

СИНТЕЗ РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ЛИНИЙ РАВНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Б.И. МАРГОЛИС, д-р техн. наук, К.И. МАКАРОВ, магистрант

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: borismargolis@yandex.ru

© Марголис Б.И., Макаров К.И., 2021

В статье изложен метод расчета настроек регуляторов в системах автоматического управления с использованием линий равного быстродействия. Предложено развитие метода расширенных частотных характеристик для решения задачи синтеза систем с заданным быстродействием. Рассмотрены примеры расчета настроек регуляторов в среде MatLab. Получены графики переходного процесса и характеристики качества систем управления.

Ключевые слова: система автоматического управления, регулятор, переходный процесс, расширенные частотные характеристики, быстродействие, показатели качества.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-1-86-91

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее применение при автоматизации технологических процессов находят одноконтурные замкнутые системы автоматического управления (САУ) с типовыми пропорционально-интегральным (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законами регулирования [1]. Структурная схема такой САУ состоит из последовательно соединенных регулирующего устройства и объекта с передаточными функциями $W_p(p)$ и $W(p)$ соответственно, охваченных обратной связью [2]. Широко известным методом для расчета настроек регуляторов является метод расширенных частотных характеристик (РЧХ), в котором синтезируется заданная степень колебательности m замкнутой системы [3]. Задача данной работы состоит в распространении метода РЧХ на синтез систем с заданным быстродействием.

РАСЧЕТ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В методе РЧХ замкнутая система управления выводится на заданную степень колебательности m . Соотношения для расчета настроек ПИД-регулятора получены в работе [4] и выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} K_1 = R(\omega) - mI(\omega) + 2K_2m\omega; \\ K_0 = -I(\omega)(m^2 + 1)\omega + K_2(m^2 + 1)\omega^2, \end{cases} \quad (1)$$

где K_1 , K_0 , K_2 – пропорциональная, интегральная и дифференциальная настройки; $I(\omega)$, $R(\omega)$ – действительная и мнимая части РЧХ регулятора:

$$W_p((j - m)\omega) = -1/W((j - m)\omega) = R(\omega) + jI(\omega).$$

Параметрическая зависимость $K_1 = f(K_0)$ называется линией равного затухания. Формулы для ПИИ-регулятора получаются из (1) при $K_2 = 0$.

Для объекта в виде колебательного звена $W(p) = 3/(p^2 + 2p + 2)$ со степенью колебательности $m_{об} = 1$, ПИД-регулятора и заданных перерегулирования $\sigma_{зад} = 30\%$, времени переходного процесса $t_{зад} = 4$ с получены наилучшие переходные процессы (рис. 1) для различных K_2 , из которых выбран оптимальный по критерию

$$J = w_\sigma |\sigma - \sigma_{зад}| / \sigma_{зад} + w_t |t - t_{зад}| / t_{зад} + w_m |m - m_{зад}| / m_{зад}, \quad (2)$$

где w_σ , w_t , w_m – соответствующие веса.

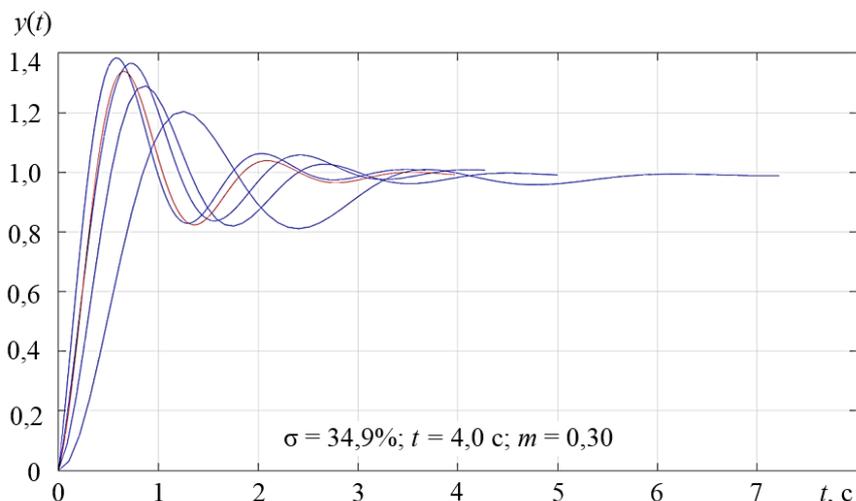


Рис. 1. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом РЧХ для $\sigma_{зад} = 30\%$

На рис. 2 показаны наилучшие переходные процессы для заданного перерегулирования $\sigma_{зад} = 5\%$ для каждой из линий равного затухания и оптимальный процесс, который не удовлетворяет требуемым характеристикам качества.

