

**СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ****С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, М.В. Сависько, В.И. Тимохин**Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: bobrikov1932@gmail.com

Проведен синтез системы управления нестационарным объектом, в котором есть звено с транспортным запаздыванием. Заданная часть системы представляется двумя звеньями: усилитель мощности – звено первого порядка с неизменяющимися параметрами, и объект управления – последовательно включенные звено первого порядка и интегратор. Принято условие: постоянная времени объекта может изменяться в процессе нормального режима работы системы в пределах 1:10, коэффициент усиления объекта может изменяться в пределах 1:2. При этом показатели качества управления – максимальное перерегулирование в переходной характеристике и время переходного процесса остаются практически постоянными при любых значениях параметров объекта в заданных интервалах. В структурной схеме управляющего устройства использовано два дифференцирующих звена и нелинейное звено типа «насыщение». Экспериментальным путем найдены соотношения между запаздыванием, коэффициентом усиления системы и параметрами объекта, обеспечивающие постоянство показателей качества управления при изменении параметров объекта в заданных пределах. Приведен график зависимости максимальной величины коэффициента усиления системы от величины запаздывания. Выполнен анализ устойчивости системы при любых значениях параметров объекта в указанных пределах. Для определения запаса устойчивости системы по фазе приведена программа для расчета запаса устойчивости в системе MATLAB. Приведены примеры расчета управляющего устройства при заданных параметрах неизменяемой части системы и предельно допустимых значениях изменяемых параметров объекта управления.

Ключевые слова: моделирование, система управления, передаточная функция, запаздывание, переходная характеристика, показатели качества управления, объект управления, исполнительное устройство, насыщение, устойчивость, запас устойчивости по фазе.

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 работах [6-9] рассмотрены системы управления нестационарными объектами, построенные без использования методов, свойственных адаптивным системам и, вместе с тем, позволяющие получить требуемые показатели качества управления при условии, что параметры объекта управления изменяются в широких пределах. Особенностью регуляторов, рассмотренных в указанных работах, является использование дифференцирующих звеньев, которые частично компенсируют постоянные времени в звеньях заданной части системы, и нелинейного звена типа «насыщение», которое гасит пики напряжений на выходе регулятора, вызванные дифференцирующими звеньями.

Цель работы

Целью работы является синтез и моделирование системы управления объектом с изменяющимися параметрами при наличии в системе управления звена с запаздыванием.

В данной работе используется тот же принцип построения управляющего устройства, как и в работах [7-9], но с учетом запаздывания. Устройство обеспечивает заданные показатели качества в пределах заданного диапазона изменения параметров объекта. В качестве показателей принято минимальное перерегулирование в переходной характеристике при заданной верхней границе времени переходного процесса.

Обобщенная структурная схема разрабатываемой системы показана на рисунке 1, где приняты следующие обозначения: $K_{уу}(p)$ – передаточная функция управляющего устройства, $K_{ум}(p)$ – передаточная функция усилителя мощности (исполнительного механизма), $K_{оу}(p)$ – передаточная функция объекта управления. Полагаем, что заданная часть системы (исполнительное устройство и объект управления) описываются следующими передаточными функциями:

$$K_{ум}(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad K_{оу}(p) = \frac{K_2 e^{-p\tau}}{(T_2 p + 1)p}.$$

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

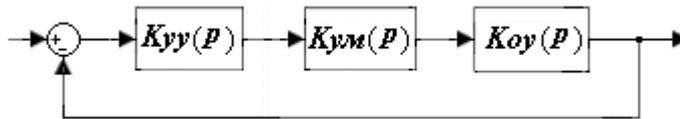


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления

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

Основная часть

Структурная схема системы приведена на рисунке 2. Принимаем условие, что параметры объекта могут изменяться в заданных пределах:

$$K_{2min} \leq K_2 \leq K_{2max} = 2K_{2min}, \quad T_{2min} \leq T_2 \leq T_{2max} = 10T_{2min}.$$

