

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, С.И. Кысса

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: Bobrikov1932@gmail.com

Проведен синтез регулятора для объекта, параметры которого – коэффициент усиления и постоянная времени, могут изменяться в широких пределах. Заданная часть системы включает в себя исполнительный механизм (звено первого порядка) с неизменяющимися параметрами и двигатель – звено второго порядка с изменяющимися параметрами. Регулятор обеспечивает постоянство показателей качества системы при любых значениях переменных параметров объекта в заданном диапазоне их значений. В качестве показателей процесса приняты максимальное перерегулирование в переходной характеристике и время переходного процесса. Разработана структурная схема регулятора и метод расчета его параметров. Работа выполнена путём моделирования системы в пакете MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: регулятор, система управления, передаточные функции, моделирование, переходная характеристика, показатели качества управления, объект управления, исполнительный механизм, усилитель, обратная связь, адаптивная система

Введение

Известны системы управления объектами, в которых параметры могут изменяться в широких пределах (нестационарные объекты), например, крупнотоннажные морские суда (с грузом и без груза), управляемая ракета и др. Для обеспечения высоких показателей качества процесса управления при построении подобных систем используют методы адаптивного управления, что приводит, как правило, к существенному усложнению управляющего устройства [1-5]. В данной работе рассматривается система управления нестационарным объектом, построенная без использования методов, свойственных адаптивным системам, и, вместе с тем, позволяющая получить требуемые показатели качества управления при условии, что параметры объекта управления изменяются в широких пределах (1÷10).

Цель работы

Целью работы является моделирование и синтез управляющего устройства для нестационарного объекта без использования методов адаптивного управления. Устройство обеспечивает заданные показатели качества в пределах заданного диапазона изменения параметров объекта. В качестве показателей принято минимальное перерегулирование при заданной верхней границе времени переходного процесса.

Обобщенная структурная схема разрабатываемой системы показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: $K_{yy}(p)$ – передаточная функция управляющего устройства, $K_{ym}(p)$ – передаточная функция усилителя мощности (исполнительного

устройства), $K_{oy}(p)$ – передаточная функция объекта управления. Полагаем, что заданная часть системы (исполнительное устройство и объект управления) описываются следующими передаточными функциями:

$$K_{ym}(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad K_{oy}(p) = \frac{K_2}{(T_2 p + 1)p},$$

где K_1, T_1, K_2, T_2 - параметры.

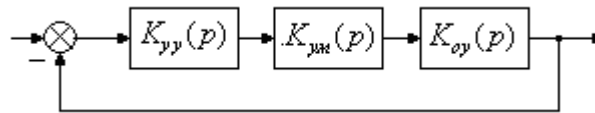


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления

Принимаем условие, что параметры объекта K_2 и T_2 в процессе работы системы могут изменяться в заданных пределах.

Разрабатываемое управляющее устройство должно обеспечить работу системы с заданными показателями качества при любых возможных значениях параметров объекта.

Основная часть

Структурная схема системы с управляющим устройством, обеспечивающим независимость принятых показателей качества от параметров объекта, изменяющихся в заданных пределах ($K_{2\min} \leq K_2 \leq K_{2\max}$, $T_{2\min} \leq T_2 \leq T_{2\max}$), приведена на рис. 2.