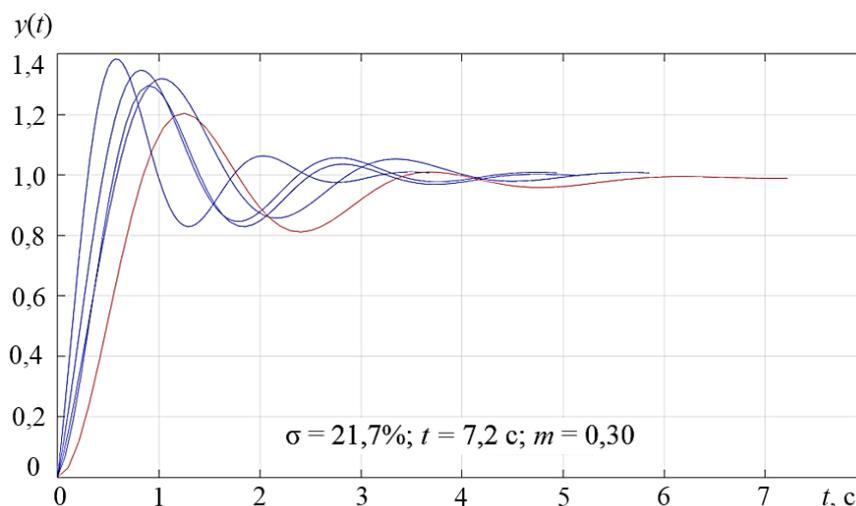


Рис. 2. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом РЧХ для $\sigma_{зад} = 5\%$

РАСЧЕТ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ ЛИНИЙ РАВНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

В отличие от метода РЧХ в методе с использованием линий равного быстродействия (ЛРБ) предложено синтезировать не степень колебательности m , а быстродействие системы, характеризуемое действительной частью корней характеристического уравнения замкнутой системы α . Эту величину можно оценить по заданному времени переходного процесса из выражения $\alpha = -5/t_{\text{зад}}$.

Формулы метода ЛРБ можно получить из (1) путем формальной подстановки $m = \alpha/\omega$, где ω является уже не частотой, а мнимой частью корней характеристического уравнения замкнутой системы. В результате получаются следующие соотношения для расчета настроек ПИД-регулятора методом ЛРБ:

$$\begin{cases} K_1 = R(\omega) - \alpha I(\omega)/\omega + 2K_2\alpha; \\ K_0 = -I(\omega) \left(\frac{\alpha^2}{\omega} + \omega \right) + K_2(\alpha^2 + \omega^2). \end{cases} \quad (3)$$

В среде MatLab [5] разработана программа для определения настроек регуляторов в САУ методом ЛРБ. На рис. 3 и 4 представлены рассчитанные с ее помощью графики переходных процессов при тех же исходных условиях, что и в методе РЧХ.

Графики линий равного быстродействия для различных K_2 ПИД-регулятора приведены на рис. 5.

Таким образом, идея метода заключается в том, что синтезируются корни с заданной действительной α , но различными мнимыми частями ω . Быстродействие у переходных процессов получается примерно одинаковым, но колебательные свойства системы можно задать различными через требуемую величину перерегулирования $\sigma_{\text{зад}}$. Плоскость корней для полученного при $\sigma_{\text{зад}} = 5\%$; $t_{\text{зад}} = 4$ с оптимального регулятора $W_p(p) = 1,91 + 1,39/p + 0,4p$ показана на рис. 6.

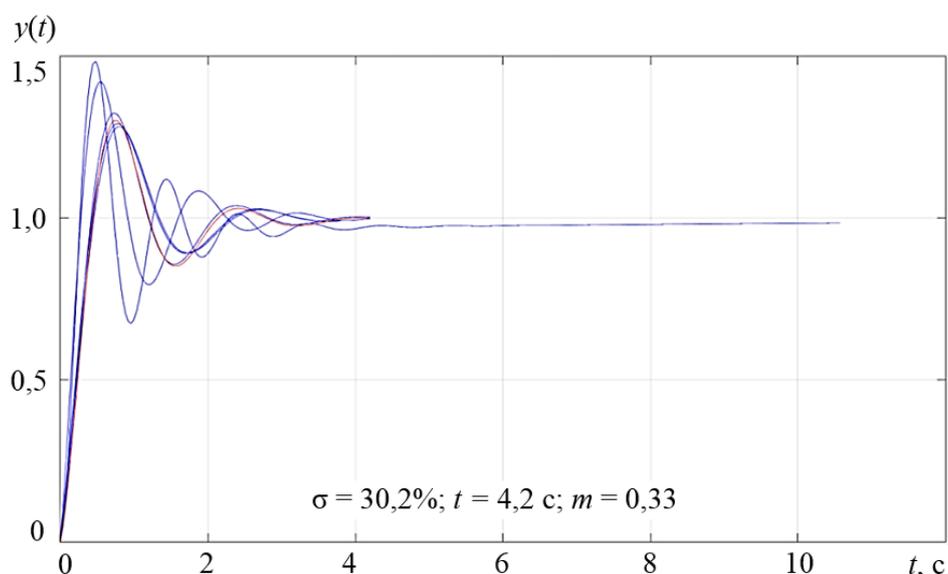


Рис. 3. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом ЛРБ для $\sigma_{\text{зад}} = 30\%$

