i(x_i, t_i)$, при котором перевод системы из некоторого состояния $\bar{x}_{n-j}(t_{n-j})$ в состояние $\bar{x}_{n-j+1}(t_{n-j+1})$ обеспечит минимум квадратичному интегральному критерию качества (5).

Поставленная задача относится к классу вариационных и сводится к решению дифференциального уравнения Риккати:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_i(a_i)}{dt_i} &= P_i^2(a_i) B_i(b_i) R_{2i}^{-1}(a_i) B_i^T(b_i) - \\
 &- H_i^T(a_i) R_{1i}(a_i) H_i(a_i) - A_i(b_i) P_i(a_i) - \\
 &- A_i^T(b_i) P_i(a_i)
 \end{aligned}$$

для заданного отрезка времени $t_i \dots t_{i+1}$, где граничное условие

$$P_i(x_i, y_i, t_{i+1}) = 0.$$

Зная решение $P_i(x_i, y_i, t_{i+1})$, можно определить матрицу коэффициентов обратных связей $K_i(x_i, y_i, t_i)$ размером $n \times q$ в соответствии с выражением:

$$K_i(a_i) = P_i(a_{i+1}) B_i^T(b_i) R_2^{-1}(a_i) \quad (6)$$

и сформировать алгоритмы робастно-адаптивного управления в виде:

$$\bar{u}_i(x_i, t_i) = -K_i(a_i)\bar{x}_i(t_i). \quad (7)$$

Характерным режимом работы реальных адаптивных САУ является не режим согласования переменных в нулевое состояние, а задание выходным переменным $\bar{y}_i(x_i, t_i)$ предписанных значений с помощью вектора входных воздействий $\bar{u}_i(x_i, t_i)$. В этом случае выражение (7) дополняется слагаемым, обеспечивающим замкнутую систему требуемую настройку:

$$u_i(x_i, t_i) = W_n^{-1}(a_i)u_n(x_i, t_i) - K_i(a_i)x_i(t_i), \quad (8)$$

$$\text{здесь: } W_n(a_i) = \frac{H_i(a_i)B_i(b_i)}{I - A_i(b_i) + B_i(b_i)K_i(a_i)}$$

– матричная передаточная функция адаптивной системы управления; I – единичная матрица. Схема адаптивной системы управления электроприводом, удовлетворяющая уравнениям (4) и (8), показана на рис. 1.

Минимизация функционала (5) для уравнений (4) приводит к задаче проектирования оптимальной адаптивной САУ электроприводом и имеет вид

$$\bar{u}_i(x_i, t_i) = \frac{B_i(b_i)[P_i(a_i)x_i(t_i) - G_i(a_i)]}{R_i(a_i)}, \quad (9)$$

здесь симметричная матрица $P_i(a_i)$ является решением матричного дифференциального уравнения Риккати.

Одним из наиболее эффективных методов решения этой задачи является так называемый метод диагонализации [6], алгоритмическая процедура которого состоит в следующем. Формируется матрица размером $2n \times 2n$:

$$M(t_i) = \begin{vmatrix} A(t_i) & B(t_i)R_2^{-1}(t_i)B^T(t_i) \\ F^T(t_i)R_1(t_i)F(t_i) & A^T(t_i) \end{vmatrix}.$$

Далее определяем собственные вектора матрицы $M(t_i)$, соответствующие характеристическим числам с отрицательными вещественными частями. Из полученных векторов образуется $2n \times n$ -мерная матрица:

$$\begin{vmatrix} M_{12}(t_i) \\ M_{22}(t_i) \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где $M_{12}(t_i)$ и $M_{22}(t_i)$ – блоки матрицы размером $n \times n$ каждый. Матрица (10) составляется на основе собственных векторов матрицы $M(t_i)$. Вещественные собственные вектора являются столбцами матрицы (10). Каждая комплексно-сопряженная пара порождает два столбца, один из которых является вещественной, а другой – мнимой. Тогда решение уравнения Риккати:

$$P(t_i) = \frac{M_{22}(t_i)}{M_{12}(t_i)}$$

с условием в конечной точке

$$P(t_k) = \frac{M_{22}(t_k)}{M_{12}(t_k)}. \quad (11)$$

Условие (11) для уравнения (4) задано в конечной точке t_k , поэтому решать их приходится в направлении от t_k к t_0 . Вектор состояния системы $\bar{x}_i(t_i)$, напротив, изменяется от t_0 к t_k , т.е. в прямом направлении времени. Такая двухточечная краевая задача решается с помощью численных методов [7]. Из соотношения (8) для определения закона оптимального управления должны быть известны значения матриц $A_i(b_i)$, $B_i(b_i)$, вектор возмущений $\bar{Y}(t_i)$ и вектор адаптивной настройки $\bar{J}(t_i)$ на всем интервале $t_0 \div t_k$.

