

УДК 62-50

Л.А. Краснодубец, д-р техн. наук,

В.А. Крамарь, канд. техн. наук,

Э.О. Балаканов, аспирант

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, д. 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: lakrasno@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исследуется возможность замены традиционных ПИД - регуляторов новыми адаптивными А - регуляторами. Показано, что такая замена в значительной степени улучшает характеристики исследуемой системы, превращая её в робастную. При этом замена регулятора выполняется формально и практически без подстройки. Желаемые характеристики системы управления определяются параметрами А - регулятора, расчёт которых выполняется без учёта динамики объекта управления.

Ключевые слова: автоматическое управление, стабилизация, адаптация, робастность, регулятор, переходная характеристика.

Предложенный в [1] метод аналитического конструирования адаптивных регуляторов позволил создать А-регулятор – принципиально новое устройство [2], по назначению, структуре и составу напоминающее широко распространённый ПИД-регулятор, но отличающееся от последнего тем, что системе управления, в состав которой оно входит, придаёт свойство робастности. Это обстоятельство приводит к мысли о преобразовании в целях модернизации существующих систем управления, оснащённых ПИД-регуляторами, в робастные путём замены традиционных регуляторов новыми А-регуляторами при сохранении основных показателей качества системы – времени переходной характеристики и перерегулирования.

Целью работы является постановка и решение задачи синтеза А-регулятора, предназначенного для замены ПИД-регулятора, входящего в структуру автоматической системы стабилизации скорости двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением.

Пусть система стабилизации скорости ДПТ, подлежащая модернизации, представлена структурной моделью [3], изображённой на рисунке 1.

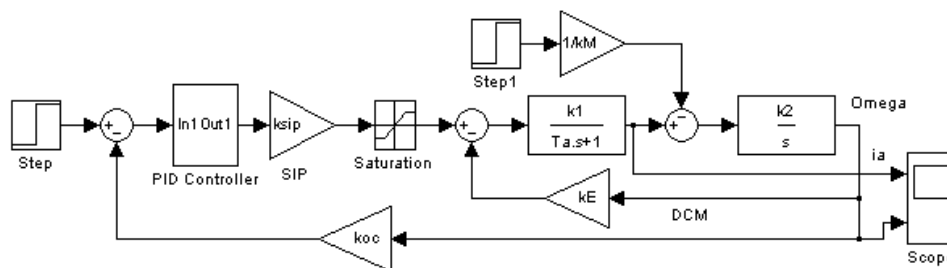


Рисунок 1 – Структурная модель системы стабилизации скорости ДПТ

В состав структурной модели входят следующие блоки-субмодели: PID-controller – ПИД-регулятор, SIP – широтно-импульсный преобразователь с ограничением по выходу, предназначенный для управления током якорной цепи, DCM – ДПТ с независимым возбуждением.

Модель ДПТ построена по уравнениям, описывающим процессы в электрической машине постоянного тока, которые имеют следующий вид:

$$u_a = R_a(T_a \frac{di_a}{dt} + i_a) + e_a, \quad J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \quad e_a = k_E \omega_m, \quad M = k_M i_a, \quad (1)$$

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.

Структурная субмодель ДПТ как объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям получена по уравнениям (1) и на рисунке 1 обозначена как DCM.

Конкретные значения параметров структурной модели, объекта управления и параметров настройки ПИД-регулятора системы стабилизации ДПТ, приведены в [3], где они получили следующие значения: параметры двигателя – $k_1 = 1,72 \text{ 1/Ом}$, $k_2 = 0,72 \text{ 1/Амс}^2$, $k_M = 0,26 \text{ Нм/А}$, $k_E = 0,34 \text{ Вс}$, $T_a = 0,43 \text{ с}$; параметры модели – $k_{SP} = 10$, $k_{oc} = 0,1$; параметры настройки ПИД-регулятора – $T_{dp} = 0,01 \text{ с}$, $k_p = 38,42$, $k_i = 17$, $k_d = 16,2$.