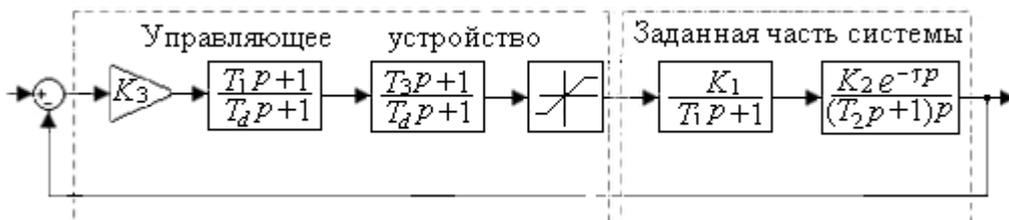


Рис. 2. Структурная схема системы

Принимаем, что постоянная времени T_1 и коэффициент усиления K_1 в процессе работы системы не меняются. Постоянная времени T_3 и коэффициент K_3 в

управляющем устройстве определяются по заданным параметрам объекта управления (см. далее). Постоянные времени T_d введены для обеспечения физической реализуемости управляющего устройства. Их величина должна быть на порядок меньше наименьшей постоянной времени в заданной части системы, при этом наличие в системе этих постоянных времени практически не сказывается на динамических свойствах системы. В нелинейном звене (насыщение) линейная часть имеет коэффициент 1, а насыщение наступает при входной величине, равной ± 1 .

Экспериментальным путём установлено, что величина постоянной времени T_3 в управляющем устройстве связана с постоянной времени объекта управления T_2 следующим выражением:

$$T_3 = 0,5T_{2\max}, \quad (1)$$

где $T_{2\max}$ – максимальное значение постоянной времени объекта управления.

Общий коэффициент усиления системы обозначим через K_c (рис.2):

$$K_c = K_3K_1K_2. \quad (2)$$

Путем моделирования в системе MATLAB-Simulink определена зависимость максимального значения коэффициента усиления разомкнутой системы K_c от запаздывания при условии, что показатели качества не превышают заданных значений: максимальное перерегулирование в переходной характеристике $\sigma_{\max} \leq 5\%$, время переходного процесса $t_p \leq (4-5)T_{2\max}$ (рис.3).

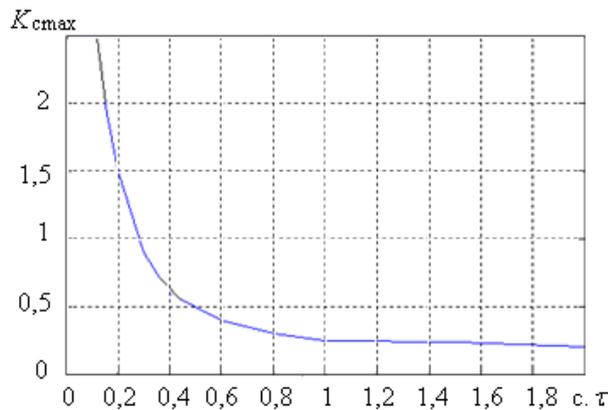


Рис. 3. Зависимость максимального значения общего коэффициента усиления системы от величины запаздывания

Наличие в системе звена типа «насыщение» делает данную систему существенно нелинейной. Автоколебания в такой системе будут отсутствовать в том случае, если линейная модель системы устойчива. При исследовании такой системы на устойчивость (отсутствие автоколебаний) принимаем нелинейное звено как линейное с коэффициентом усиления, равным 1.

Для исследования системы на устойчивость воспользуемся частотным критерием устойчивости. Для этого сделаем оценку запаса устойчивости по фазе.

