УДК 621.3.078

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГИЙ

Н. Я. Островерхов, Н. П. Бурик
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: ostroverkhov@list.ru

Представлен метод управления электромеханическими системами, который обеспечивает слабую чувствительность к изменениям параметров объекта управления и его динамическую декомпозицию. Поиск управляющих воздействий осуществляется при минимизации локальных функционалов, являющихся функциями Ляпунова для замкнутых систем, в качестве которых выступают мгновенные значения энергий и их производные. Законы управления придают замкнутой системе свойство устойчивости в целом, что позволяет решать задачи управления взаимосвязанными нелинейными объектами как для линейных одномерных систем по математическим моделям локальных контуров. Характерной особенностью оптимизации являются достижения не абсолютного минимума функционала качества, как в традиционных системах, а некоторого минимального значения, обеспечивающего допустимую по техническим условиям динамическую ошибку системы. Для построения структуры регуляторов не нужна детальная математическая модель объекта управления. Закон управления определяется на основании дифференциального уравнения, с помощью которого задается желаемое качество управления координатой электромеханической системы. Полученные регуляторы имеют нетрадиционную структуру и не содержат параметров объекта управления, что характерно для традиционных регуляторов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность предложенных законов управления и показали их преимущества по сравнению с традиционными законами.

Ключевые слова: электромеханическая система, законы управления, исследование.

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ МІНІМІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ФУКНЦІОНАЛІВ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ЕНЕРГІЙ

М. Я. Островерхов, М. П. Бурик
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ostroverkhov@list.ru

Надано метод керування електромеханічними системами, що забезпечує слабку чутливість до зміни параметрів об’єкту керування та його динамічну декомпозицію. Пошук керуючої дії здійснюється при мінімізації локальних функціоналів, що є функціями Ляпунова для замкнутих систем і якими виступають миттєві значення енергій та їх похідні. Закони керування надають замкнутій системі властивості стійкості в цілому, що дозволяє вирішувати задачі керування взаємозв’язаними, нелінійними об’єктами як для лінійних одновимірних систем за математичними моделями локальних контурів. Характерною особливістю оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціоналу, як у традиційних системах, а деякого мінімального значення, яке забезпечує допустиму за технічними вимогами динамічну похибку системи. Для побудови структури регуляторів не потрібна детальна математична модель об’єкту керування. Закон керування визначається на основі диференціального рівняння, за допомогою якого задається бажана якість керування координатою електромеханічної системи. Отримані регулятори мають нетрадиційну структуру й не містять параметрів об’єкту керування, що характерно для традиційних регуляторів. Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованих законів керування та показали їх переваги порівняно з традиційним законами.

Ключові слова: електромеханічна система, закони керування, дослідження.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Проблемой практического применения законов управления координатами электромеханических систем, полученных на основании методов классической теории автоматического управления, является необходимость наличия полной информации о структуре и параметрах математической модели объекта управления. Это обусловлено тем, что эти законы по своей природе являются законами компенсационного типа. Например, передаточные функции регуляторов тока, скорости и других координат электропривода, настроенные на широко распространенный модульный или симметричный оптимум, компенсируют соответствующие звенья объекта с целью получения требуемой передаточной функции контура управления. Изменение параметров объекта или погрешность их определения приводят к ухудшению заданного качества управления, требуя дополнительных алгоритмов идентификации или адаптации, что повышает сложность систем.

Вторая проблема возникает при управлении взаимосвязанными и нелинейными объектами, например, при скалярном и векторном управлении двигателями переменного тока, при двухзонном управлении скоростью двигателя постоянного тока, при управлении механизмами со сложной кинематикой. В этом случае традиционные законы управления получаются в результате статической декомпозиции на относительно независимые подсистемы, линеаризации уравнений математической модели, введения дополнительных компенсирующих связей, эффективность которых зависит от точных значений параметров.

Целью работы является повышение качества управления координатами электромеханических систем путем разработки законов управления на основе минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий и концепции обратных задач динамики. Полученные законы управления обеспечивают слабую чувствительность к параметрическим возмущениям объекта, осуществляют динамическую декомпозицию взаимосвязанной нелинейной системы, что предопределяет их практическую реализацию.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Развитие концепции обратных задач динамики обусловлено современной проблемой управления сложными объектами, когда требуется отыскать управляющее воздействие по известной математической модели объекта, его первоначальному состоянию и заданной траектории движения. Поиск управляющих воздействий осуществляется при минимизации локальных функционалов, являющихся функциями Ляпунова для замкнутых систем, в качестве которых выступают мгновенные значения энергий и их производных [1, 2]. В основу положена идея обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости, позволяющая найти закон управления, при котором замкнутый контур имеет наперед заданную функцию Ляпунова. Полученный закон придает замкнутой системе свойство устойчивости в целом, что позволяет решать задачи управления взаимосвязанными, нелинейными объектами как для линейных одномерных систем по математическим моделям локальных контуров. Характерной особенностью оптимизации являются достижения не абсолютного минимума функционала качества, как в традиционных системах, а некоторого минимального значения, обеспечивающего допустимую по техническим условиям динамическую ошибку системы.

