

УДК 62-50

Л.А. Краснодубец, д-р техн. наук,

А.Е. Осадченко,

Э.О. Балаканов, аспирант

Севастопольский национальный технический университет,
ул. Университетская, д. 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: lakrasno@gmail.com

ПЕРЕОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННОГО ПИД - РЕГУЛЯТОРА АДАПТИВНЫМ А - РЕГУЛЯТОРОМ

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 процедура замены регулятора выполняется формально и не требует сложной настройки. Желаемые характеристики системы управления определяются параметрами А-регулятора, расчёт которых выполняется без учёта динамики объекта управления.

Ключевые слова: автоматическое управление, стабилизация, адаптация, робастность, регулятор, переходный процесс.

Введение. 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).

Пусть система стабилизации скорости ДПТ, подлежащая модернизации, представлена структурной схемой стенда, изображённой на рисунке 1.

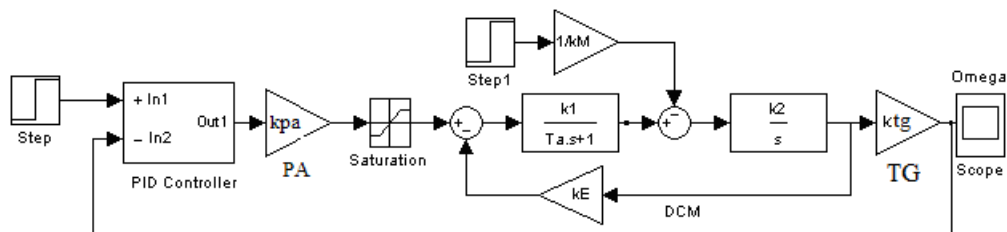


Рисунок 1 – Структурная схема стенда

В состав структурной схемы входят следующие блоки: PID-controller – ПИД-регулятор, PA – усилитель мощности с ограничением по выходу, предназначенный для управления током якорной цепи, DCM – объект управления (ДПТ), TG – тахогенератор.

Модель ДПТ построена по уравнениям, описывающим процессы в электрической машине постоянного тока, которые имеют следующий вид[3]:

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

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.

Поставим задачу повысить качество исследуемой системы управления при сохранении основных эксплуатационных характеристик (длительность переходного процесса и перерегулирование) 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

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

где ω – угловая скорость вращения вала ДПТ; u_a – напряжение в якорной цепи;

$$a_0 = \frac{k_1 k_2 k_E}{T_a}; a_1 = \frac{1}{T_a}; b_0 = \frac{k_1 k_2}{T_a}; k_1 = \frac{1}{R_a}; k_2 = \frac{k_M}{J}. \tag{3}$$

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

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

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

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

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

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

где $\lambda = const$ – параметр, характеризующий скорость приближения к экстремуму (минимуму) целевой функции (5) и, следовательно, влияющий на качество процесса адаптации. По выражению для закона управления (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} .

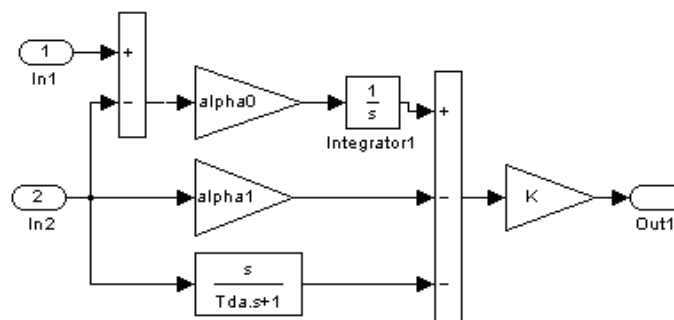


Рисунок 2 – Структурная схема моделирования А- регулятора

Синтез параметров А-регулятора сводится к расчёту коэффициентов α_0, α_1 эталонной модели, коэффициента усиления $K = \lambda b_0$, входящих в выражение для закона управления (6), а также к выбору постоянной времени дифференцирующей цепи.

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 длительность переходного процесса 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).