Процедуру синтеза можно упростить, если задачу определения функции разделить на две составляющие: задачу определения структуры – структурный синтез и задачу определения параметров функции – параметрический синтез. На этапе структурного синтеза особый интерес представляют два вопроса:

- к какой эквивалентной структуре должна быть приведена исходная система, чтобы реакция выходной координаты эквивалентной системы на типовое воздействие была экстремалью заданного критерия качества;
- какая должна быть структура оптимального регулятора, чтобы, удовлетворяя условию физической реализуемости и учитывая специфику объекта управления, обеспечить совпадение динамических характеристик исходной и эквивалентной систем.

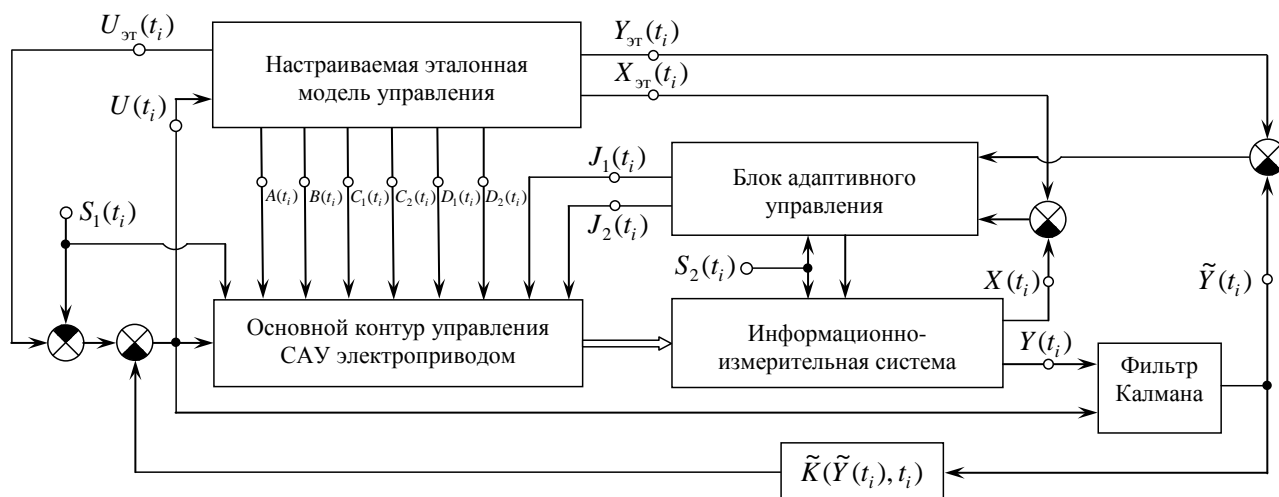


Рис. 1. Структурная схема идентификатора состояния ЭП

Задачу поиска эквивалентной структуры можно решать для систем меньшей размерности, например, для системы второго порядка. В соответствии с [8] вектор $G_i(a_i, t_i)$ в уравнении (9) вычисляется по формуле:

$$\frac{dG_i(a_i, t_i)}{dt_i} = P_i(a_i)H_i(a_i) - H_i^T(a_i)R_i(a_i)y_i(x_i, t_i) - G_i(a_i, t_{ki}) \times [A_i(b_i) - P_i(a_i)B_i(b_i) \times R_{2i}^{-1}(a_i)B_i^T(b_i)]$$

с конечным условием

$$G_i(a_i, t_{ki}) = H_i^T(a_i, t_{ki})R_i(a_i, t_{ki})y_i(a_i, t_{ki}).$$

При проектировании адаптивных САУ требуется строгое выполнение $u_i(a_i) = f[y_i(a_i)]$, для которой

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} [p_{1(i)}y_i^2(a_i) + p_{2(i)}u_i^2(a_i)] dt_i \rightarrow \min \quad (12)$$

достигает минимума при достижении всех выходных переменных $y_i(a_i)$ к соответствующим эталонным величинам $y_{эт(i)}(a_{эт(i)})$. Все положительно определенные коэффициенты $p_{1(i)}(a_i)$ и $p_{2(i)}(a_i)$ определяют вклад в критерию качества средних значений отклонения управляемой переменной от эталонных своих значений.

