

УДК 62–50

Л.А. Краснодарец, д-р техн. наук, профессор,**В.А. Крамарь, д-р техн. наук, доцент,****Э.О. Балаканов, аспирант,****А.Е. Осадченко***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: lakrasno@gmail.com***ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ**

Ставятся и решаются задачи аналитического построения структурных схем регуляторов, предназначенных для автоматизированного электропривода, на основе локальной оптимизации по энергетическим критериям. Решение таких задач приводит к получению выражений для управляющих функций, по которым формально определяется искомая структура. Исследованы свойства регуляторов, построенных на основе применения различных критериев оптимизации.

Ключевые слова: процесс управления, критерий оптимизации, закон управления, регулятор, адаптация, эталонная модель.

Введение. Процессы управления в системах автоматизированного электропривода связаны с изменением и преобразованием энергии. По этой причине представляется естественным разрабатывать алгоритмы управления электрическими машинами на основе энергетических критериев. Решение этой задачи стало возможным с появлением «новых технологий аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением» [1]. Эти технологии, основанные на применении концепций обратных задач динамики в сочетании с оптимизацией по локальным квадратическим критериям, имеющим физический смысл механической энергии, позволяют аналитическим путем конструировать законы управления для непрерывных регуляторов в форме с обратными связями на основе минимизации кинетической энергии или энергии ускорения. Системы управления с такими регуляторами имеют в своем составе информационно-измерительный канал, структуру которого образуют обратные связи, поставляющие данные о текущем состоянии объекта управления. Эти данные используются для оптимизации в реальном масштабе времени управляющей функции при помощи минимизации локальных критериев, содержащих разность энергий эталонной модели и объекта управления, что делает систему управления адаптивной и придает ей робастные свойства.

Целью работы является применение новой технологии проектирования алгоритмического обеспечения управления движением для конструирования закона адаптивного управления электроприводом. При этом исследуется система управления двигателем постоянного тока (ДПТ) с регуляторами, реализующими разные законы управления, построенные на основе различных энергетических критериев.

Пусть ДПТ с независимым возбуждением описывается дифференциальными уравнениями

$$u_a = R_a(T_a \frac{di_a}{dt} + i_a) + e_a, \quad J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \quad e_a = k_E \omega_m, \quad M = k_M i_a,$$

где u_a, i_a, e_a — напряжение, ток и противоЭДС якоря; $L_a, R_a, T_a = L_a / R_a$ — индуктивность, сопротивление и постоянная времени цепи якоря; $\omega_m, M, M_H, \theta_m$ — угловая скорость вращения ротора, электромагнитный момент, момент нагрузки и угол поворота ротора; J, k_E, k_M — момент инерции ротора и конструктивные постоянные.

Приведем уравнения ДПТ к виду с начальными условиями

$$\ddot{n} + a_1 \dot{n} + a_0 n = b_0 u; \quad t = t_0, \quad n(t_0) = n_0, \quad \dot{n}(t_0) = \dot{n}_0, \quad (1)$$

где n — управляемая переменная (скорость вращения); u — управляющая функция; a_1, a_0 и b_0 — параметры.

Поставим задачу — сконструировать закон управления в форме с обратными связями, который обеспечит перевод объекта управления из начального $t_0 = 0, n_0 = 0, \dot{n}_0 = 0$ в требуемое стационарное состояние равновесия $t > 0, n = \bar{n} = const, \dot{n} = 0$. При этом необходимо, чтобы фазовые траектории обобщенных координат объекта проходили в малой окрестности фазовых траекторий координат эталонной модели

$$\ddot{n}^* + \alpha_1 \dot{n}^* + \alpha_0 n^* = \alpha_0 \bar{n}; \quad t = t_0, n^*(t_0) = n_0^*, \dot{n}^*(t_0) = \dot{n}_0^*,$$

а степень близости этих траекторий оценивалась величинами критериальных функций

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{n}^*(t) - \ddot{n}(t, u)]^2, \quad t \geq 0 \quad \text{или} \quad (2)$$

$$K(u) = \frac{1}{2} [\dot{n}^*(t) - \dot{n}(t, u)]^2, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

которые соответственно имеют физический смысл энергии ускорения [1] или кинетической энергии. В обоих случаях речь идет о нормированной по массе механической энергии.