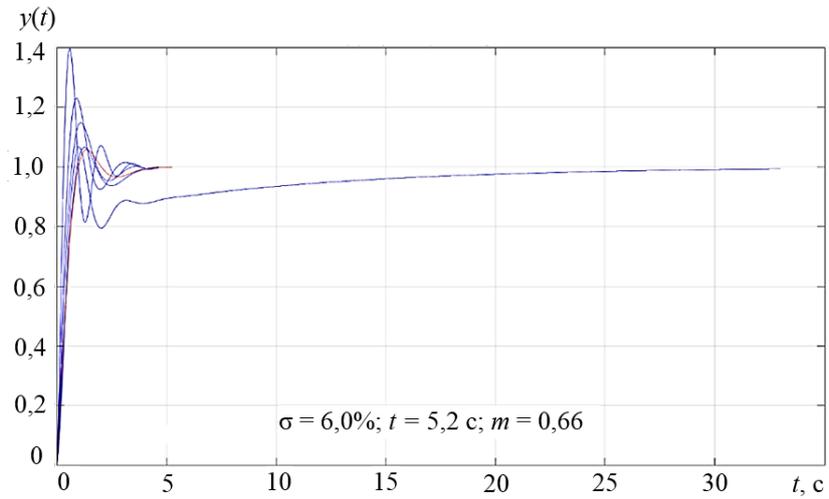


Рис. 4. Семейство переходных процессов для настроек ПИД-регуляторов при расчете методом ЛРБ для $\sigma_{зад} = 5\%$