Методика разработки законов управления координатами электромеханических систем излагается на типичном примере управления нелинейным взаимосвязанным объектом – известной системой прямого векторного управления скоростью асинхронного двигателя. Объект подвержен воздействию координатных и параметрических возмущений, обусловленных перекрестными связями и изменением электрических сопротивлений обмоток в результате нагрева и насыщения магнитной цепи. Математическая модель асинхронного двигателя в синхронной системе координат, ориентированной по вектору потокосцепления ротора, представляется известной системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{di_{1d}}{dt} = -\dfrac{R_1}{\sigma} i_{1d} - \alpha\beta L_m i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \\ \qquad + \alpha\beta|\psi_2| + \dfrac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \dfrac{di_{1q}}{dt} = -\dfrac{R_1}{\sigma} i_{1q} - \alpha\beta L_m i_{1q} - \omega_0 i_{1d} - \\ \qquad - \beta\omega p_n|\psi_2| + \dfrac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \dfrac{d|\psi_2|}{dt} = -\alpha|\psi_2| + \alpha L_m i_{1d}; \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{M}{J} - \dfrac{M_c}{J}, \end{cases} \tag{1}$$

где $\alpha = R_2 / L_2$, $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$, $\beta = L_m / \sigma L_2$ – параметры модели; R_1, R_2 – активное электрическое сопротивление обмотки статора и ротора; L_1, L_2, L_m – индуктивность обмотки статора, ротора и контура намагничивания; ω, ω_0 – угловая скорость ротора и магнитного поля; J – момент инерции двигателя; M_c – момент сопротивления; u_{1d}, u_{1q} – компоненты вектора напряжения статора; i_{1d}, i_{1q} – компоненты вектора тока статора; $|\psi_2|$ – модуль вектора потокосцепления ротора; $M = \dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m}{L_2} |\psi_2| i_{1q}$ – момент двигателя; p_n – число пар полюсов.

Для решения задачи управления исходная система уравнений (1), согласно методу декомпозиции, предложенной в [3], преобразуется к виду (2), где $V_{1d} = \omega_0 i_{1q} + \alpha\beta|\psi_2|$, $V_{1q} = -\omega_0 i_{1d} - \beta\omega p_n|\psi_2|$ – возмущения, описывающие взаимное влияние координат. Эти возмущения трактуются как неопределенные, но ограниченные по величине $V_{1d} \le V_{1d}^0$, $V_{1q} \le V_{1q}^0$. Уровни управляющих воздействий являются достаточными для их компенсации $u_{1d} / \sigma > V_{1d}^0$,.$u_{1q} / \sigma > V_{1q}^0$ Таким образом, взаимосвязанная нелинейная система четвертого порядка с учетом подчиненного регулирования координат преобразуется в систему из четырех линейных уравнений первого порядка. В результате задача управления объектом (1) сводится к решению четырех локальных задач управления линейными подсистемами (2), а именно: полевой и моментной составляющей тока статора i_{1d} и i_{1q}, модулем вектора потокосцепления ротора $|\psi_2|$, скоростью двигателя ω.

$$\begin{cases} \dfrac{di_{1d}}{dt} + (\dfrac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m)i_{1d} = \dfrac{u_{1d}}{\sigma} + V_{1d}; \\ \dfrac{di_{1q}}{dt} + (\dfrac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m)i_{1q} = \dfrac{u_{1q}}{\sigma} + V_{1q}; \\ \dfrac{d|\psi_2|}{dt} + \alpha|\psi_2| = \alpha L_m i_{1d}; \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{M}{J} - \dfrac{M_c}{J}. \end{cases} \quad (2)$$

Желаемое качество замкнутого контура управления координатой электромеханической системы, согласно концепции обратной задачи динамики [4], задается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{d^n z}{dt^n} + ... + \gamma_i \frac{d^i z}{dt^i} + ... + \gamma_0 z = \\ = \beta_m \frac{d^m x^*}{dt^m} + ... + \beta_j \frac{d^j x^*}{dt^j} + ... + \beta_0 x^*. \quad (3)$$

Коэффициенты уравнения γ_i и β_j определяют характер и длительность переходного процесса выходной координаты z при движении по заданной траектории x^*, где x^* – дифференцированная по времени необходимое количество раз функция; $m<n$. Желаемая передаточная функция замкнутого контура управления, полученная по уравнению (3) для случая $n=3$ и $m=1$, имеет вид

$$W_s(p) = \frac{z(p)}{x^*(p)} = \frac{\beta_1 p + \beta_0}{p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_1 p + \gamma_0}. \quad (4)$$

Соответствующая ей передаточная функция разомкнутого контура управления равна

$$W_r(p) = \frac{W_s(p)}{1 - W_s(p)} = \frac{\beta_1 p + \beta_0}{p^3 + \gamma_2 p^2 + (\gamma_1 - \beta_1)p + (\gamma_0 - \beta_0)}. \quad (5)$$

Из функции (5) видно, что для получения системы с астатизмом первого порядка $\nu=1$ необходимо задать значения коэффициентов $\beta_0=\gamma_0$:

$$W_r(p) = \frac{\beta_1 p + \gamma_0}{p[p^2 + \gamma_2 p + (\gamma_1 - \beta_1)]}, \quad (6)$$