Решение поставленной задачи конструирования закона управления выполним аналитическим методом на основе минимизации критериальных функций (2) и (3). Вначале рассмотрим функцию (2). Для нахождения искомого решения воспользуемся методом простого градиента, для которого справедливо соотношение [1]

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, \quad (4)$$

где $\lambda = \text{const}$ — характеризует скорость, с которой управляющая функция $u(t)$ приближается к оптимальному значению u_{opt} . Соотношение (4) путем вычисления производной в его правой части и с учетом критериальной функции (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{du}{dt} = \lambda b_0 [\ddot{n}^* - \ddot{n}(t, u)], \quad (5)$$

где $\ddot{n}^*$ — требуемое ускорение, которое формируется эталонной моделью; $\ddot{n}$ — текущее ускорение объекта управления; b_0 — коэффициент усиления объекта управления, входящий в уравнение (1).

Соотношение (5) определяет искомый закон управления в дифференциальной форме. Анализ уравнения (1) показывает, что изменение какого-либо из параметров объекта a_0, a_1, b_0 (или всех вместе) приводит к изменению производной $\ddot{n}(t, u)$, что в соответствии с (5) обеспечит адаптацию управления для новых условий функционирования системы. По этой причине закон управления (5), можно назвать законом прямого адаптивного управления. Структура регулятора, реализующего такой закон, формируется в ходе преобразования уравнения (5) к виду, удобному для технической реализации. С учетом (1) и (2) выражение (5) принимает вид

$$\frac{du}{dt} = \lambda b_0 [\alpha_0 (\bar{n} - n^*) - \alpha_1 \dot{n}^* - \ddot{n}], \quad (6)$$

где n^* и $\dot{n}^*$ — переменные эталонной модели, которые принимают участие в формировании управления. Заменой в (6) этих переменных соответствующими переменными, поступающими от объекта управления $n^* = n$ и $\dot{n}^* = \dot{n}$, формируется структура информационного канала обратной связи. Далее путем интегрирования при нулевых начальных условиях обеих частей модифицированного уравнения (6) получается окончательная форма (аналитическая структура) закона управления адаптивного регулятора в виде

$$u = \lambda b_0 \left[\alpha_0 \int_0^t (\bar{n} - n) dt - \alpha_1 n - \dot{n} \right], \quad (7)$$

откуда следует структура информационного канала обратной связи.

По выражению (7) можно построить структурную схему адаптивного регулятора, которая изображена на рисунке 1.

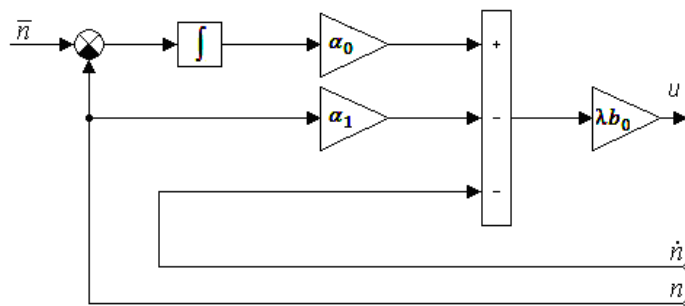


Рисунок 1 – Структурная схема адаптивного регулятора, соответствующая сконструированному закону управления (7)

Для случая, когда производная управляемой координаты системы непосредственно на объекте не измеряется, структурная схема, изображенная на рисунке 1, приводится к виду, показанному на рисунке 2.

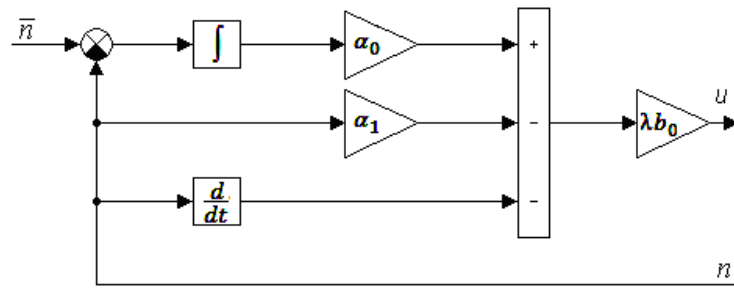


Рисунок 2 — Структурная схема адаптивного регулятора для случая, когда производная управляемой координаты на объекте не измеряется

Как следует из рисунка 2, элементный состав адаптивного регулятора соответствует составу традиционного ПИД-регулятора. При этом структуры обоих устройств заметно отличаются.