Моделирование исследуемой системы в целях выяснения её робастных свойств проводилось дважды с различными (на порядок) значениями постоянной времени T_a в условиях действия управляющего и возмущающего воздействий. Результаты моделирования системы стабилизации скорости ДПТ приведены в виде графиков переходных характеристик, изображенных на рисунке 2.

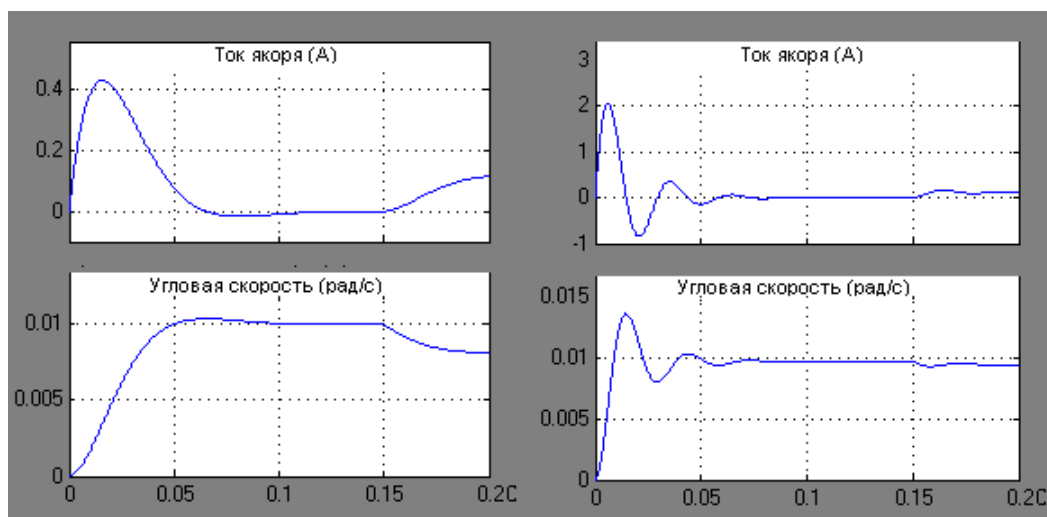


Рисунок 2 – Графики переходных характеристик системы с ПИД-регулятором

Как следует из графика, приведенного на рисунке 2 слева, время переходного процесса (при $T_a = 0,43 \text{ с}$) по управляемой координате (угловой скорости) в системе с ПИД-регулятором характеризуется величиной $t_p = 0,1 \text{ с}$ при перерегулировании $\sigma \approx 5\%$.

Повторное моделирование при $T_a = 0,043 \text{ с}$ (график справа) показало, что изменение параметра объекта управления на порядок привело к значительному изменению переходной характеристики. При сохранении времени переходной характеристики на прежнем уровне ($t_p = 0,1 \text{ с}$) величина перерегулирования и максимальное значение тока якоря увеличились приблизительно в пять раз и достигли значений соответственно $\sigma \approx 28\%$, $i_{\max} \approx 2 \text{ А}$, что характеризует систему с ПИД-регулятором как чувствительную к параметрическим возмущениям, или неробастную. Из графиков также следует, что при $t = 0,15 \text{ с}$ на объект управления действует возмущающий момент M_H , который приводит к появлению заметной статической ошибки в обоих экспериментах.

Поставим задачу существенно повысить качество исследуемой системы управления при сохранении основных эксплуатационных характеристик (времени переходной характеристики и перерегулирования) на прежнем уровне за счёт замены традиционного ПИД-регулятора новым адаптивным А-регулятором, обладающим способностью придавать объектам управления свойство робастности.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом, изложенным в [1]. Прежде всего, запишем уравнение для ДПТ с независимым возбуждением в форме дифференциального уравнения, которое при сохранении обозначений, принятых в [3], примет вид

$$\ddot{\omega} + a_1 \dot{\omega} + a_0 \omega = b_0 u_a; t = 0, \omega(0) = \omega_0, \dot{\omega}(0) = \dot{\omega}_0, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость; u_a – напряжение в якорной цепи;

$$a_0 = \frac{k_1 k_2 k_E}{T_a}; a_1 = \frac{1}{T_a}; b_0 = \frac{k_1 k_2}{T_a}.$$