Поставленную задачу решим на основе принципа разделения. Применение этого принципа позволяет доказать, что матрица коэффициентов $K_i(a_i)$ адаптивной САУ, замкнутой по полному вектору состояния

$\bar{x}_i(t_i)$, остается неизменной и в том случае, когда замыкание системы управления производится по оценкам вектора состояния $\hat{\bar{x}}_i(t_i)$, восстановленным в блоке адаптации с идентификатором, параметры которого определены из условия минимума среднего квадрата ошибки восстановления. Тогда управление, обеспечивающее минимум критерия (12), формируется в виде

$$\bar{u}_i(a_i) = -K_i(a_i)\bar{\hat{x}}_i(a_i),$$

здесь $K_i(a_i)$ – матрица коэффициентов обратных связей, определяется уравнением (6). Алгоритм управления определяет уравнение

$$\bar{u}_i(a_i) = -K_i(a_i)\bar{\hat{x}}_i(a_i) + \frac{\bar{u}_n(a_i)}{W_n(a_i)},$$

где $W_n(a_i)$ – передаточная функция системы управления, определяемая уравнением

$$W_n(a_i) = \frac{H_i(a_i)B_i(b_i)}{I - A_i(b_i) + B_i(b_i)K_i(a_i)}.$$

В этом уравнении I – единичная матрица.

На рис. 1 блок адаптивного управления по алгоритму минимизирует среднее значение квадрата ошибки восстановления

$$e_i(t_i) = X_i(t_i) - \bar{\hat{X}}_i(t_i) \rightarrow \min.$$

Далее для заданных коэффициентов матрицы блок адаптивного управления определяет ошибку $e_i(a_i, t_i) = \bar{x}_i(a_i, t_i) - \hat{\bar{x}}_i(a_i, t_i)$.

Ошибка вычисляется по формуле

$$\frac{d\tilde{x}_i(a_i, t_i)}{dt_i} = A_i(b_i) \cdot \tilde{x}_i(t_i) + B_i(b_i) \cdot \tilde{u}_i(a_i) + E_i(a_i) [\tilde{Y}_i(a_i) - F_i(c_i) \cdot \tilde{x}_i(t_i)] \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение ошибки восстановления получается путем вычитания (13) из уравнения (4) и имеет вид

$$\frac{de_i(a_i, t_i)}{dt_i} = e_i(t_i) - [A_i(b_i) - E_i(a_i) \cdot F_i(c_i)] - [I - E_i(a_i) \cdot F_i(c_i)] \begin{Bmatrix} V_{1i}(b_i) \\ V_{2i}(c_i) \end{Bmatrix},$$

где $V_{1i}(b_i) = C_{1i}(b_i) \tilde{S}_{1i}(a_i) + D_{1i}(b_i) \tilde{J}_{1i}(a_i)$ - случайный шум в векторах состояния $\tilde{X}_i(t)$; $\tilde{V}_{2(i)}(b_i) = C_{2(i)}(b_i) \tilde{S}_{2(i)}(Y_i, t_i) + D_{2(i)}(b_i) \times \tilde{J}(Y_i, t_i)$ - белый шум в устройстве контроля $\tilde{Y}(X, t)$. Нормально центрированные шумы $\tilde{V}_{1(i)}(b_i)$ и $\tilde{V}_{2(i)}(b_i)$ характеризует матрица

$$V = \begin{Bmatrix} V_1(b_i) & 0 \\ 0 & V_2(b_i) \end{Bmatrix}.$$

В работе [9] задача синтеза блока адаптации с идентификатором достигается выбором матрицы коэффициентов оптимального наблюдателя по формуле

$$E_i(a_i) = \frac{P_i(a_i) \cdot F_i(c_i)}{V_i(c_i)}.$$

а среднее значение ошибки восстановления

$$\tilde{e}_i(t_i) = M[\tilde{e}_i(t_i)].$$

Матрица $P_i(a_i)$ размером $n \times n$ имеет вид $P_i(a_i) = M \left\{ [e_i(t_i) - \tilde{e}_i(t_i)] [e_i(t_i) - \tilde{e}_i(t_i)]^T \right\}$