При рассмотрении критериальной функции (3) соотношение (4) примет вид

$$\frac{du}{dt} = -\lambda \frac{\partial K(u)}{\partial u}. \quad (8)$$

Вычисляя производную в правой части (8), с учетом (3), можно получить выражение закона управления в дифференциальной форме, который соответствует критериальной функции, имеющей смысл нормированной по массе кинетической энергии

$$\frac{du}{dt} = \lambda \frac{b_0}{a_1} [\dot{n}^*(t) - \dot{n}(t, u)]. \quad (9)$$

Далее в соотношении (9) выполним подстановку

$$\dot{n}^* = \frac{[\alpha_0(\bar{n} - n^*) - \ddot{n}^*]}{\alpha_1},$$

которая следует из уравнения эталонной модели, и произведем замены $n^* = n$; $\dot{n}^* = \dot{n}$; $\ddot{n}^* = \ddot{n}$, что будет соответствовать введению отрицательных обратных связей в управляемой системе [1]. Таким образом, соотношение (9) преобразуется к виду

$$\frac{du}{dt} = \lambda \frac{b_0}{a_1} \left[\frac{\alpha_0(\bar{n} - n) - \ddot{n}}{\alpha_1} - \dot{n}(t, u) \right]. \quad (10)$$

Интегрированием обеих частей (10) при нулевых начальных условиях получим окончательное выражение искомого закона управления, соответствующего критериальной функции (3), в форме с отрицательными обратными связями — по управляемой переменной n и её первой производной $\dot{n}$ в виде

$$u = \lambda \frac{b_0}{a_1} \left[\frac{\alpha_0}{\alpha_1} \int_0^t (\bar{n} - n) dt - \frac{1}{\alpha_1} \dot{n} - n \right]. \quad (11)$$

По выражению (11) можно построить структурную схему адаптивного регулятора, которая изображена на рисунке 3.

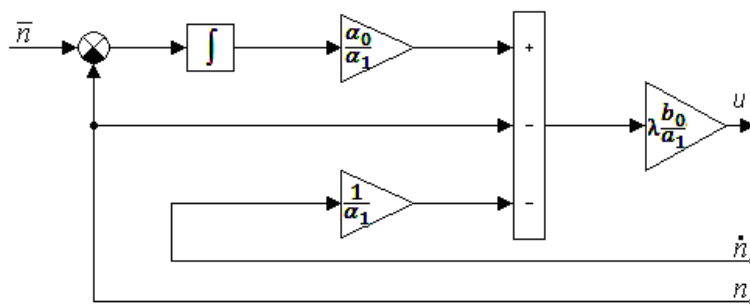


Рисунок 3 — Структурная схема адаптивного регулятора, реализующего закон управления (11)

Если производная управляемой координаты системы непосредственно на объекте не измеряется, структурная схема, изображенная на рисунке 3, приводится к виду, представленному на рисунке 4.

Синтез параметров адаптивного регулятора, выполненный в соответствии с [2], сводится к расчёту коэффициентов α_0 , α_1 эталонной модели и параметра λ .

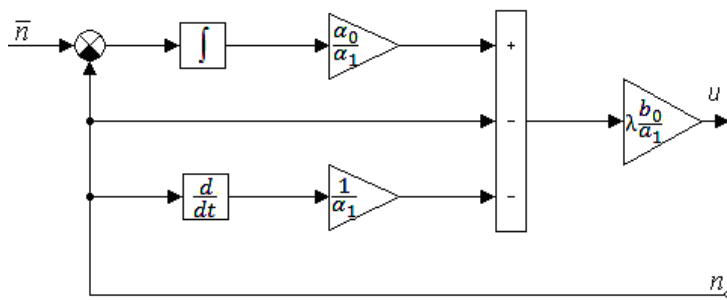


Рисунок 4 — Структурная схема адаптивного регулятора для случая, когда производная управляемой координаты не измеряется

Исследование сконструированных законов управления выполнено методом моделирования в среде Matlab. При этом структурная схема ДПТ соответствует модели, приведенной в [3]. Схема моделирования САУ с адаптивным регулятором изображена на рисунке 5.

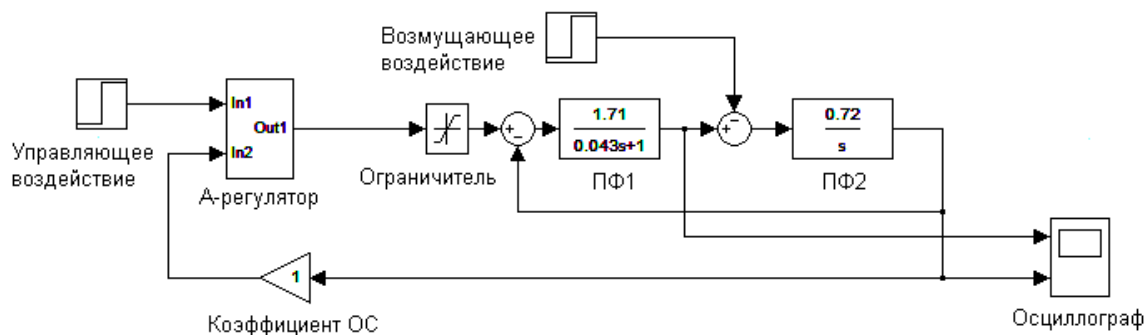


Рисунок 5 — Схема моделирования системы управления ДПТ с адаптивным регулятором

Внутренняя структура А-регулятора соответствует схемам, изображенным на рисунках 2 и 4.