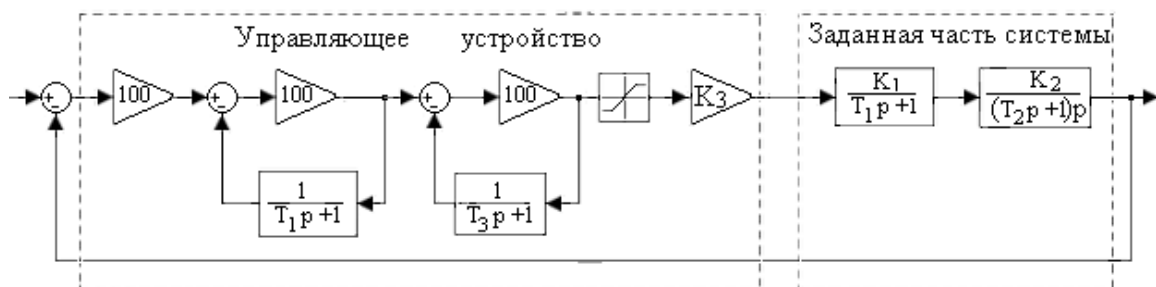


Рис. 2. Структурная схема разрабатываемой системы

Особенностью управляющего устройства в системе (рис. 2) является наличие двух усилителей, каждый из которых охвачен обратной связью через апериодическое звено первого порядка. Управляющее устройство содержит также нелинейное звено типа «насыщение». Величину насыщения примем равной ± 1 , а коэффициент усиления в линейной части характеристики примем равным 1.

Определим передаточную функцию усилителя, охваченного отрицательной обратной связью через апериодическое звено (рис. 3):

$$K(p) = \frac{K}{1 + \frac{K}{Tp+1}} = \frac{K(Tp+1)}{Tp+1+K} = \frac{K(Tp+1)}{(1+K)\left(\frac{T}{1+K}p+1\right)}.$$

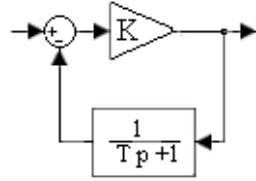


Рис. 3. Структурная схема усилителя с обратной связью через апериодическое звено

Приняв условие, что $K=100$, получим:

$$K(p) = \frac{0.99(Tp+1)}{0.0099Tp+1} \approx \frac{Tp+1}{0.01Tp+1}. \quad (1)$$

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы (рис. 2), учитывая (1) и рассматривая нелинейное звено как пропорциональное с коэффициентом 1:

$$\begin{aligned} K(p) &= \frac{100(T_1p+1)(T_3p+1)K_3K_1K_2}{(0.01T_1p+1)(0.01T_3p+1)(T_1p+1)(T_2p+1)p} = \\ &= \frac{100K_c(T_3p+1)}{(0.01T_1p+1)(0.01T_3p+1)(T_2p+1)p}. \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_c = K_1K_2K_3$.

Передаточная функция замкнутой системы (без учёта насыщения в нелинейном звене) равна:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{100K_c(T_3p+1)}{(0.01T_1p+1)(0.01T_3p+1)(T_2p+1)p + 100K_c(T_3p+1)} = \\ &= \frac{100K_c(T_3p+1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 10^{-4}T_1T_3T_2; \quad a_1 = 10^{-4}T_1T_3 + 0.01T_2(T_1 + T_3); \quad a_2 = 0.01(T_1 + T_3) + T_2; \\ a_3 &= 1 + 100K_cT_3; \quad a_4 = 100K_c. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим некоторые особенности рассматриваемой системы. Управляющее устройство представляет собой два реальных дифференцирующих звена, усилитель и нелинейное звено типа насыщение, включенных последовательно. Постоянная времени дифференцирования первого звена выбирается равной постоянной времени усилителя в заданной части системы. Полагаем, что этот параметр известен и не меняется в процессе работы системы. Постоянная времени дифференцирования

второго звена T_3 определяется диапазоном возможных значений параметров объекта управления T_2 и K_2 . Вопрос о выборе её величины рассмотрен далее.

Наличие в управляющем устройстве двух дифференцирующих звеньев, включенных последовательно, приводит к тому, что при ступенчатом входном воздействии на выходе этих звеньев сигнал может принимать очень большую величину, что в последующих звеньях не может быть реализовано. Для подтверждения этого определим начальное значение сигнала на выходе регулятора при ступенчатом единичном входном сигнале.

Передаточная функция цепи, состоящей из двух дифференцирующих звеньев и линейного усилителя с коэффициентом 100, включенных последовательно (рис. 2) равна:

$$K_1(p) = \frac{100(T_1p + 1)(T_3p + 1)}{(0.01T_1p + 1)(0.01T_3p + 1)} = \frac{Y_{yy}(p)}{G(p)},$$

где $Y_{yy}(p)$ – изображение сигнала на выходе управляющего устройства, $G(p)$ – изображение входного сигнала.