и является матрицей дисперсий ошибок восстановления, которая определяется решением алгебраического уравнения Риккати

$$P_i^2(a_i) B_i(b_i) R_{2(i)}^{-1}(a_i) B_i^T(b_i) - A_i(b_i) P_i(a_i) - A_i^T(b_i) P_i(a_i) - H_i^T(a_i) R_{1(i)}(a_i) H_i(a_i) = 0.$$

При проектировании робастно-адаптивной САУ важно знать, существует ли возможность построения наблюдателей для оценки вектора состояния $\tilde{X}_i(t_i)$.

В работе [10] имеется доказательство, что уравнение Риккати будет иметь единственное положительное решение лишь в том случае, когда ранг матрицы восстанавливаемости $P_i(X_i, Y_i, t_i) = P_i(a_i)$ размером $(n \times p) \times p$

$$P_{B(i)}(a_i) = \| F_i(b_i), F_i(b_i) A_i(c_i), F_i(b_i) A_i^2(c_i), \dots, F_i(b_i) A_i^{n-1}(c_i) \|$$

и равен порядку n -мерного вектора состояния системы управления ЭП $\tilde{X}_i(t)$

$$\text{rang } P_{B(i)}(a_i) = n, \quad (14)$$

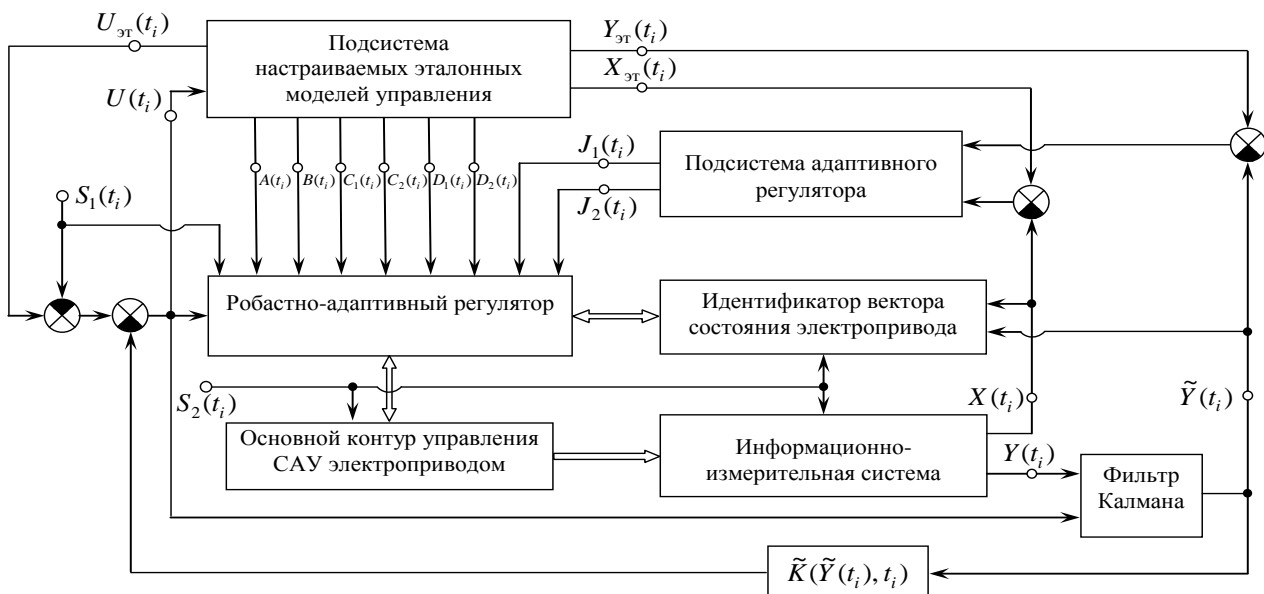


Рис. 2. Структура робастно-адаптивной САУ электроприводом

где $b_i = X_i, S_{2(i)}, J_{2(i)}, t_i$ и $c_i = X_i, S_{1(i)}, J_{1(i)}, t_i$.
Условие (14) гарантирует возможность построения наблюдателей в блоке адаптации САУ ЭП. Соответствующая к этому алгоритму робастно-адаптивная система автоматического управления электроприводом показана на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе алгоритмы адаптивного управления реализуются в робастно-адаптивных САУ электроприводами и обеспечивают поддержание высокого качества функционирования в изменяющихся условиях за счет структурной и параметрической приспособляемости. Робастно-адаптивные САУ учитывают погрешности блоков дифференцирования, распределения задач между функциональными блоками и разделения во времени режимов работы подсистем контроля и управления. Проведенные исследования показывают, что робастно-адаптивные САУ многосвязными электроприводами РТК плазменного нанесения покрытий позволяют с помощью адаптивной коррекции в значительной мере компенсировать динамические погрешности со стороны сложных исполнительных механизмов электроприводов РТК, такие как переменность и инерционность многосвязных сил тяжести нагрузки исполнительных механизмов взаимосвязанных электроприводов.

Эффективным путем улучшения динамических свойств робастно-адаптивных САУ, преодоление противоречивости требований к быстрдействию, устойчивости и точности является использование комбинации линейных и нелинейных методов робастно-адаптивного управления. При малых рассогласованиях используются подсистемы линейных робастно-адаптивных САУ с сигнальной настройкой по эталонной модели, обеспечивающие высокую точность с низкими значениями колебательности, а при больших рассогласованиях адаптивные подсистемы САУ нелинейного релейного управления.

Анализ полученных данных показывает, что введение линейных и нелинейных методов робастно-адаптивного управления в