а с астатизмом второго порядка $\nu = 2$ – установить $\beta_0=\gamma_0$ и $\beta_1=\gamma_1$:

$$W_r(p) = \frac{\gamma_1 p + \gamma_0}{p^2(p + \gamma_2)}. \quad (7)$$

Заданная добротность по скорости системы (6) определяется выражением $D_\omega^z = \gamma_0 / (\gamma_1 - \beta_1)$, а добротность по ускорению системы (7) равняется $D_\varepsilon^z = \gamma_0 / \gamma_2$. Порядок n уравнения (3) может быть разным для каждого замкнутого контура в соответствии с требованиями к качеству управления и обычно равен или на единицу выше порядка объекта управления. Структура и параметры уравнения желаемого качества управления (3) задаются такими, чтобы возмущенное движение было асимптотически устойчивым. Для уравнения третьего порядка это условие, согласно критерию Гурвица, выполняется при значениях $\gamma_0>0$; $\gamma_1>0$; $\gamma_2>0$ и $\gamma_1\gamma_2>\gamma_0$, а для второго и первого порядка – при положительных значениях коэффициентов. Связь между коэффициентами уравнения (3) и желаемыми показателями качества управления, такими, как время регулирования, вид переходного процесса, перерегулирование, легко устанавливается с помощью известных методов, например, корневых, частотных или стандартных полиномов, с последующим уточнением путем моделирования.

Разработка законов управления полевой и моментной составляющих вектора тока статора. Закон управления полевой составляющей тока i_{1d} по каналу потокосцепления ротора определяется на основании первого уравнения системы (2). Как видно, локальный объект управления описывается уравнением первого порядка, соответствующего апериодическому звену. Порядок желаемого уравнения замкнутого контура тока вида (3) также принимается равным единице ($n=1; m=0$)

$$\dot{z} + \gamma_{0d} z = \gamma_{0d} i_{1d}^* \quad (8)$$

с обеспечением астатизма первого порядка $\nu=1$ и заданной добротностью по скорости $D_\omega^z = \gamma_{0d}$. Длительность монотонного переходного процесса тока $t_{ïï} \approx 3/\gamma_{0d}$ задается с помощью коэффициента γ_{0d}.

Требуется найти такую управляющую функцию регулятора тока u_{1d}, чтобы качество управления током приближалось к желаемому, заданному уравнением (8). Степень приближения реального процесса управления током к желаемому оценивается функционалом, который характеризует нормированную по индуктивности энергию первой производной магнитного поля вида $\dot{W}_m = L\dfrac{\dot{i}^2}{2}$:

$$G(u_{1d}) = \frac{1}{2}\left[\dot{z}(t) - \dot{i}_{1d}(t, u_{1d})\right]^2. \quad (9)$$

Нахождение управляющей функции $u_{1d} = u_{1d}(i_{1d})$ классическими методами по условию достижения абсолютного минимума функционала

$$\min_u G(u_{1d}) = 0 \quad (10)$$

приводит к традиционному закону управления компенсационного типа, для реализации которого требуется точная информация о структуре и параметрах объекта. Отклонение параметров от расчетных значений приводит к ухудшению качества управления.

Этот недостаток устраняется, если отказаться от точного выполнения условия (10), а лишь ограничиться требованием, чтобы значение функционала (9) принадлежало некоторой окрестности экстремального минимума, обеспечивающей допустимую по техническим условиям динамическую ошибку $|z(t) - i_{1d}(t)| \le \varepsilon$. Для этого минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка:

$$\frac{du_{1d}(t)}{dt} = -\lambda_d \frac{dG(u_{1d})}{du_{1d}}, \quad (11)$$

где $\lambda_d>0$ – константа.

С учетом (2) и (8) производная функционала равна:

$$\frac{dG(u_{1d})}{du_{1d}} = -\frac{1}{\sigma}\left(\dot{z} - \dot{i}_{1d}\right). \qquad (12)$$

После подстановки (12) в (11) находится закон управления током

$$\dot{u}_{1d}(t) = k_d(\dot{z} - \dot{I}), \qquad (13)$$

где $k_d = \lambda_d / \sigma = const$ – коэффициент усиления регулятора тока.

Необходимое условие сходимости процесса минимизации функционала при $t\to\infty$

$$\frac{dG(u_{1d})}{dt} < 0;\ G(u_{1d}) \to 0 \qquad (14)$$

выполняется согласно правилу знаков

$$sign(k_d) = sign(1/\sigma). \qquad (15)$$

Переменная $\dot{z}$ в законе управления (13) исполняет роль требуемой (заданной) производной тока, которая определяется в реальном времени из уравнения желаемого качества (8) путем замыкания системы обратной связью по току $z=i_{1d}$:

$$\dot{z} = \gamma_{0d}(i_{1d}^* - i_{1d}). \qquad (16)$$

Окончательно закон управления током принимает вид после интегрирования обеих частей уравнения (13) с учетом (16)

$$\begin{aligned} &u_{1d}(t) = k_d(z - i_{1d}); \\ &z = \gamma_{0d}\int(i_{1d}^* - i_{1d})dt. \end{aligned} \qquad (17)$$

На основании (17) построена структурная схема регулятора тока типа 101 (*n=1; m=0; ν=1*), показанная на рис. 1.