В таком случае параметры модели (2) получают следующие значения:

$$a_0 = 0,973; a_1 = 2,325; b_0 = 2,88. \quad (3)$$

Далее выберем эталонную модель, соответствующую объекту управления (2), в виде

$$\ddot{\omega}^* + \alpha_1 \dot{\omega}^* + \alpha_0 \omega^* = \alpha_0 \bar{\omega}; \alpha_0, \alpha_1 = \text{const} > 0. \quad (4)$$

Следуя методу [1], найдём закон управления $u(\omega, \dot{\omega}, t)$ в форме обратной связи, который обеспечит перевод объекта управления из начального состояния (2) в заданное стационарное состояние равновесия $\omega(t) = \bar{\omega}$; $\dot{\omega}(t) = 0$. При этом требуется, чтобы процессы $\omega(t) \rightarrow \bar{\omega}$; $\dot{\omega}(t) \rightarrow 0$ в замкнутой системе управления

$$\ddot{\omega}(t) + a_1 \dot{\omega}(t) + a_0 \omega(t) = b_0 u(\omega, \dot{\omega}, t)$$

проходили в малой окрестности эталонных процессов $\omega^*(t) \rightarrow \bar{\omega}$; $\dot{\omega}^*(t) \rightarrow 0$, формируемых эталонной моделью (4), определяющей желаемые динамические и статические свойства проектируемой системы, а степень приближения этих процессов оценивалась в ходе функционирования системы автоматического управления значением целевой функции

$$G(u) = \frac{1}{2} [\ddot{\omega}^*(t) - \ddot{\omega}(t, u)]^2, t \geq 0, \quad (5)$$

где $G(u)$ представляет собой нормированное по массе значение энергии ускорения.

Искомый закон управления в таком случае, как показано в [1], принимает вид

$$u = \lambda b_0 \left[\alpha_0 \int_0^t (\bar{\omega} - \omega) dt - \alpha_1 \omega - \dot{\omega} \right] = K \left[\alpha_0 \int_0^t (\bar{\omega} - \omega) dt - \alpha_1 \omega - \dot{\omega} \right], \quad (6)$$

где $\lambda = \text{const}$ – параметр, характеризующий скорость приближения к экстремуму (минимуму) целевой функции (5) и, следовательно влияющий на качество процесса адаптации. По выражению (6) можно построить структурную схему моделирования А-регулятора, которая приведена на рисунке 3, где в качестве дифференцирующей цепи использована модель реального дифференцирующего устройства с единичным усилением и постоянной времени T_{da} .

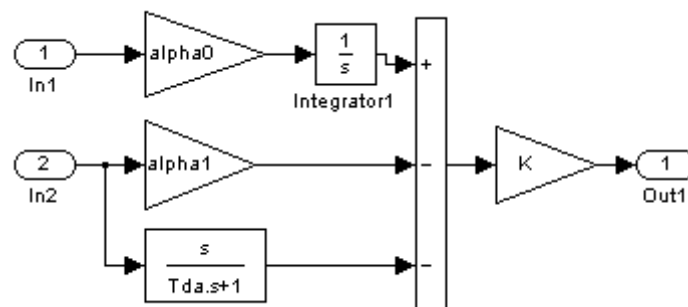


Рисунок 3 – Структурная схема моделирования А-регулятора

Синтез параметров А-регулятора сводится к расчёту коэффициентов α_0 , α_1 эталонной модели, коэффициента усиления K , входящих в выражение для закона управления (6), а также к выбору постоянной времени дифференцирующей цепи.