Моделирование производилось при синтезированных параметрах регуляторов, обеспечивающих желаемое время переходной характеристики $t_p = 0,5\text{с}$ при перерегулировании $\sigma \leq 5\%$. При использовании критериальной функции (2) параметры регулятора получили следующие значения: $\lambda = 0,048$, $\alpha_0 = 196,9$, $\alpha_1 = 19,8$, а для критериальной функции (3) эти параметры существенно изменились: $\lambda = 7,79$, $\alpha_0 = 9,9$, $\alpha_1 = 1$. При этом использовались параметры объекта: $b_0 = 28,8$ в первом случае и $a_1 = 23,25$, $b_0 = 28,8$ — во втором.

Результаты моделирования системы с адаптивным регулятором, структура которого построена на основе энергетического критерия (2), представлены в виде соответствующих переходных характеристик, изображённых на рисунках 6 и 7. Исследования выполнены при различных значениях постоянной времени T_a , а также при действии возмущения, приложенного в момент $t = 0,6\text{с}$.

На рисунке 6 изображены графики переходных характеристик в системе с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (7). На левых графиках приведены результаты моделирования при постоянной времени цепи якоря $T_a = 0,043\text{с}$, а на правом — при $T_a = 0,43\text{с}$. Следует отметить, что введением дополнительного усилителя в прямой цепи системы с коэффициентом усиления $K \geq 10$ можно добиться одинаковых результатов проводимого эксперимента.

На рисунке 7 приведены результаты аналогичных исследований системы управления ДПТ с адаптивным регулятором, структура которого построена на основе энергетического критерия (3). Как следует из графиков, приведенных справа, значительное увеличение (на порядок) постоянной времени якорной цепи T_a при возмущении, приложенном в момент $t = 0,7\text{с}$, существенно снижает качество процесса управления.

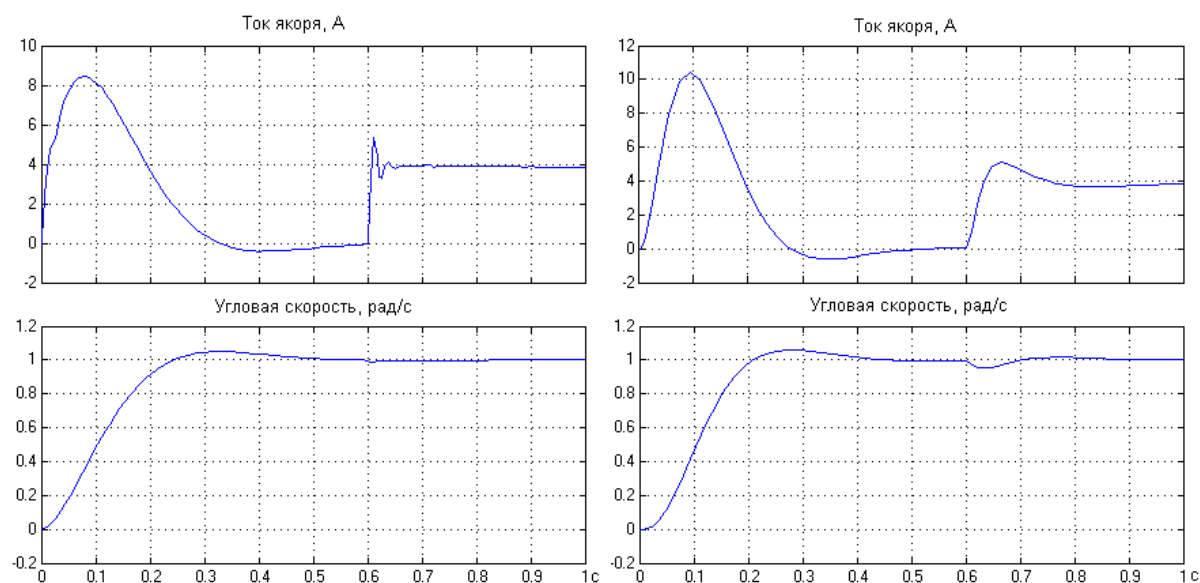


Рисунок 6 — Графики переходных характеристик системы с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (7)