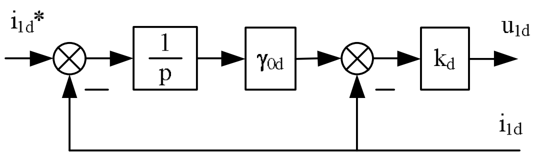

Рисунок 1 – Структура регулятора тока типа 101

Как видно из рис. 1, регулятор имеет нетрадиционную структуру, содержит только параметр γ_{0d} желаемого закона управления согласно (8) и не содержит параметров объекта управления (2), характерного для традиционных регуляторов.

Важной задачей синтеза является исследование устойчивости полученной системы управления. Уравнение замкнутого контура тока

$$\begin{aligned} &\ddot{i}_{1d} + (R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma)\dot{i}_{1d} + (k_d\gamma_{0d}/\sigma)i_{1d} = \\ &= (k_d\gamma_{0d}/\sigma)i_{1d}^*, \end{aligned} \qquad (18)$$

полученное после подстановки в первое уравнение объекта (2) закона управления (13) с учетом (16), показывает, что замкнутая система (18) является устойчивой даже при неограниченном увеличении коэффициента усиления регулятора тока $k_d\to\infty$, т.к., согласно критерию Гурвица, коэффициенты уравнения являются положительными:

$$(R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma) > 0; \quad k_d\gamma_{0d}/\sigma > 0. \qquad (19)$$

С увеличением коэффициента усиления регулятора динамические процессы в контуре тока приближаются к желаемым, заданным уравнением (8), что очевидно при $k_d\to\infty$ после деления всех членов уравнения (18) на составляющую k_d/σ.

В контуре тока находится малая постоянная времени силового преобразователя частоты T_μ, которая не учитывалась при синтезе закона управления. Оценка влияния этой неучтенной инерционности на динамические свойства контура тока осуществляется с помощью уравнения замкнутой системы, полученного аналогично (18):

$$\begin{aligned} &T_\mu\dddot{i}_{1d} + (1 + T_\mu R_1/\sigma + T_\mu\alpha\beta L_m)\ddot{i}_{1d} + \\ &+(R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma)\dot{i}_{1d} + \\ &+(k_d\gamma_{0d}/\sigma)i_{1d} = (k_d\gamma_{0d}/\sigma)i_{1d}^*. \end{aligned} \qquad (20)$$

Согласно критерию Гурвица для устойчивости контура тока, описываемому уравнением (20), требуется выполнение условия

$$\begin{aligned} &(1 + T_\mu R_1/\sigma + T_\mu\alpha\beta L_m)(T_\mu R_1/\sigma + T_\mu\alpha\beta L_m + k_d/\sigma) > \\ &> T_\mu k_d\gamma_{0d}/\sigma, \end{aligned} \qquad (21)$$

которое превращается в следующее неравенство в результате предельного перехода:

$$\gamma_{0d} < 1/T_\mu + R_1/\sigma + \alpha\beta L_m. \qquad (22)$$

Таким образом, наличие в контуре управления током малой постоянной времени T_μ ограничивает максимально допустимое желаемое быстродействие контура тока, задаваемое коэффициентом γ_{0d}.

Важным вопросом является также определение свойств контура тока при конечных значениях коэффициента усиления регулятора. Согласно передаточной функции разомкнутого контура тока, полученной на основании (18) аналогично (5),

$$W_r(p) = \frac{k_d\gamma_{0d}/\sigma}{p[p + (R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma)]}, \qquad (23)$$

токовый контур обладает заданным астатизмом первого порядка *ν=1* и добротностью по скорости, равной

$$D_\omega = \frac{k\gamma_{0d}/\sigma}{R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma} = \frac{\gamma_{0d}}{R_1/k_d + \alpha\beta L_m\sigma/k_d + 1}. \qquad (24)$$

Условием обеспечения допустимой динамической ошибки тока является соизмеримая заданная и реальная добротность $D_\omega^z = D_\omega$, что выполняется при большом коэффициенте усиления регулятора k_d.

Этот недостаток исключается, если синтезировать закон управления на основании уравнения желаемого качества, порядок которого *n=2*, в отличие от (8), на единицу выше порядка уравнения локального объекта управления (первое уравнение системы (2)):

$$\ddot{z} + \gamma_{1_d}\dot{z} + \gamma_{0_d}z = \gamma_{0_d}i_{1d}^*. \qquad (25)$$

Применяя вышеизложенную методику, получается следующий закон управления током:

$$\begin{aligned} &u_{1d}(t) = k_d(z - i_{1d}); \\ &z = \int f_0 dt; \\ &f_0 = \gamma_{0d}\int(i_{1d}^* - i_{1d})dt - \gamma_{1d}i_{1d}. \end{aligned} \qquad (26)$$

По уравнениям (26) построена структурная схема регулятора тока типа 201, представленная на рис. 2. Этот регулятор также содержит только параметры желаемого закона управления γ_{0d} и γ_{1d}, с помощью которых устанавливается требуемый вид и время переходного процесса, а также величина перерегулирование тока. Регулятор не содержит параметров объекта управления, что характерно для традиционных законов.