Передаточная функция разомкнутой системы (рис.2) равна:

$$K(p) = \frac{K_3(T_1p + 1)(T_3p + 1)K_1K_2e^{-p\tau}}{(T_dp + 1)^2(T_1p + 1)(T_2p + 1)p} = \frac{K_c(T_3p + 1)e^{-p\tau}}{(T_dp + 1)^2(T_2p + 1)p}.$$

Пренебрегая малыми величинами T_d и сделав подстановку $p = j\omega$, получим упрощенное выражение для комплексной частотной передаточной функции разомкнутой системы:

$$K(j\omega) = \frac{K_c(T_3 j\omega + 1)e^{-j\omega\tau}}{(T_2 j\omega + 1)j\omega}. \quad (3)$$

Определим модуль функции (3):

$$|K(j\omega)| = \frac{K_c \sqrt{T_3^2 \omega^2 + 1}}{\omega \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1}}.$$

На частоте среза ω_c модуль равен 1, при этом имеем:

$$\frac{K_c \sqrt{T_3^2 \omega_c^2 + 1}}{\omega_c \sqrt{T_2^2 \omega_c^2 + 1}} = 1. \quad (4)$$

Откуда следует:

$$T_2^2 \omega_c^4 + (1 - K_c^2 T_3^2) \omega_c^2 - K_c^2 = 0.$$

Решив биквадратное уравнение, определим ω_c^2 , а затем частоту среза ω_c :

$$\omega_c^2 = \frac{K_c^2 T_3^2 - 1 + \sqrt{(K_c^2 T_3^2 - 1)^2 + 4T_2^2 K_c^2}}{2T_2^2}. \quad (5)$$

В формуле (5) перед квадратным корнем следует брать знак «+», так как это соответствует большему значению ω_c , а значит и большему значению произведения $\tau\omega_c$ в формуле $\varphi(\omega_c)$ (см.далее).

Запас устойчивости системы по фазе определяется следующим выражением:

$$\Delta\varphi = 3,14 - [\varphi(\omega_c)], \quad (6)$$

где $\varphi(\omega_c)$ – значение аргумента комплексной частотной передаточной функции разомкнутой системы (3) на частоте среза,

$$\varphi(\omega_c) = \arctg(T_3 \omega_c) - \arctg(T_2 \omega_c) - 1,57 - \tau\omega_c \text{ рад}. \quad (7)$$

Пример 1. Заданная часть системы определяется следующим образом:

$$K_1=2,5; T_1=0,01\text{с.}; 0,4 \leq K_2 \leq 0,8; 0,2 \leq T_2 \leq 2; \tau=0,6\text{с.}$$

По графику (рис.3) определяем максимальное значение коэффициента K_c . Для $\tau = 0,6\text{с} - K_{c\text{max}} = 0,4$.

Из условия (2) находим значение коэффициента K_3 :

$$K_3 = \frac{K_{c\text{max}}}{K_1 K_{2\text{max}}} = \frac{0,4}{2,5 \times 0,8} = 0,2.$$

Постоянную времени T_3 определяем по формуле (1): $T_3 = 0,5 * 2 = 1$.

Запас устойчивости (6) равен $\Delta\varphi=1,6$ рад. Автоколебания отсутствуют.

Схема набора модели в системе Simulink [10] приведена на рисунке 4. Результат моделирования – на рисунке 5.

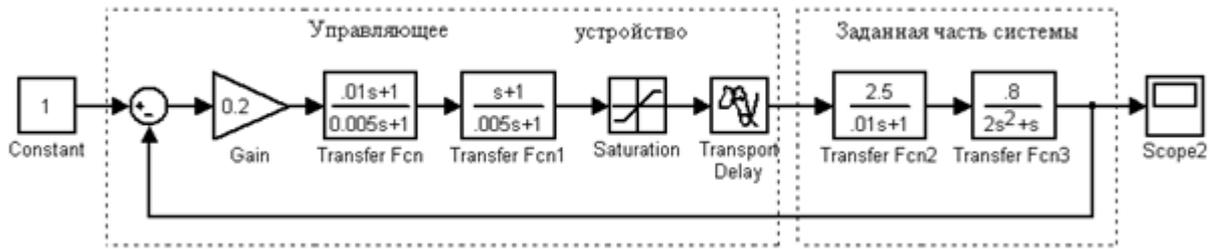


Рис. 4. Схема модели системы

Пример 2. Объект управления – морское судно. Исполнительный механизм выполнен с использованием гидравлического усилителя [6]. Передаточная функция исполнительного механизма равна

$$K_1(p) = \frac{K_1 e^{-p\tau}}{T_1 p + 1}.$$

Передаточная функция судна имеет вид:

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

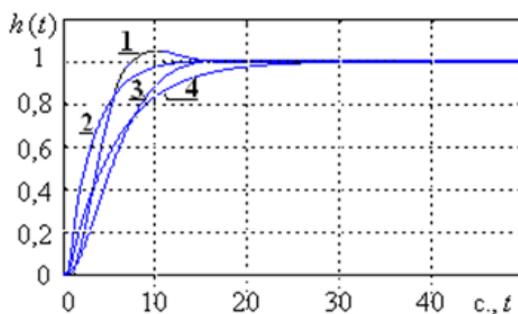


Рис. 5. Результат моделирования системы по примеру 1:

- 1 - $K_2=0,8; T_2=2$; 2 - $K_2=0,8; T_2=0,2$;
3 - $K_2=0,4; T_2=0,2$; 4 - $K_2=0,4; T_2=2$

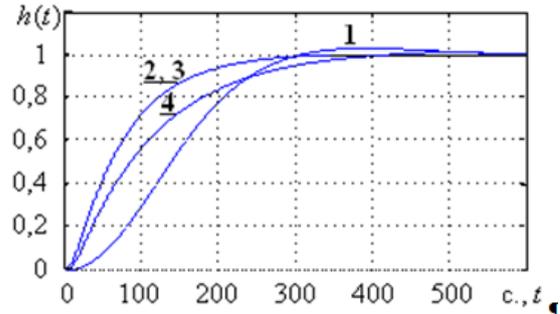


Рис. 6. Результат моделирования системы по примеру 2:

- 1 - $K_2=0,012; T_2=150$; 2 - $K_2=0,12; T_2=150$;
3 - $K_2=0,12; T_2=15$; 4 - $K_2=0,012; T_2=15$

Параметры передаточной функции исполнительного механизма [6]: $K_1=1; T_1=3c.; \tau=1,6c$. Параметры передаточной функции судна: $0,012 \leq K_2 \leq 0,12; 15 \leq T_2 \leq 150$.

Определим параметры регулятора. По графику (рис.3) для $\tau=1,6 - K_{сmax}=0,25$.

Коэффициент K_3 равен (2): $K_3 = \frac{K_{сmax}}{K_1 K_{2max}} = \frac{0,25}{1 \times 0,12} = 2,1$.

Постоянная времени T_3 равна: $T_3 = \frac{T_{2max}}{2} = \frac{150}{2} = 75$.

Запас устойчивости (δ) равен $\Delta\varphi=0,7$ рад. Автоколебания отсутствуют.

Результат моделирования приведен на рисунке 6. Из графиков (рис. 6) видно, что требования по быстродействию в данном случае выполнено при изменении коэффициента усиления объекта управления в 10 раз (0,012-0,12).

Выводы

Разработано устройство управления нестационарным объектом при наличии в заданной части системы транспортного запаздывания. Представлена структурная схема управляющего устройства и системы управления. Принято условие, что объект представляет собой звено первого порядка с интегратором. Объект, либо исполнительный механизм имеют запаздывание. Разработан метод определения параметров регулятора по заданным допустимым значениям постоянной времени, коэффициента усиления объекта и величины запаздывания. Приведены примеры расчета системы по предлагаемой методике. Примеры подтверждают возможность проводить расчет управляющего устройства для нестационарного объекта с запаздыванием. Предлагаемая методика расчета управляющего устройства отличается сравнительной простотой.