На основе построенной структуры, соответствующей закону управления (6), и результатов синтеза, выполненного в соответствии с методикой, приведенной в [1], разработана виртуальная модель А-регулятора в программной среде для аналогового и цифрового моделирования цепей Micro - Cap 9, схема которой приведена рисунке 3.

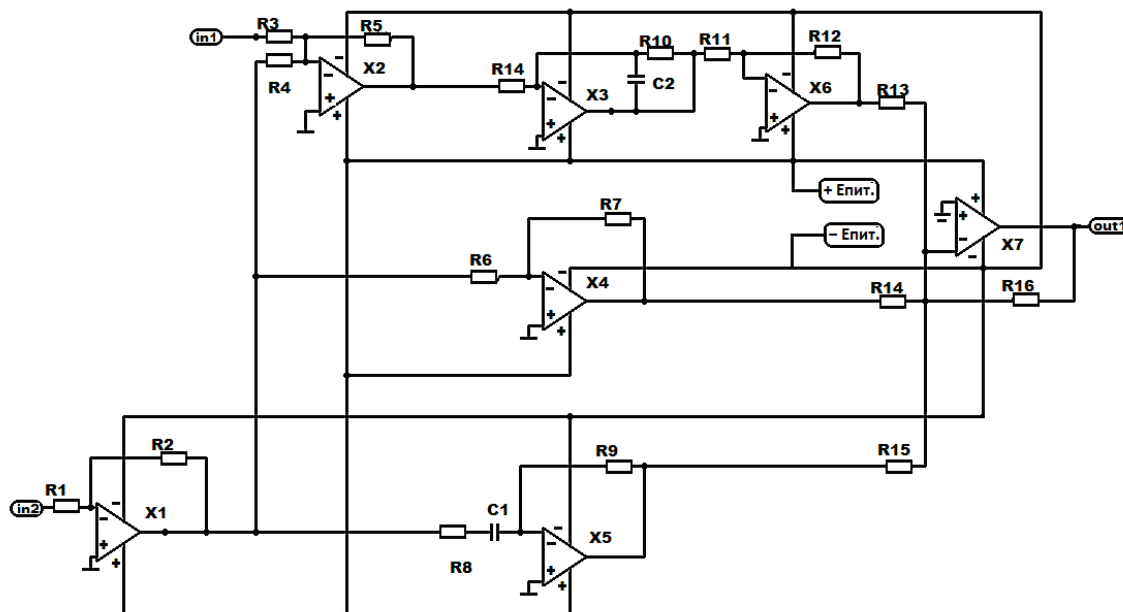


Рисунок 3 – Схема принципиальная электрическая виртуальной модели А-регулятора, построенная в среде Micro - Cap 9

Номинальные значения элементов принципиальной схемы, изображенной на рисунке 3, найдены из соотношений

$$\alpha_0 = \frac{R_{12}}{R_{11}}; \quad \alpha_1 = \frac{R_7}{R_6}; \quad K = \frac{R_{16}}{R_{15}}; \quad T_{da} = R_8 C_1.$$

Моделирование в среде Micro - Cap 9 показало совпадение динамических характеристик разработанной виртуальной модели с аналогичными характеристиками А-регулятора, полученными при помощи математической модели, приведенной на рисунке 2, в процессе моделирования в среде Simulink пакета MATLAB.

На следующем этапе для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макетный образец А-регулятора и стенд для изучения его функционирования в составе замкнутой системы управления скоростью электродвигателя постоянного тока фирмы Lenze (тип 13.120.45).

В комплект стенда были включены: усилитель мощности на основе микросхемы APЕХ PA 93, лабораторный блок электропитания, генератор входных тестовых сигналов, управляемый тормоз, закрепленный на валу электродвигателя и предназначенный для внесения в систему возмущения в виде момента нагрузки а также цифровой осциллограф Tektronix TDS 1001В. Конструкция исследовательского стенда допускает замену А-регулятора стандартным ПИД-регулятором, а также замену объекта управления – ДПТ аналогичным устройством, но с существенно отличающимися характеристиками (фирма VEB Elektromotorenwerk, тип RSM 80/50).