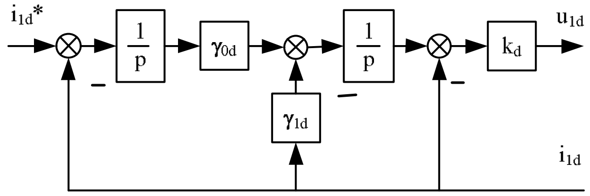

Рисунок 2 – Структура регулятора тока типа 201

Из передаточной функции разомкнутого контура тока для данного закона управления

$$W_r(p) = \frac{k_d \gamma_{0d} / \sigma}{p[p^2 + (R_1/\sigma + \alpha\beta L_m + k_d/\sigma)p + k_d\gamma_{1d}/\sigma]} \quad (27)$$

видно, что токовый контур обладает заданным астатизмом первого порядка $v=1$ и добротностью по скорости, равной заданной:

$$D_\omega = D_\omega^z = \frac{\gamma_{0d}}{\gamma_{1d}}. \quad (28)$$

Это обеспечивает допустимую динамическую ошибку тока при умеренных коэффициентах усиления регулятора k_d.

На основании второго уравнения системы (2) по вышеизложенной методике определяется закон управления для моментной составляющей тока статора i_{1q} на основе уравнения желаемого качества вида

$$u_{1q}(t) = k_q(z - i_{1q});$$
$$z = \gamma_{0q}\int(i_{1q}^* - i_{1q})dt. \quad (29)$$

Согласно (29), регулятор моментной составляющей тока имеет такую же структуру, как регулятор полевой составляющей (рис. 1).

При разработке закона управления моментной составляющей тока статора на основе уравнения желаемого качества второго порядка вида (25) получается закон управления, аналогичный (26).

Разработка закона управления модулем вектора потокосцепления ротора $|\psi_2|$ осуществляется на основании третьего уравнения системы (2). Контур потокосцепления ротора является внешним относительно рассмотренного выше внутреннего контура управления полевой составляющей тока i_{1d}. Локальный объект управления описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому порядок уравнения замкнутого контура потокосцепления вида (3), которым задается желаемое качество управления, также принимается равным единице ($n=1$; $m=0$; $v=1$)

$$\dot z + \gamma_{0\psi} z = \gamma_{0\psi}|\psi_2|^* \quad (30)$$

с заданной добротностью по скорости $D_\omega^z = \gamma_{0\psi}$. Для уменьшения влияния динамики внутреннего контура тока с регулятором (17) на работу контура потокосцепления значение параметра уравнения (30) выбирается из условия $\gamma_{0d} > (3...5)\gamma_{0\psi}$. Длительность монотонного переходного процесса потокосцепления равна $t_{ïï} \approx 3/\gamma_{0\psi}$.

Необходимо найти управляющую функцию регулятора потокосцепления i_{1d}^*, обеспечивающую приближение реального процесса управления к желаемому (30). Степень приближения процессов оценивается функционалом, который характеризует нормированную по индуктивности энергию первой производной магнитного поля вида $\dot W_m = \frac{\dot\psi^2}{2L}$:

$$G(i_{1d}^*) = \frac{1}{2}\left[\dot z(t) - |\dot\psi_2|(t, i_{1d}^*)\right]^2. \quad (31)$$

Минимизация функционала осуществляется по градиентному закону первого порядка

$$\frac{di_{1d}^*(t)}{dt} = -\lambda_\psi \frac{dG(i_{1d}^*)}{di_{1d}^*}, \quad (32)$$

где $\lambda_\psi > 0$ – константа.

Производная функционала (31) равна

$$\frac{dG(i_{1d}^*)}{di_{1d}^*} = -\alpha L_m\left(\dot z - |\dot\psi_2|\right). \quad (33)$$

После подстановки (33) в (32) находится закон управления потокосцеплением

$$\dot i_{1d}^*(t) = k_\psi(\dot z - |\dot\psi_2|), \quad (34)$$

где $k_\psi = \alpha L_m \lambda_\psi = const$ – коэффициент усиления регулятора потокосцепления.

Необходимое условие сходимости процесса минимизации функционала при $t \to \infty$

$$\frac{dG(i_{1d}^*)}{dt} < 0;\ G(i_{1d}^*) \to 0 \quad (35)$$

выполняется согласно правилу знаков

$$sign(k_\psi) = sign(\alpha L_m). \quad (36)$$

Переменная $\dot z$ в законе управления (34) исполняет роль требуемой производной потокосцепления, которая определяется в реальном времени из уравнения (30) путем замыкания обратной связью по потокосцеплению $z=|\psi_2|$:

$$\dot z = \gamma_{0\psi}(|\psi_2|^* - |\psi_2|). \quad (37)$$

После интегрирования обеих частей уравнения (34) с учетом (37) находится окончательный вид закона управления потокосцеплением:

$$i_{1d}^*(t) = k_\psi(z - |\psi_2|);$$
$$z = \gamma_{0\psi}\int(|\psi_2|^* - |\psi_2|)dt. \quad (38)$$

Регулятор потокосцепления, построенный на основе (38), имеет нетрадиционную структуру, изображенную на рис. 1. Он содержит только параметр $\gamma_{0\psi}$ желаемого закона управления (30).