Зададим время желаемой переходной характеристики модернизируемой системы $t_p = 0,1$ с при значении перерегулирования $\sigma \leq 5\%$, что соответствует эксплуатационным параметрам качества системы прототипа, определённым по результатам её моделирования, приведенным на рисунке 2. В таком случае, если определить постоянную времени $\tau_p \approx t_p / 7$, приблизительно характеризующую динамику проектируемой системы, имеющей второй порядок, и декремент затухания ξ , то искомые параметры адаптивного регулятора (которые одновременно являются и параметрами эталонной модели) можно рассчитать по формулам

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau_p^2}, \alpha_1 = 2\xi \frac{1}{\tau_p}. \quad (7)$$

Величина декремента затухания $\xi = 0,707$ обеспечивает процесс переходной характеристики эталонной модели с минимальным перерегулированием $\sigma \leq 5\%$, а при $\xi \geq 1$ перерегулирование будет отсутствовать.

Выбирая $\xi = 0,707$ и учитывая заданное значение времени t_p желаемой переходной характеристики, по формулам (7) можно рассчитать искомые параметры, которые получили следующие значения: $\alpha_0 = 4900$, $\alpha_1 = 99$.

Коэффициент усиления А-регулятора, как следует из закона управления (6), определяется выражением

$$K = \lambda b_0,$$

где b_0 – коэффициент передачи объекта управления; λ – параметр, влияющий на процесс адаптации.

В работе [1] показано, что коэффициент усиления можно вычислить по формуле

$$K = \frac{7}{t_{pa} b_0}, \quad (8)$$

где t_{pa} – время процесса адаптации.

Для нормальной работы А-регулятора время процесса адаптации должно быть, по крайней мере, на порядок меньше времени переходной характеристики системы управления t_p . Принимая $t_{pa} = 0,1t_p$, а также учитывая (3) и (8), можно вычислить коэффициент усиления А-регулятора, который при заданном времени переходной характеристики $t_p = 0,1с$ принимает значение $K = 243$.

Время процесса адаптации также можно использовать для вычисления постоянной времени дифференцирующей цепи А-регулятора в соответствии с выражением

$$T_{da} \approx 0,1\tau_{pa},$$

где $\tau_{pa} = t_{pa} / 7$ – постоянная времени процесса адаптации.

Таким образом, для синтеза А-регулятора, придающего системе с непрерывным объектом (2) свойство робастности, достаточно задать только два показателя качества, характеризующих динамику проектируемой системы – t_p время переходной характеристики и ξ – параметр эталонной модели, который определяет желаемый процесс в системе с перерегулированием или без перерегулирования. При этом следует отметить, что при расчётах используется всего лишь один параметр, характеризующий объект управления, – коэффициент передачи b_0 , который можно определить после приведения модели объекта (1) к виду (2).

Результаты моделирования системы стабилизации ДПТ с А-регулятором при двух различных значениях постоянной времени якорной цепи T_a , различающихся на порядок, и при наличии возмущения (в виде момента нагрузки) представлены в виде графиков, изображённых на рисунке 4.