Список литературы

1. Ядыкин, И.Б. Оптимальное адаптивное управление на основе беспойсковой 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.М. 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. – Л.: Транспорт, 1967. – № 83. – С. 13-16.
7. Бобриков, С.А. Синтез и моделирование регулятора для объекта с изменяющимися параметрами / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, С.И. Кысса // Информатика и математические методы в моделировании. – 2017. – №1-2. – С. 54-61.
8. Бобриков, С.А. Синтез и моделирование цифрового управляющего устройства для нестационарного объекта / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, Н.Н. Дикий // Информатика и математические методы в моделировании. – 2017. – №3. – С. 220-227.
9. Бобриков, С.А. Модельно-ориентированный синтез комбинированной системы управления нестационарным объектом / С.А. Бобриков // Информатика и математические методы в моделировании. – 2018. – №2. – С. 174-183.
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 УПРАВЛЯЮЧОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ОБ'ЄКТА З ЗАПІЗНЕННЯМ

С.О. Бобріков, Є.Д. Пичугин, М.В. Сависько, В.І.Тимохін

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

Проведено синтез системи управління нестационарним об'єктом, в якому є ланка з транспортним запізненням. Задана частина системи представляється двома ланками: підсилювач потужності - ланка першого порядку з не змінними параметрами, і об'єкт управління - послідовно включені ланка першого порядку і інтегратор. Прийнято умова: постійна часу об'єкта може змінюватися в процесі нормального режиму роботи системи в межах 1:10, коефіцієнт посилення об'єкту може змінюватися в межах 1: 2. При цьому показники якості управління - максимальне перерегулювання в перехідній характеристиці і час перехідного процесу залишаються майже незмінними за будь-яких значеннях параметрів об'єкта в заданих інтервалах. У структурній схемі керуючого пристрою використано дві диференціюючі ланки і нелінійна ланка типу «насичення». Експериментальним шляхом знайдені співвідношення між запізненням, коефіцієнтом посилення системи і параметрами об'єкта, що забезпечують сталість показників якості управління при зміні параметрів об'єкта в заданих межах. Наведено графік залежності максимальної величини коефіцієнта посилення системи від величини запізнювання. Виконано аналіз стійкості системи при будь-яких значеннях параметрів об'єкта в зазначених межах. Для визначення запасу стійкості системи по фазі наведена програма для розрахунку запасу стійкості в системі MATLAB. Наведені приклади розрахунку керуючого пристрою при заданих параметрах незмінної частини системи і гранично допустимих значеннях змінних параметрів об'єкта управління.

Ключові слова: моделювання, система управління, передавальна функція, запізнювання, перехідна характеристика, показники якості управління, об'єкт управління, виконавчий пристрій, насичення, стійкість, запас стійкості по фазі.

SYNTHESIS AND MODELING OF THE CONTROL DEVICE FOR NON-STATIONARY OBJECT WITH LATE

S.A. Bobrikov, E.D. Pichugin, M.V. Savisko, V.I. Timohin

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

The synthesis of the control system of a non-stationary object, in which there is a link with transport delay, has been carried out. The specified part of the system is represented by two links: the power amplifier is a first-order link with unchanged parameters, and the control object is a sequentially-connected first-order link and an integrator. The following condition is accepted: the time constant of an object can change during normal operation of the system within 1:10, the gain of the object can vary within 1: 2. At the same time, the quality control indicators - the maximum overshoot in the transient response and the transient process time remain almost constant for any values of the object parameters at specified intervals. In the block diagram of the control device, two differentiating links and a nonlinear link of the "saturation" type are used. Experimentally found the relationship between the delay, the gain of the system and the parameters of the object, ensuring the constancy of the indicators of quality control when changing the parameters of the object within the specified limits. A graph of the maximum magnitude of the gain of the system on the magnitude of the delay. The analysis of the stability of the system for any values of the parameters of the object within the specified limits. To determine the stability margin of a system by phase, a program is given for calculating the stability margin in the MATLAB system. Examples of calculating the control device with given parameters of the unchanged part of the system and the maximum allowable values of the variable parameters of the control object are given.

Keywords: modeling, control system, transfer function, delay, transient response, control quality indicators, control object, actuator, saturation, stability, phase stability margin null.