Уравнение замкнутого контура потокосцепления

$$|\ddot\psi_2| + (\alpha + \alpha L_m k_\psi)|\dot\psi_2| + (\alpha L_m k_\psi \gamma_{0\psi})|\psi_2| =$$
$$= (\alpha L_m k_\psi \gamma_{0\psi})|\psi_2|^*, \quad (39)$$

полученное после подстановки в третье уравнение системы (2) закона управления (34) с учетом (37), показывает, что полученная замкнутая система является устойчивой даже при неограниченном увеличении коэффициента усиления регулятора потокосцепления $k_\psi \to \infty$. Согласно критерию Гурвица, коэффициенты уравнения являются положительными:

$$(\alpha + \alpha L_m k_\psi) > 0; \quad \alpha L_m k_\psi \gamma_{0\psi} > 0 \cdot \tag{40}$$

С увеличением коэффициента усиления регулятора динамические процессы в контуре потокосцепления приближаются к желаемым (30). Это видно после деления всех членов уравнения (39) на составляющую $\alpha L_m k_\psi$ при $k_\psi \to \infty$.

Разработка закона управления скоростью двигателя. Контур скорости состоит из оптимизированного внутреннего контура моментной составляющей тока статора и локального объекта управления, описываемого четвертым уравнением системы (2). При разработке закона управления регулятора скорости не учитывается инерционность оптимизированного контура тока, которая может быть охарактеризована коэффициентом γ_{0q} в случае закона управления током вида (29). Для данного объекта первого порядка, представляющего собой интегрирующее звено, порядок уравнения, с помощью которого задается желаемое качество замкнутого контура скорости, также принимается равным единице с обеспечением астатизма первого порядка *v=1* и заданной добротностью по скорости, равной $D_\omega^z = \gamma_{0\omega}$:

$$\dot{z} + \gamma_{0\omega} z = \gamma_{0\omega} \omega^* \cdot \tag{41}$$

Коэффициентом $\gamma_{0\omega} \approx 3/t_{dd'}$ задается требуемая длительность t_{nn} монотонного переходного процесса скорости.

Необходимо найти управляющую функцию регулятора скорости i_{1q}^*, чтобы качество управления скоростью ω приближалось к желаемому, заданному уравнением (41). Степень приближения реального процесса к желаемому оценивается функционалом, который характеризует нормированную по моменту инерции энергию ускорения вида $\dot{W}_k = J\dfrac{\dot{\omega}^2}{2}$:

$$G(i_{1q}^*) = \frac{1}{2}\left[\dot{z}(t) - \dot{\omega}(t, i_{1q}^*)\right]^2 \cdot \tag{42}$$

Минимизация функционала, как и для контура тока, осуществляется по градиентному закону первого порядка:

$$\frac{di_{1q}^*(t)}{dt} = -\lambda_\omega \frac{dG(i_{1q}^*)}{di_{1q}^*}, \tag{43}$$

где $\lambda_\omega > 0$ – константа.

Производная функционала (42) равна:

$$\frac{dG(i_{1q}^*)}{di_{1q}^*} = -\frac{1}{J}\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}|\psi_2|(\dot{z} - \dot{\omega}) \cdot \tag{44}$$

После подстановки (44) в (43) находится закон управления скоростью

$$\dot{i}_{1q}^*(t) = k_\omega(\dot{z} - \dot{\omega}), \tag{45}$$

где $k_\omega = \dfrac{1}{J}\dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m}{L_2}|\psi_2|\lambda_\omega = const$ – коэффициент усиления регулятора скорости.

Переменная $\dot{z}$ в законе управления (45) исполняет роль требуемого ускорения, которая определяется в реальном времени из уравнения желаемого качества (41) путем замыкания обратной связью по скорости двигателя $z=\omega$:

$$\dot{z} = \gamma_{0\omega}(\omega^* - \omega). \tag{46}$$

Окончательно закон управления скоростью принимает вид после интегрирования обеих частей уравнения (45) с учетом (46):

$$\begin{aligned} i_{1q}^*(t) &= k_\omega(z - \omega); \\ z &= \gamma_{0\omega}\int(\omega^* - \omega)dt. \end{aligned} \tag{47}$$

На основании уравнения (47) строится регулятор скорости типа 101, структурная схема которого имеет вид, как на рис. 1. Регулятор скорости содержит только параметр желаемого закона управления и не содержит параметров объекта управления (2), что характерно для традиционных законов.

С увеличением коэффициента усиления регулятора скорости динамические процессы в контуре приближаются к желаемым, заданным уравнением (41). Система, согласно критерию Гурвица, является устойчивой даже при неограниченном увеличении коэффициента усиления регулятора скорости $k_\omega \to \infty$, что видно из уравнения замкнутого контура скорости:

$$\begin{aligned} &\ddot{\omega} + \frac{1}{J}\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}|\psi_2| k_\omega \dot{\omega} + \frac{1}{J}\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}|\psi_2| k_\omega \gamma_{0\omega}\omega = \\ &= \frac{1}{J}\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}|\psi_2| k_\omega \gamma_{0\omega}\omega^*. \end{aligned} \tag{48}$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_r(p) = \frac{\dfrac{1}{J}\dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m}{L_2}|\psi_2| k_\omega \gamma_{0\omega}}{p(p + \dfrac{1}{J}\dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m}{L_2}|\psi_2| k_\omega)} \tag{49}$$

показывает, что система обладает заданным астатизмом *v=1* и заданной добротностью по скорости $D_\omega = D_\omega^z = \gamma_{0\omega}$ при умеренных коэффициентах усиления регулятора k_ω. Это является следствием наличия в локальном объекте управления интегрирующей составляющей.