Пусть входной сигнал – единичное ступенчатое воздействие, тогда $G(p) = \frac{1}{p}$.

При этом

$$Y_{yy}(p) = \frac{100(T_1p + 1)(T_3p + 1)}{p(0.01T_1p + 1)(0.01T_3p + 1)}.$$

Начальное значение сигнала на выходе управляющего устройства определим, используя теорему о связи между значениями изображения и оригинала при $t = 0$ [8]:

$$y_{yy}(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} pY_{yy}(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{100(T_1p + 1)(T_3p + 1)}{(0.01T_1p + 1)(0.01T_3p + 1)} = 10^6.$$

Никакое реальное линейное звено, стоящее за управляющим устройством с такой передаточной функцией, отреагировать адекватно на ступенчатый входной сигнал не может. Поэтому после дифференцирующих звеньев включен нелинейный элемент типа «насыщение». Принято условие, что в линейной части характеристики этого звена коэффициент усиления равен 1, а максимальное значение на выходе равно 1.

Принимаем условие, что регулятор должен обеспечить заданные динамические свойства системы при условии, что параметры объекта в процессе нормальной работы системы могут изменяться в заданных интервалах: $K_{2\min} \leq K_2 \leq K_{2\max}$, $T_{2\min} \leq T_2 \leq T_{2\max}$.

В качестве заданных динамических свойств принимаем минимальное перерегулирование в переходной характеристике ($\sigma_{\max} \leq 5\%$), и время регулирования $t_p \leq T_{2\max}$. Время регулирования определим, как интервал времени от начала подачи на вход системы единичного ступенчатого сигнала до момента, после которого ошибка управления не превышает 1%.

Расчетными параметрами регулятора являются T_3 и K_3 . Для определения зависимости показателей качества от параметров регулятора и заданной части системы были проведены исследования системы путём моделирования в пакете

MATLAB-Simulink [10]. Схема набора модели приведена на рис. 4. По результатам моделирования построены графики, приведенные на рис. 5. Для удобства пользования графиками масштабы величины T_{0min} (ось абсцисс) различны: на рис. 5, а – $0 < T_{0min} \leq 1$, на рис. 5, б – $0 < T_{0min} \leq 15$. По оси ординат отложены значения T_3 , соответствующие минимуму перерегулирования и времени переходного процесса $t_p \leq T_{2max}$. Графики построены для случая, когда коэффициент системы $K_c = 1$, а коэффициент усиления объекта имеет наименьшее значение.