контуры управления многоконтурной манипуляционной системы электроприводов РТК повышает стабильность функционирования каждого электропривода, а именно увеличивает устойчивость и уменьшает время переходных процессов. Полученные формулы позволяют исследовать ошибки положения и ориентации взаимосвязанных исполнительных механизмов электроприводов и могут быть использованы в прикладном программном обеспечении для анализа точности механизмов технологического оборудования на стадиях их проектирования.

Синтез и многопроцессорная реализация робастно-адаптивных САУ многосвязными электроприводами позволяет создать более совершенное технологическое оборудование плазменного нанесения покрытий, способное не только быстро перестраиваться с одних технологических операций на другие, но и быстро адаптироваться к неопределенным и изменяющимся условиям плазменного нанесения покрытий. Синтезированные многосвязные робастно-адаптивные САУ учитывают параметры функциональных подсистем САУ и распределение задач между функциональными блоками, а также разделение во времени режимов работы всех подсистем адаптивного контроля и управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасанов О. З., Хасанов З. М. К синтезу адаптивных САУ многосвязными электроприводами с моделью эталоном и с беспойсковым алгоритмом идентификации // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, № 4 (78). С. 163–172. [О. Z. Khasanov and Z. M. Khasanov, "To the synthesis of adaptive systems for automatic control of multiply connected electric drives with a reference model and with searchless algorithm of identification.", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 4 (78), pp. 163-172, 2017.]
2. Якимович Б. А., Хасанов З. М., Хасанов О. З. Позиционно-адаптивное управление многосвязными электроприводами технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник ИжГТУ, 2014. № 4, С. 41–45. [В. А. Yakimovich, Z. M. Khasanov, and O. Z. Khasanov, "Position-adaptive control of multiply connected electric drives of technological equipment of electric arc plasma spraying," (in Russian), in *Vestnik IZHGTU*, no. 4, pp. 41-45, 2014.]
3. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К проектированию широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 128–134. [Z. M. Khasanov and R. M. Guzaïrov, "To design

of a wide-range electric drive for technological equipment of electric arc plasma coating application", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 128-134, 2013.]

4. **Белов А. В.** Микроконтроллеры AVR. От азов программирования до создания практических устройств. М.: Наука и техника, 2016, 544 с. [A. V. Belov, AVR microcontrollers. From the basics of programming to the creation of practical devices, (in Russian). Moscow: Nauka i tekhnika, 2016.]