Оценка влияния неучтенной при синтезе инерционности контура тока на динамические свойства контура скорости осуществляется с помощью характеристического уравнения замкнутой системы

$$T_I T_0 p^3 + T_0 p^2 + k_\omega p + k_\omega \gamma_{0\omega} = 0, \tag{50}$$

где $T_I = 1/\gamma_{0q}$, $T_0 = 1/(\dfrac{1}{J}\dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m}{L_2}|\psi_2|)$.

Согласно (50), для устойчивости контура скорости требуется выполнение следующего условия $\gamma_{0\omega} < \gamma_{0q}$. Таким образом, инерционность контура тока ограничивает желаемое быстродействие контура скорости.

Полученный закон управления скоростью (47) обеспечивает астатизм первого порядка по управляющему воздействию. Если по технологическим условиям требуется астатизм второго порядка $\nu=2$, то закон управления синтезируется по уравнению желаемого качества вида (3), порядок которого на единицу выше порядка уравнения локального объекта ($n=2;\ m=1$):

$$\ddot{z}+\gamma_{1\omega}\dot{z}+\gamma_{0\omega}z=\gamma_{1\omega}\dot{i}_{1q}^{*}+\gamma_{0\omega}i_{1q}^{*}. \qquad (51)$$

В результате закон управления скоростью после разработки по изложенной методике принимает вид

$$\begin{aligned} & i_{1q}^{*}(t)=k\left[z-\omega\right]; \\ & z=\int f_0 dt; \\ & f_0=\gamma_0\int(\omega^{*}-\omega)dt+\gamma_1(\omega^{*}-\omega). \end{aligned} \qquad (52)$$

Структурная схема регулятора скорости типа 212, которая построена по уравнениям (52), представлена на рис. 3.

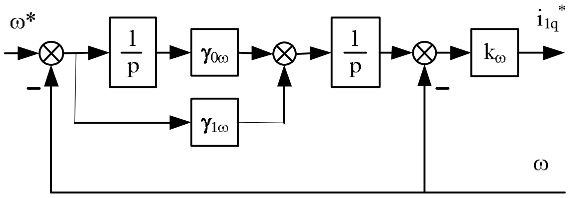

Рисунок 3 – Структура регулятора скорости типа 212

Этот регулятор также содержит только параметры желаемого закона управления $\gamma_{0\omega}$ и $\gamma_{1\omega}$, с помощью которых устанавливаются требуемый вид, перерегулирование и время переходного процесса скорости.

Исследование представленной системы векторного управления проведено при действии параметрического возмущения в виде увеличения и уменьшения вдвое электрического сопротивления обмотки ротора R_2 асинхронного двигателя типа 4А90L2У3: $P_н=3$ *кВт*, $\omega_н=300$ *рад/с* – номинальная мощность и угловая скорость; $R_1=2{,}577$ *Ом*, $R_2=1{,}682$ *Ом*, $L_1=0{,}394$ *Гн*, $L_2=0{,}399$ *Гн* – активное сопротивление и индуктивность статора и приведенное ротора; $L_m=0{,}387$ *Гн* – индуктивность контура намагничивания. Регуляторы имеют следующие параметры: потокосцепления $\gamma_{0\psi}=50$, $k_{\psi}=100$; полевой составляющей тока $\gamma_{0d}=1000$, $k_d=500$; скорости $\gamma_{0\omega}=100$, $k_{\omega}=1$; моментной составляющей тока $\gamma_{0q}=1000$, $k_q=500$.

На рис. 4 представлены переходные процессы скорости, потокосцепления ротора, а также их ошибок для трех значений R_2: 1,682 Ом (паспортное); 0,841 Ом (вдвое меньше); 3,364 Ом (вдвое больше).

Оценка влияния изменения сопротивления на качество управления проведена на низкой скорости (в шесть раз меньше номинальной), когда негативные последствия проявляются больше всего. Как видно из рис. 4, три графика для трех значений сопротивления практически сливаются, а существенное для традиционной системы параметрическое возмущение практически не влияет на качество управления скоростью.

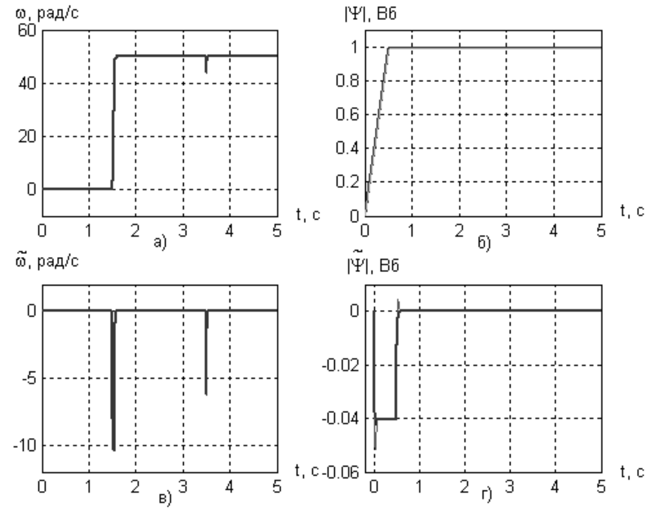

Рисунок 4 – Графики переходных процессов: а) скорости; б) потокосцепления; в) ошибок скорости; г) ошибок потокосцепления

На рис. 5 показаны графики переходных процессов момента и модуля тока двигателя как механических и электрических переменных, что позволяет сопоставить эффективность работы полученных законов управления с традиционными законами.