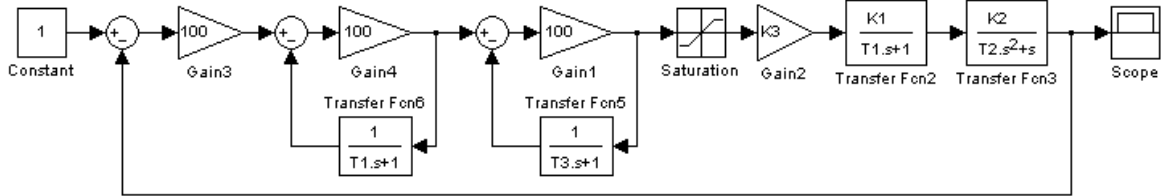


Рис. 4. Схема набора модели в системе Simulink

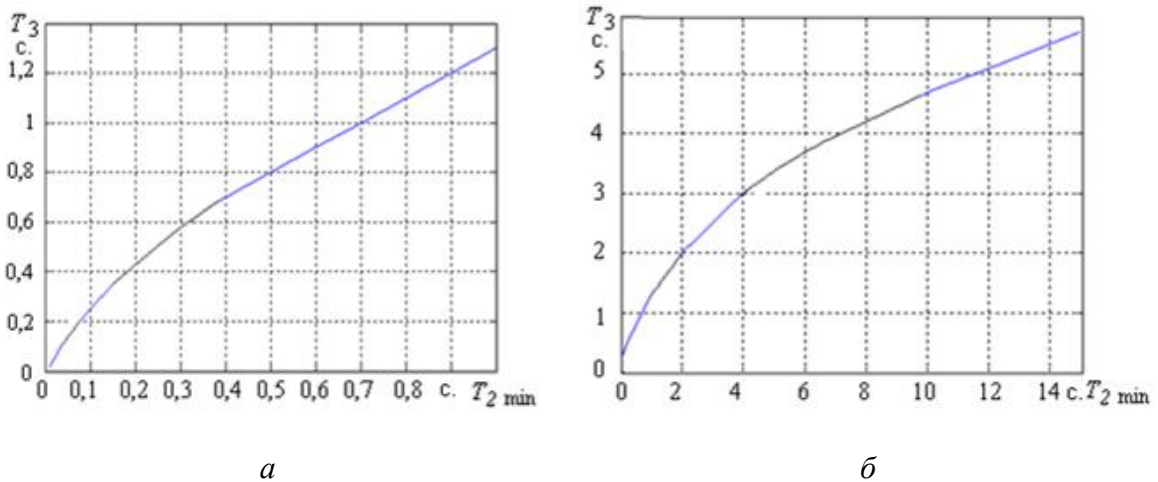


Рис. 5. Зависимость T_3 от минимального значения постоянной времени объекта управления T_{2min} : а – в диапазоне $0 < T_{0min} \leq 1$; б – в диапазоне $0 < T_{0min} \leq 15$

Принимаем, что коэффициент усиления системы K_c равен:

$$K_c = K_1 K_{2min} K_3 = 1. \quad (4)$$

Как показали экспериментальные исследования, увеличение коэффициента усиления, а также постоянной времени объекта в 10 раз практически не влияет на величины принятых показателей качества ($\sigma_{max} \leq 5\%$, $t_p \leq T_{2max}$).

Определим условие устойчивости замкнутой системы (рис. 2), полагая, что насыщение в нелинейном элементе отсутствует. При этом коэффициент усиления нелинейного звена равен 1. При увеличении амплитуды входного сигнала выше зоны насыщения коэффициент усиления звена будет уменьшаться, следовательно, коэффициент усиления нелинейного звена, равный 1, есть его наибольшее значение а, значит, для устойчивости условия наихудшие.

Для исследования системы на устойчивость воспользуемся критерием устойчивости Гурвица. В соответствии с критерием условия устойчивости определяются следующими неравенствами:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0. \quad (5)$$

Подставив значения коэффициентов уравнения (3) в неравенства (5) находим условие устойчивости для коэффициента усиления системы K_c :

$$K_c < \frac{(T_1 + T_3)[10^{-4}T_1T_3 + T_2(0,01(T_1 + T_3) + T_2)]}{T_3^2T_2T_1}.$$

Для оценки предельного значения коэффициента K_c можно пользоваться упрощенным выражением:

$$K_c < K_{кр} \approx \frac{(T_1 + T_3)T_2}{T_3^2T_1}, \quad (6)$$

где $K_{кр}$ – критическое значение коэффициента, соответствующее границе устойчивости.

Расчет управляющего устройства проводим в такой последовательности. Пусть заданы следующие величины: параметры усилителя мощности – K_1, T_1 , и параметры объекта управления – $K_{2\min} \leq K_2 \leq K_{2\max}, T_{2\min} \leq T_2 \leq T_{2\max}$. Полагаем, что $K_{2\max} \leq 10K_{2\min}$ и $T_{2\max} \leq 10T_{2\min}$. По кривым рис. 3 для заданной величины $T_{2\min}$ находим соответствующее значение T_3 . Затем определяем величину коэффициента K_3 из условия (4): $K_3 = \frac{1}{K_1K_{2\min}}$.

По формуле (6) проверяем критическое значение коэффициента усиления системы $K_{кр}$. Так как графики рис. 5 построены для значения $K_c = 1$, очевидно, что для обеспечения запаса устойчивости должно выполняться условие $K_{кр} > 1$.

Примеры.

1. Заданная часть системы.

Коэффициент усиления и постоянная времени исполнительного устройства: $K_1 = 10, T_1 = 0.02$ с.