В стенде использовался ПИД-регулятор производства фирмы Festo, причем его параметры были выбраны такими, чтобы обеспечить длительность переходного процесса системы управления – 0,1 с и значение перерегулирования не более 5 %.

Параметры обоих двигателей найдены по справочным данным и получили следующие значения для ДПТ (Lenze):

$$k_1 = 0,0365 / \text{Ом}, \quad k_2 = 3951 / \text{Амс}^2, \quad k_M = 0,407 \text{ Нм} / \text{А}, \quad k_E = 0,498 \text{ Вс}, \quad T_a = 0,0019 \text{ с}.$$

Для ДПТ (VEB):

$$k_1 = 0,0222 / \text{Ом}, \quad k_2 = 5555 / \text{Амс}^2, \quad k_M = 1,667 \text{ Нм} / \text{А}, \quad k_E = 0,0645 \text{ Вс}, \quad T_a = 0,000667 \text{ с}.$$

При указанных параметрах коэффициенты в уравнении (2) получили следующие значения для ДПТ (Lenze):

$$a_0 = 37837; a_1 = 526,9; b_0 = 75985. \quad (7)$$

Для ДПТ (VEB):

$$a_0 = 11937; a_1 = 1500; b_0 = 185190. \quad (8)$$

Коэффициенты передачи тахогенераторов TG, установленных на валах ДПТ фирмы Lenze и VEB, имеют значения соответственно:

$$ktg_L = 0,064 \text{ рад/сВ} \text{ и } ktg_V = 0,0955 \text{ рад/сВ}. \quad (9)$$

Коэффициент передачи усилителя РА для всех случаев имеет значение $kpa = 10$.

Задачу синтеза параметров адаптивного регулятора решим следующим образом.

Пусть время желаемой длительности переходного процесса системы стабилизации ДПТ с А-регулятором соответствует экспериментально определенной длительности переходного процесса t_p этой же системы, но с ПИД-регулятором и составляет $t_p = 0,1 \text{ с}$ при значении перерегулирования $\sigma \leq 5\%$. В таком случае, если определить постоянную времени $\tau_p \approx t_p / 7$, приблизительно характеризующую динамику проектируемой системы, имеющей второй порядок, и декремент затухания $\xi = 0,707$, что соответствует желаемому перерегулированию $\sigma \leq 5\%$, то искомые параметры адаптивного регулятора (которые одновременно являются и параметрами эталонной модели) можно рассчитать по формулам [1]

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau_p^2} = 4900, \quad \alpha_1 = 2\xi \frac{1}{\tau_p} = 99. \quad (10)$$

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 K можно вычислить по формуле

$$K = \frac{7}{t_{pa} b_0},$$

где t_{pa} – время процесса адаптации.

Для нормальной работы А-регулятора время процесса адаптации должно быть меньше длительности переходного процесса системы управления t_p . Принимая $t_{pa} = 0,1 t_p$, а также учитывая (7), (8) и (9), коэффициенты усиления А-регулятора при заданной длительности переходного процесса $t_p = 0,1 \text{ с}$ принимают значение $K = 0,01439$ для ДПТ фирмы Lenze и $K = 0,00396$ для ДПТ фирмы VEB Elektromotorenwerk.

Для вычисления постоянной времени дифференцирующей цепи А-регулятора воспользуемся формулой

$$T_{da} \approx 0,1 \tau_{pa} = 0,0014 \text{ с},$$

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

Полученные в результате синтеза значения параметров $\alpha_0, \alpha_1, K, T_{da}$ были использованы для расчета элементов $R_6, R_7, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{15}, R_{16}, C_1$ макета А-регулятора.

Исследование работы А-регулятора в составе системы стабилизации проводилось в два этапа. На первом этапе использовался ДПТ фирмы Lenze и регистрировался переходный процесс при подаче на вход А-регулятора входного воздействия в виде перепада напряжения с крутым фронтом. Аналогичный эксперимент проводился с установленным ПИД-регулятором. При этом управляемый тормоз на валу двигателя не использовался.