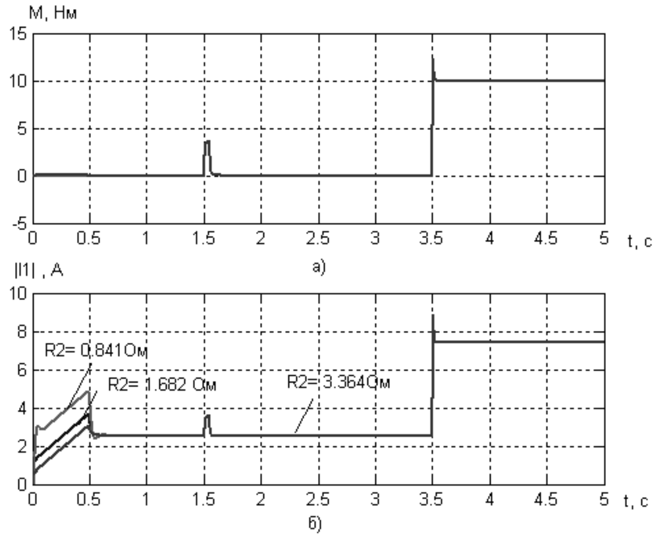

Рисунок 5 – Графики переходных процессов: а) момента; б) модуля тока статора

ВЫВОДЫ. Метод синтеза законов управления электромеханических систем на основе минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий и концепции обратных задач динамики обеспечивает высокое качество управления в статическом режиме и во время переходных процессов в условиях действия параметрических и координатных возмущений без применения дополнительных алгоритмов адаптации. Для построения структуры регуляторов не нужна детальная математическая модель объекта управления. Закон управления записывается по уравнению объекта и по дифференциальному уравнению, с помощью которого задается желаемое качество управления координатой. На примере известной системы векторного управления скоростью асинхронного двигателя изложена методика получения законов управления, а также произведено исследование качества управления в условиях изменения вдвое электрического сопротивления обмотки ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – Вып. 2. – С. 120–140.

2. Островерхов Н.Я., Бурик Н.П. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий // Электротехника и электроэнергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2011. – Вып. 1. – С. 41–49.

3. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

4. Островерхов Н.Я. Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основании концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий движения // Вестник НТУ „ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып. 30. – С. 105–110.

CONTROL OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BASED ON MINIMIZATION OF LOCAL FUNCTIONALS OF THE INSTANTANEOUS ENERGY VALUES

N. Ostroverkhov, N. Buryk
National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"
prosp. Peremohy, 37, Kiev, 03506, Ukraine. E-mail: ostroverkhov@list.ru

A method of control of electromechanical systems, providing a low sensitivity to changes in the parameters of the control object and its dynamic decomposition is presented. Search of control actions carried out by minimizing local functionals (Lyapunov functions for closed systems), as which appear instantaneous energy values and their derivatives. Control laws give properties of stability in general for closed system that allows solving the control tasks for interdependent, nonlinear objects, both for linear one-dimensional systems on mathematical models of local loops. A characteristic feature of the optimization is to achieve not absolute minimum of the functional quality, as in traditional systems, and some minimum value, which provides the allowable on technical specifications dynamic error system. The design of the structure regulators does not require more detailed mathematical model of the control object. Law of control is determined based on differential equation that specifies the desired quality controls the coordinate of electromechanical system. Produced regulators have non-traditional structure and do not contain the parameters of control object, unlike traditional regulators. Results of experimental researches confirmed the effectiveness of proposed control laws and show their advantages compared to traditional laws.

Key words: electromechanical system, control laws, researches.

REFERENCES

1. Krutko, P.D. (2005), "Robustly stable structures of control systems of high dynamic precision. Algorithms and dynamics of control of model objects", *Journal of Computer and Systems Sciences International*, Vol. 2, pp. 120–140. (in Russian)

2. Ostroverkhov, N.Ya. and Buryk, N.P. (2011), "Control of coordinates electric drives based on the concept of inverse dynamics problems for minimization local functionals momentary values of energy", *Electrotechnics and electroenergetics ZNTU*, Vol. 1, pp. 41–49. (in Russian)

3. Chernousko, F.L., Ananyevskiy, I.M. and Reshmin, S.A. (2006), *Metody upravleniia nelineynymi mekhanicheskimi sistemami* [Methods of control nonlinear mechanical systems], Fizmatlit, Moscow, Russia. (in Russian)

4. Ostroverkhov, N.Ya. (2008), "Method for the synthesis of regulators of electromechanical systems based on of the concept of inverse problems of dynamics in combination with the minimization of local functionals of the instantaneous motion energy values", *Vestnik NTU "KPI",* Vol. 30, pp. 105–100. (in Russian)

Стаття надійшла 1.03.2013.