Коэффициент усиления и постоянная времени объекта управления: $K_2 = 0.2 - 2, T_2 = (0.15 - 1.5)$ с.

По графику рис. 5, а для $T_{2\min} = 0.15$ находим T_3 : $T_3 = 0.35$. Из условия (6) находим K_3 :

$$K_3 = \frac{1}{K_1K_{2\min}} = \frac{1}{10 \times 0.2} = 0.5.$$

Определяем критическое значение коэффициента усиления (6):

$$K_{кр} \approx \frac{(0.02 + 0.35)0.15}{0.35^2 \cdot 0.02} = 22.6 > 1.$$

Условие устойчивости выполнено.

На рис. 6 приведены результаты моделирования системы с параметрами по примеру 1.

2. В качестве объекта управления рассмотрим большегрузное морское судно. Как показано в [6] передаточная функция судна в системе управления курсом движения имеет вид:

$$K_2(p) = \frac{K_2}{(T_2 p + 1)p}.$$

Передаточная функция усилителя мощности (гидравлическая рулевая машина) равна

$$K_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}.$$

Одним из возможных вариантов значений параметров передаточных функций судна и рулевой машины указаны в [6,7]: $K_2=0.012$ и $T_2=150$ с. (судно с полным грузом) и $K_2=0.12$, $T_2=15$ с. (движение судна порожняком). Параметры передаточной функции рулевой машины равны: $K_1=1$, $T_1=3$ с.

Определим параметры авторулевого, выполненного по схеме рис. 2.

По графику рис. 5 для $T_{2\min}=15$ с находим: $T_3=5.8$ с. Коэффициент усиления K_3 равен (4):

$$K_3 = \frac{1}{0.012} = 83.$$

Определяем условия устойчивости (6):

$$K_{kp} \approx \frac{(3+5.8)15}{5.8^2 \cdot 3} = 1.3$$

– условие устойчивости выполнено.

На рис. 7 приведены результаты моделирования системы по примеру 2.

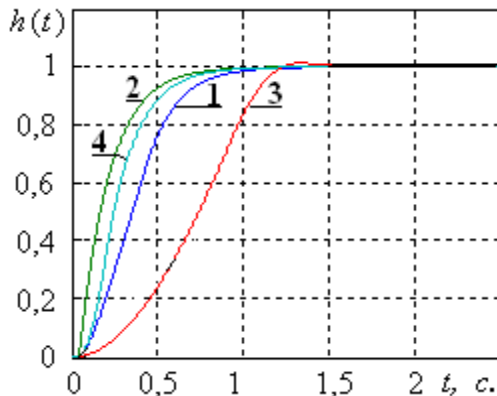


Рис. 6. Переходные характеристики по примеру 1: 1 – $T_2 = 0.15$ с, $K_2 = 0.2$; 2 – $T_2 = 0.15$ с, $K_2 = 2$; 3 – $T_2 = 1.5$ с, $K_2 = 0.2$; 4 – $T_2 = 1.5$ с, $K_2 = 2$

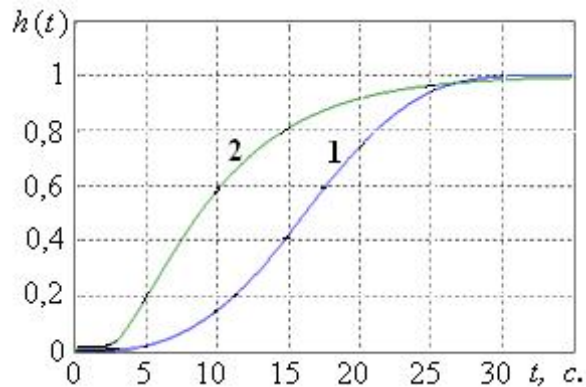


Рис. 7. Переходные характеристики по примеру 2: 1 – $K_2 = 0.012$, $T_2 = 150$ с; 2 – $K_2 = 0.12$, $T_2 = 15$ с

Выводы

Разработана структурная схема регулятора для системы управления, заданная часть которой состоит из исполнительного устройства с неизменяющимися параметрами и объекта управления, параметры которого (постоянная времени и коэффициент усиления) могут изменяться в процессе работы системы в пределах от 1 до 10. При этом показатели качества процесса управления остаются неизменными. В качестве показателей приняты: максимальное перерегулирование в переходной характеристике и время переходного процесса. Разработана структурная схема и метод расчета параметров регулятора. Проведено моделирование системы в пакете MATLAB-Simulink. Разработанный метод расчета подтвержден двумя примерами.