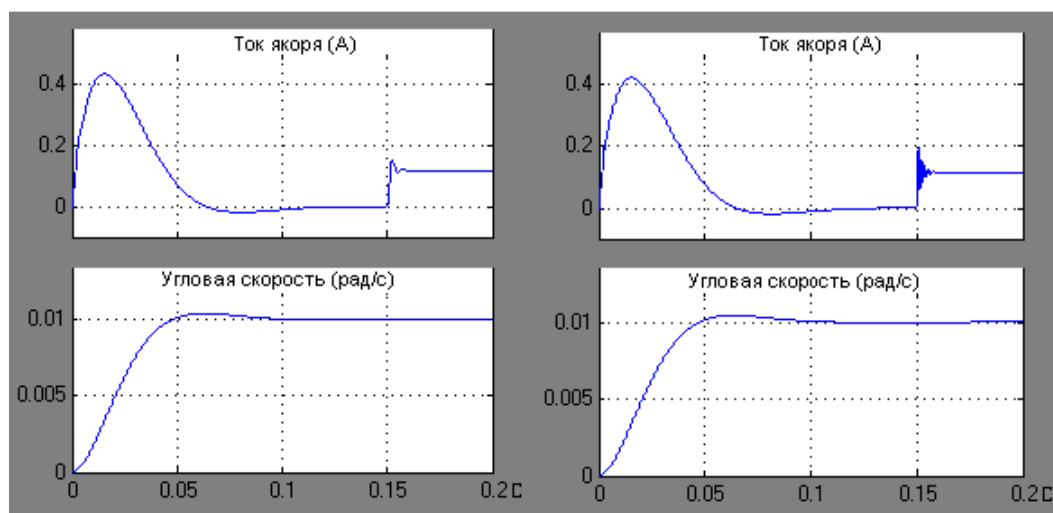


Рисунок 4 – Графики переходных характеристик системы с А-регулятором

На рисунке 4 слева изображены графики переходных процессов в системе с А-регулятором при $T_a = 0,043с$, а справа – при $T_a = 0,043с$. Из графиков следует, что время и перерегулирование у системы стабилизации скорости ДПТ в обоих экспериментах соответствуют желаемым показателям. При этом, в

отличие от прототипа, у модернизированной системы отсутствует статическая ошибка и отчётливо проявляется свойство робастности. Действительно, после десятикратного изменения параметра объекта управления график переходной характеристики по управляющему воздействию практически не изменился. Не наблюдается также явного влияния возмущающего воздействия (момента нагрузки), приложенного на управляемую переменную – угловую скорость. Однако, это влияние отчётливо заметно на графике зависимости тока якорной цепи от времени.

Таким образом, замена традиционного ПИД-регулятора новым А-регулятором, который по составу мало отличается от своего предшественника, приводит к существенным качественным изменениям в сторону улучшения динамических и статических характеристик системы стабилизации скорости ДПТ с независимым возбуждением.

В работе по существу предложен простой, но эффективный метод преобразования широкого класса систем управления электромеханическими объектами к робастным системам путём замены традиционных ПИД-регуляторов новыми, построенными на основе технологии аналитического проектирования адаптивных регуляторов [4].

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении обобщения полученных результатов для проектирования робастных систем автоматического управления с цифровыми адаптивными регуляторами.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Краснодубец Л.А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации / Л.А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108 — С. 5–9.
2. Пат. 26794 Україна, МПК G05B 11/36. Пристрій з адаптивними властивостями для автоматичного керування об'єктами різного призначення / Краснодубец Л.А., Крамарь В.О.; заявник и власник патенту Севастоп. нац. техн. ун-т. — № а 2010 07831; заяв. 22.06.2010.
3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
4. Краснодубец Л.А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации / Л.А. Краснодубец, В.А. Крамарь // Мехатроника, автоматизация, управление: матер. 3-й Российской мультиконференции по проблемам управления. 7-я научно-техническая конференция», г. С.-Пб., 12-14 окт. 2010 г. — СПб, 2010. — С. 251–254.

Поступила в редакцию 14.11.2011 г.

Краснодубец Л.А., Крамарь В.О., Балаканов Е.О. Застосування нових адаптивних регуляторів у системах стабілізації швидкості двигунів постійного струму

Досліджується можливість заміни традиційних ПІД-регуляторів новими адаптивними А-регуляторами. Доведено, що така заміна значною мірою покращує характеристики досліджуваної системи, перетворюючи її в робастність. За цією умови заміна регулятора виконується формально і практично без підстроювання. Бажані характеристики системи керування визначаються параметрами А-регулятора, розрахунок яких виконується без урахування динаміки об'єкта управління.

Ключові слова: автоматичне керування, стабілізація, адаптація, робастність, регулятор, перехідна характеристика.

Krasnodubets L.A., Kramar V.A., Balakanov E.O. Application of new adaptive controllers in the stabilization systems for the speed of DC motors

The possibility of replacing conventional PID-controllers for a new adaptive A-controllers is investigated. It is shown that this substitution provides greater improvements of the performance of the system making it robust. At the same time, the controller replacement is performed formally and practically without adjustment. Desirable characteristics of the control system are defined by the parameters A-controller, calculation of which is performed without regard to the dynamics of facility management.

Keywords: automatic control, stabilization, adaptation, robustness, the controller, the transient response.