На рисунке 4 слева изображены графики переходных процессов в системе стабилизации скорости ДПТ Lenze с А-регулятором, а справа — с ПИД-регулятором. Из графиков следует, что длительность переходного процесса и перерегулирование у системы стабилизации скорости ДПТ с синтезированным

А-регулятором соответствуют аналогичным показателям качества системы с ПИД-регулятором, которую можно рассматривать как предмет переоборудования.

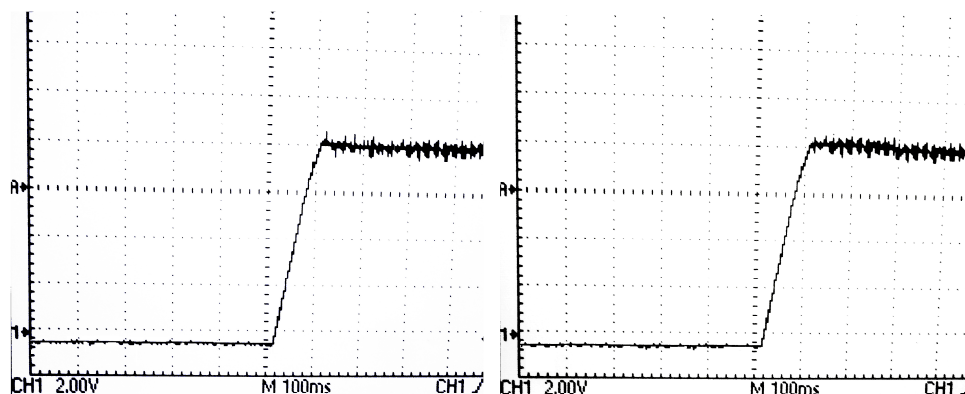


Рисунок 4 – Осциллограммы переходных процессов в системе стабилизации с А-регулятором и ПИД-регулятором

Сравнение переходных процессов по управляющему воздействию, полученных в обоих экспериментах, показало их хорошее совпадение. Таким образом, экспериментально показано, что при помощи достаточно простой процедуры синтеза параметров А-регулятора, обеспечивающих заданные показатели качества переходного процесса, которые, например, соответствует некоторой системе аналогичного типа с ПИД-регулятором, можно выполнить замену последнего А-регулятором при сохранении динамических свойств управляемой системы.

Исследование переходных процессов по возмущающему воздействию в исходной (с ПИД-регулятором) и в переоборудованной системе, как показано на рисунке 5, позволило заключить, что замена традиционного регулятора адаптивным привела к устранению статической ошибки в замкнутой системе стабилизации. При этом возмущающее воздействие формировалось путем изменения момента нагрузки при помощи регулируемого тормоза, установленного на валу ДПТ фирмы Lenze.

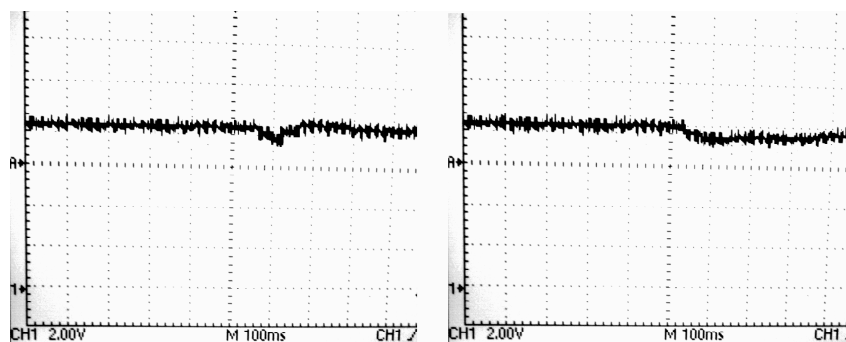


Рисунок 5 – Осциллограммы реакций на возмущающее воздействие системы стабилизации ДПТ с А-регулятором и ПИД-регулятором

На втором этапе исследовались робастные свойства системы стабилизации скорости ДПТ с А-регулятором. При этом наблюдались переходные процессы в адаптивной системе до, и после замены объекта управления. На рисунке 6 изображены графики переходных процессов в системе с А-регулятором для двух различных ДПТ, выступающих в роли объектов управления. Справа график переходного процесса для двигателя фирмы Lenze (тип 13.120.45), слева для двигателя фирмы VEB Elektromotorenwerk (тип RSM 80/50). Параметры А-регулятора α_0 и α_1 , вычисленные по формулам (10), оставались неизменными в обоих экспериментах, а изменялся только коэффициент усиления K .