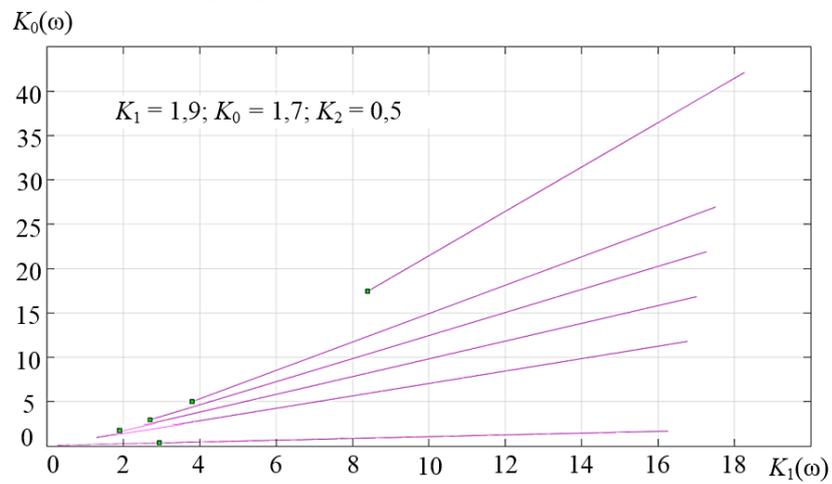


Рис. 5. График ЛРБ ПИД-регулятора для $\sigma_{зад} = 5\%$

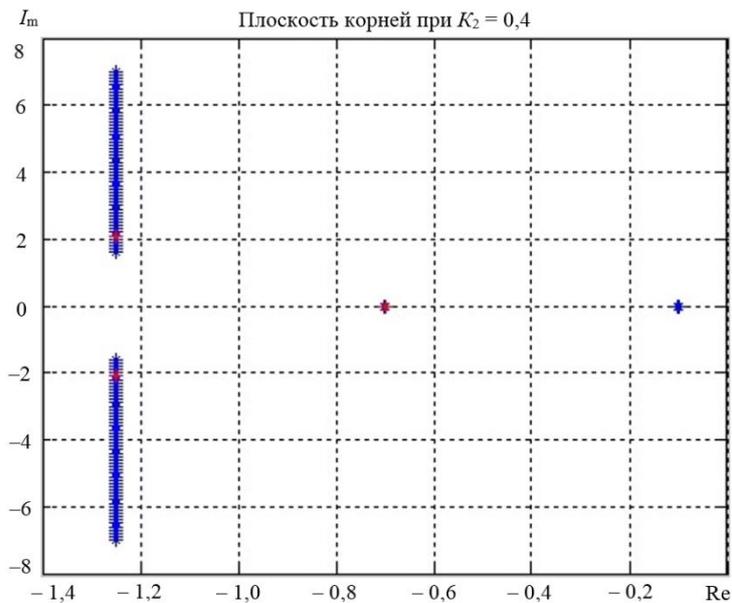


Рис. 6. Плоскость корней замкнутой системы для $\sigma_{зад} = 5\%$

Из рис. 4 и 6 видно, что заданное перерегулирование практически достигнуто, но результат по быстродействию хуже, так как кроме двух комплексных корней $-1,25 \pm 2j$ присутствует еще один действительный корень $-0,7$, находящийся ближе к мнимой оси и увеличивающий время переходного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством метода ЛРБ по сравнению с методом РЧХ является отсутствие необходимости учета степеней колебательности исходного объекта $m_{об}$, результирующей системы m и выполнения соотношения $m < m_{об}$ [4]. Это демонстрируется данными таблицы, в которой представлены характеристики рассчитанных методами РЧХ и ЛРБ оптимальных переходных процессов для желаемого времени переходного процесса $t_{зад} = 4$ с.

Характеристики оптимальных рассчитанных переходных процессов для $t_{зад} = 4$ с

Метод	Заданное перерегулирование $\sigma_{зад}$, %	Время переходного процесса $t_{п. п.}$, с	Перерегулирование σ , %	Степень колебательности m
РЧХ	30	4	34,9	0,33
	5	7,2	21,7	0,3
ЛРБ	30	4,2	30,2	–
	5	5,2	6	–

При помощи рассмотренного метода ЛРБ можно анализировать характеристики качества и переходные процессы САУ. Написание программного приложения в среде MatLab позволяет легко модифицировать его код. Оно хорошо подходит для исследовательских целей, поскольку имеется возможность задавать различные параметры объекта и желаемые характеристики качества итоговой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учеб. пособие. Тверь: ТГТУ, 2001. 247с.
2. Чемоданов Б.К., Иванов В.А., Медведев В.С., Ющенко А.С. Математические основы теории автоматического управления: учеб. пособие для студентов вузов; в 3 т. Т. 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 551 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
4. Марголис Б.И. Компьютерные методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования в среде Matlab: учеб. пособие. Тверь: ТГТУ, 2015. 92 с.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс. СПб.: Питер, 2005. 512 с.

Для цитирования: Марголис Б.И., Макаров К.И. Синтез регулирующих устройств в системах автоматического управления методом линий равного быстродействия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 1 (9). С. 86–91.

**SYNTHESIS OF REGULATING DEVICES
IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
BY THE EQUAL SPEED OPERATION LINE METHOD**

B.I. MARGOLIS, Dr. Sc., K.I. MAKAROV, Undergraduate

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: borismargolis@yandex.ru

The article describes a method for calculating the settings of regulators in automatic control systems using lines of equal speed operation. The development of the extended frequency response method for solving the problem of synthesizing systems with a given speed is proposed. The examples of calculating the settings of regulators in the MatLab environment are considered. The graphs of the transient process and quality characteristics of control systems were obtained.

Keywords: automatic control system, regulator, transient process, extended frequency characteristics, speed operation, quality indicators.

REFERENCES

1. Komissarchik V.F. Avtomaticheskoe regulirovanie tekhnologicheskikh processov: ucheb. posobie [Automatic regulation of technological processes: a tutorial]. Tver: TGTU, 2001. 247 p.
2. Chemodanov B.K., Ivanov V.A., Medvedev V.S., Yushchenko A.S. Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie dlya studentov vuzov; v 3 t. T. 1 [Mathematical foundations of the theory of automatic control: textbook manual for university students; in 3 volumes. V. 1]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 551 p.
3. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya teploenergeticheskimi processami: ucheb. posobie dlya vuzov [Theory of automatic control of heat and power processes: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 296 p.
4. Margolis B.I. Kompyuternye metody analiza i sinteza sistem avtomaticheskogo regulirovaniya v srede Matlab: ucheb. posobie [Computer methods of analysis and synthesis of automatic control systems in the Matlab environment: a tutorial]. Tver: TGTU, 2015. 92 p.
5. Lazarev Yu. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB: uchebnyy kurs [Modeling of processes and systems in MATLAB: textbook course]. St. Petersburg: Piter, 2005. 512 p.

Поступила в редакцию/received: 3.11.2020; после рецензирования/revised: 30.11.2020;
принята/accepted 07.12.2020