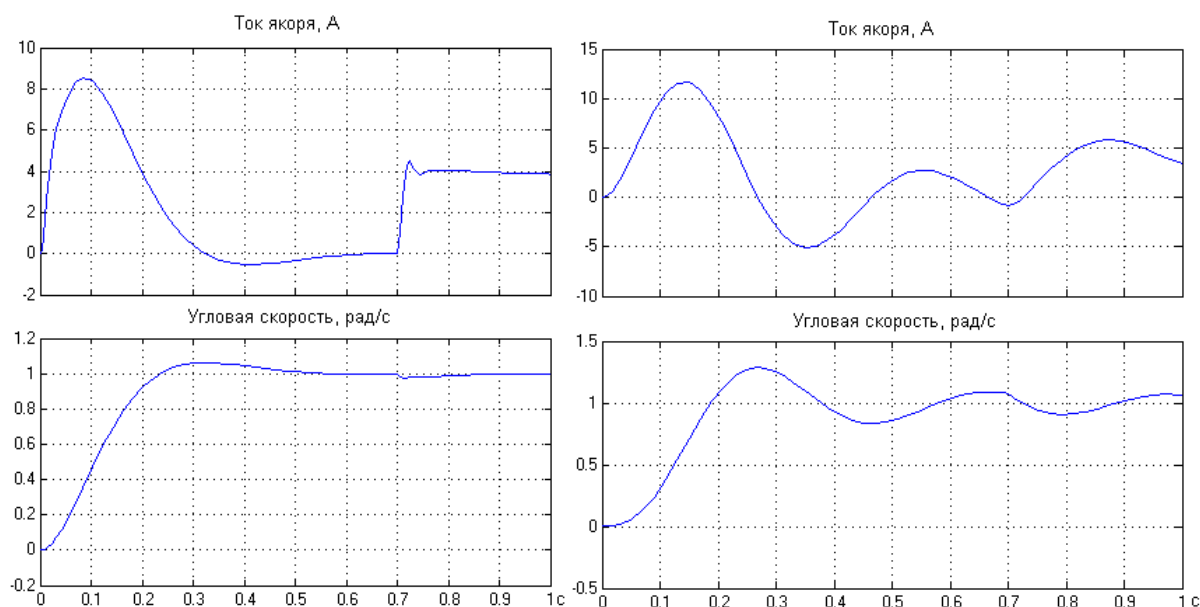


Рисунок 7 — Графики переходных характеристик системы с адаптивным регулятором, реализующим закон управления (11)

Исследование робастных свойств систем с законами управления (7) и (11) показало, что существенное изменение одного из параметров объекта управления мало влияет на качество работы системы с регулятором, реализующим закон управления (7). Робастные свойства системы с законом управления (11) проявляются менее заметно. Для обоих типов регуляторов чувствительность САУ к параметрическим и непараметрическим возмущениям снижается с ростом усиления в прямой цепи.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении разработки алгоритмического и программного обеспечения процессов адаптивного управления электроприводами постоянного и переменного тока с цифровыми регуляторами.

Библиографический список использованной литературы

1. Крутько П.Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением / П.Д. Крутько // Управление, автоматизация и окружающая среда: материалы междунаро. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 8–13 сентября 2008 г. — Севастополь, 2008. — С. 4–24.

2. Краснодарец Л.А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации / Л.А. Краснодарец // Вестник СевНТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108. — С. 5–9.

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.

Поступила в редакцию 29.10.2012 г.

Краснодубец Л.А., Крамарь В.О., Балаканов Е.О., Осадченко А.Є. Оптимізація систем автоматизованого електроприводу на основі енергетичних критеріїв

Визначено та вирішено завдання аналітичної побудови структурних схем регуляторів, призначених для автоматизованого електроприводу, на основі локальної оптимізації з енергетичних критеріїв. Вирішення таких завдань спричиняє отримання виразів для керуючих функцій, за якими формально визначається шукана структура. Досліджено властивості регуляторів, побудованих на основі застосування різних критеріїв оптимізації.

Ключові слова: процес управління, критерій оптимізації, закон управління, регулятор, адаптація, еталонна модель.

Krasnodubets L.A., Kramar V.A., Balakanov E.O., Osadchenko A.E. Optimization of systems of the automated electric drive on the basis of power criteria

Problems of analytical construction of block diagrams of the controllers intended for the automated electric drive, on the basis of local optimization by power criteria are put and solved. The solution of such problems leads to deriving of expressions for operating functions on which the required structure is formally defined. Properties of the controllers constructed on the basis of application of various criteria of optimization are investigated.

Keywords: process of control, criterion of optimization, the control law, the controller, the adaptation, reference model.