5. **Хасанов З. М., Гузаиров Р. М.** К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 146–149. [Z. M. Khasanov and R. M. Guzairov, "To the problem of synthesis of electric drive systems for technological equipment for electric arc plasma coating application", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 146-149, 2013.]

6. **Хасанов З. М., Хасанов О. З., Гузаиров Р. М.** Математическая модель движения многосвязных систем электроприводов для технологических процессов электродугового плазменного напыления. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 2. С. 116–122. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov and R. M. Guzairov, "Mathematical model of motion of multiply connected systems of electric drives for technological processes of electric arc plasma spraying", (in Russian), in *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, vol. 16, no. 2, pp. 116-122, 2015.]

7. **Khasanov Z. M., Khasanova N. V.** Mathematical model and design of adaptive control system of multivariable electric drives for technological plasma arc spraying process equipment // Proceedings of the Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT'2014, (Sheffield, England, September 17-22, 2014). Ufa: UGATU, 2014. Vol. 2. P. 209-211. [Z. M. Khasanov and N. V. Khasanova, "Mathematical model and design of adaptive control system of multivariable electric drives for technological plasma arc spraying process equipment" in *Proceedings of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2014)*, vol. 2, pp. 209-211, 2014.]

8. **Хасанов З. М., Хасанов О. З., Хасанова Н. В.** Влияние нечеткого регулятора на повышение точности позиционирования и быстродействия систем адаптивного управления многосвязными приводами // Proceedings of the 5th All-Russian Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support», ITIDS'2017. Ufa, 2017, Vol. 1, pp. 64-66. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov and N. V. Khasanova, "The influence of fuzzy controller on the increase of positioning accuracy and speed of adaptive control systems of multiply connected drives", (in Russian), in *Information Technologies for Intelligent Decision Making Support*, vol. 1, pp. 64-66. 2017.]

9. **Khasanov O. Z., Khasanov Z. M., Akhmetzyanova I. R.** The multiprocessor control system of dynamics multiply connected technological electric drives // Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «INDUSTRY 4.0», Year III, Issue 5/2018, ISSN (WEB) 2534-997X, P. 248-252. [O. Z. Khasanov, Z. M. Khasanov and I. R. Akhmetzyanova, "The multiprocessor control system of dynamics multiply connected technological electric drives", in *Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «INDUSTRY 4.0»*, Year III, Issue 5/2018, ISSN (WEB) 2534-997X, pp. 248-252, 2018.]

10. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2007. Т.2. 433 с. [D. P. Kim, *Theory of automatic control: Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems*, (in Russian). Moscow: Fizmatlit, vol. 2, 2007.]

ОБ АВТОРАХ

ХАСАНОВ Олег Зимфирович, асп. каф. АТП. Дипл. математик – системный программист (УГАТУ, 2009). Готовит дис. по адаптивным многосвязным системам управления нелинейными взаимосвязанными электроприводами технологического оборудования.

ХАСАНОВ Зимфир Махмутович, проф. каф. электромеханики. Дипл. инженер по промышленной электронике (НЭТИ, 1984). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. адаптивного и оптимального управления сложными технологическими объектами.

METADATA

Title: Robust-adaptive control system with reference model for dynamic control of the interconnected electric drives of robotic technological complex.

Authors: O. Z. Khasanov¹, Z. M. Khasanov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹legnix@mail.ru, ²zimfirm@list.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 4 (82), pp. 150-160, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The system design of robust-adaptive automatic control systems with a reference model for dynamic control of multiply connected electric drives of a robotic technological complex is considered. To improve the quality of motion control for each section of the trajectory interconnected linearized dynamic models are used. The characteristics of models are refined in the process. The control strategy is based on the theory of nonlinear robust-adaptive control and is adjusted as the mathematical model of dynamics is refined. The block scheme of the ACS, control algorithms and design methodology of robust-adaptive ACS of electric drives are reduced.

Key words: robust-adaptive ACS; structural synthesis; mathematical model; dynamics of motion; vector-matrix differential equations; multiply connected electric drive.

About authors:

KHASANOV, Oleg Zimfirovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automation of Technological Processes - Ufa. Master of Mathematics & Computer Science (USATU, 2009).

KHASANOV, Zimfir Makhmutovich, Prof., Dept. of Electromechanics. Dipl. Industrial Electronics Engineer (Novosibirsk Electrotechnical Institute., 1984). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2009).