Сравнение показывает, что переходные процессы мало отличаются, несмотря на существенные отличия параметров ДПТ.

Таким образом, замена традиционного ПИД-регулятора новым А-регулятором, который по составу мало отличается от своего предшественника, приводит к качественным изменениям в сторону улучшения динамических и статических характеристик системы стабилизации скорости ДПТ, а также позволяет упростить настройку параметров регулятора при изменении параметров ДПТ или полной его замены.

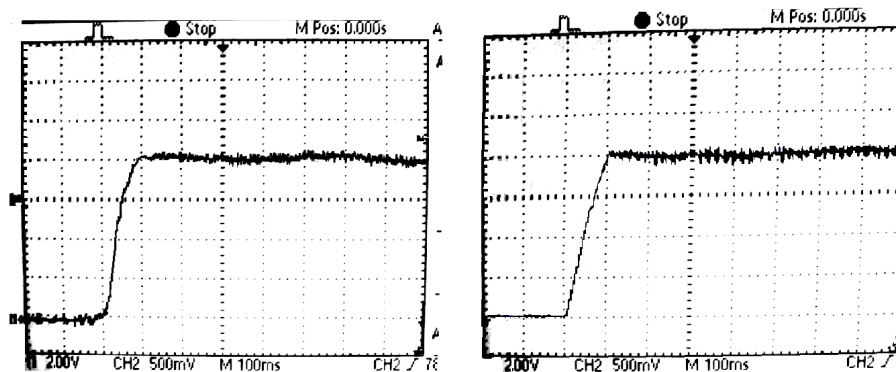


Рисунок 6 – Осцилограмми переходних процесів систем с А - регулятором для різних ДПТ

В работе предложен простой, но эффективный метод преобразования широкого класса систем управления электромеханическими объектами к робастным системам путём замены традиционных регуляторов новыми, построенными на основе технологии аналитического проектирования адаптивных регуляторов[2].

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. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь: СевНТУ, 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.А.; заявник и власник патенту Севастопольський національний технічний університет. — № 2010 07831; заяв. 22.06.2010; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. — С. 3–4.
3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.

Поступила в редакцію 11.04.2013 г.

Краснодубец Л.А., Осадченко О.Є., Балаканов Е.О. Переобладнання системи стабілізації швидкості двигуна постійного струму на основі заміни традиційного ПІД-регулятора адаптивним А-регулятором

Досліджується можливість заміни традиційних ПІД-регуляторів новими адаптивними А-регуляторами. Показано, що така заміна в значній мірі покращує характеристики досліджуваної системи, перетворюючи її на робастну. При цьому процедура заміни регулятора виконується формально і не вимагає складної настройки. Бажані характеристики системи управління визначаються параметрами А-регулятора, розрахунок яких виконується без урахування динаміки об'єкта управління.

Ключові слова: автоматичне керування, стабілізація, адаптація, робастність, регулятор, перехідний процес.

Krasnodubets L.A., Osadchenko A.E., Balakanov E.O. Retooling system stabilization speed of DC motor based on replace traditional PID - adaptive control A - controller

The possibility of replacing the traditional PID - controller A new adaptive – regulators. It is shown that such a change greatly improves the performance of the system, making it robust. In this case, the procedure for replacing the regulator formally executed and does not require any complicated settings. Desired characteristics of the control system are defined by parameters A-control, the calculation of which is done without consideration of the dynamics of the object management.

Keywords: automatic control, stabilization, adaptation, robustness, regulator, transient process.