Список литературы

1. Ядыкин, И.Б. Оптимальное адаптивное управление на основе беспоисковой самонастраивающейся системы с обучаемой эталонной моделью / И.Б. Ядыкин // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 2. – С. 65-79.
2. Уткин, В.А. Задача слежения в линейных системах с параметрическими неопределенностями при неустойчивой нулевой динамике / В.А. Уткин, А.В. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 9. – С. 45-64.
3. Рутковский, В.Ю. Стабилизация упругих колебаний конструкции крупногабаритных спутников с переменными параметрами методами адаптации / В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 12. – С. 91-103.
4. Земляков, С.Д. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – С. 35-44.
5. Глумов, В.Ю. Адаптивное управление ориентацией деформируемых космических аппаратов с изменяющимися параметрами / В.М. Глумов, В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 4. – С. 90-102.
6. Кринецкий, И.И. Исследование автоматического управления курсом судна с учетом нелинейных характеристик системы / И.И. Кринецкий, Е.Д. Пичугин // Судовождение и связь. Труды ЦНИИ морского флота. – 1967. – № 83. – С. 13-16.
7. Бобриков, С.А. Коррекция нелинейной характеристики рулевой машины с учетом запаздывания в системе управления курсом морского судна / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // Электротехнические и комплексные системы. – 2011. – № 02 (78). – С. 26-29.
8. Батоврин, А.А. Цифровые следящие системы судовой автоматики / А.А. Батоврин, П.Г. Дашевский, В.Д. Лебедев и др. – Л.: Судостроение, 1972. – 445 с.
9. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 719с.
10. Краснопрошина, А.А. Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, ControlSistem / А.А. Краснопрошина, Н.Б. Репникова, А.А. Ильченко. – К: Корнійчук, 1999. – 141 с.

СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБ'ЄКТА ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

С.О. Бобриков, Е.Д. Пичугин, С.І. Кысса

Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченко, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

Проведено синтез регулятора для об'єкта, параметри якого – коефіцієнт посилення і постійна часу, можуть змінюватися в широких межах. Задана частина системи включає в себе виконавчий пристрій (ланка першого порядку) з параметрами, які не змінюються, і двигун – ланка другого порядку зі змінними параметрами. Регулятор забезпечує сталість показників якості системи при будь-яких значеннях змінних параметрів об'єкта в заданому діапазоні їх значень. Як показники процесу прийняті максимальне перерегулювання в перехідній характеристиці і час перехідного процесу. Розроблено структурну схему регулятора і метод розрахунку його параметрів. Робота виконана шляхом моделювання системи в пакеті MATLAB-Simulink.

Ключові слова: регулятор, система управління, передавальні функції, моделювання, перехідна характеристика, показники якості управління, об'єкт управління, виконавчий механізм, підсилювач, зворотний зв'язок, адаптивна система

SYNTHESIS AND MODELING OF THE REGULATOR FOR THE OBJECT WITH CHANGING PARAMETERS

S.A. Bobrykov, E.D. Pichugin, S.I. Kissa

Odesa National Polytechnic University,
1 Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

Has been done synthesis of controller for object, with parameters – gain and time constant which can vary over a wide range. The predetermined portion of the system includes an actuator (first-order unit) with unchanging parameters and an engine-second-order link with varying parameters. The controller ensures the consistency of the system's quality indicators for any values of the object's variables in a given range of values. As indicators of the process, the maximum overshoot in the transient response and the transient time are taken. Have been developed a structural diagram of the regulator and a method for calculating its parameters. The work was done by modeling the system in the MATLAB-Simulink package.

Keywords: regulator, control system, transfer functions, simulation, transient response, control quality indicators, control object, actuator, amplifier, feedback, adaptive system