

УДК 681.5

Г.М. Мутанов, Г.К. Шадрин, А.Е. Еруланова
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ
РАСПШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

В настоящее время разработаны машинные способы синтеза систем управления методом пространства состояния. Однако наряду с новыми по-прежнему применяются и старые хорошо разработанные и многократно апробированные методы, основанные на частотных характеристиках [1].

В данной статье рассмотрено применение метода расширенных частотных характеристик (РЧХ) для синтеза системы управления расходом сыпучих материалов.

Требования, которым должен удовлетворять оптимальный процесс регулирования по РЧХ, следующие:

1. Затухание переходного процесса должно быть интенсивным.
2. Динамическая ошибка регулирования должна быть минимальной.
3. Продолжительность переходного процесса должна быть минимальной.

Однако указанные требования плохо поддаются формализации и, следовательно, их трудно использовать в аналитических методах синтеза систем управления, в частности в методе РЧХ.

На практике наибольшее применение нашли интегральные оценки, в частности квадратичные интегральные оценки. Простейшей является линейная квадратичная оценка

$$I = \int_0^{\infty} \sigma^2(t) dt. \quad (1)$$

Выбор параметров системы по (1) приводит к большому перерегулированию в системе с соответствующим уменьшением запаса устойчивости. Но если ограничить степень колебательности, то минимизация интегрального критерия дает хороший результат [2].

Использование линейного квадратичного критерия качества (1) в совокупности с изложенными выше требованиями к переходному процессу даёт возможность определить необходимые параметры настройки автоматического регулятора.

В методе РЧХ задача настройки состоит в том, чтобы в заданной системе регулирования выбрать и установить настроочные параметры регулятора, обеспечивающие минимум интегрального критерия качества (1) при заданной степени колебательности.

Первым требованием, которому должен удовлетворять оптимальный процесс регулирования, как было установлено выше, является интенсивность затухания переходного режима. Однако это лишь качественная характеристика затухающего процесса. Конкретизируем меру интенсивности затухания, введя понятие степени затухания процесса регулирования.

Решение линейного дифференциального уравнения системы автоматического регулирования имеет вид:

$$x = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}, \quad (2)$$

и характер колебаний системы зависит от корней p_k характеристического уравнения.

Наложим на корни p_k ограничение следующего вида:

$$p_k = -m\omega + j\omega, \quad (3)$$

где m - степень колебательности.

Этим корням соответствуют колебательные составляющие переходного процесса вида:

$$x_k = A_k e^{-m\omega t} \cos \omega t, \quad (4)$$

где ω - частота колебаний.

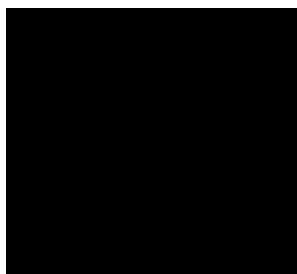
Наложенные на корни p_k ограничения геометрически интерпретируются так (рис. 1): на плоскости корней выделяют область, в которой располагаются все корни характеристического уравнения системы. Эта область характеризуется двумя показателями:

1. Степенью устойчивости η , соответствующей расстоянию от мнимой оси до ближайшего корня или пары сопряженных комплексных корней. Степень устойчивости характеризует предельное быстродействие системы, т.к величина η принадлежит той составляющей переходного процесса, которая затухает медленнее всех остальных. Время регулирования $t_p = 3/\eta$, если ближайшим к мнимой оси является вещественный корень, и не превосходит этого значения, если ближайшей к мнимой оси является пара сопряженных комплексных корней.

2. Степенью колебательности m , определяемой котангенсом угла φ , образованного отрицательной вещественной полуосью и лучом, проведённым из начала координат к корню, образующему наибольший такой угол, т.е $m = \operatorname{ctg} \varphi = \alpha/w$, где α - вещественная, а w - мнимая части комплексного корня.

Чтобы система обеспечивала заданные значения быстродействия и колебательности, необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения системы вписывались в угол 2φ и находились на расстоянии не ближе η к мнимой оси [3].

Тогда совокупность настроенных параметров регулятора образует в плоскости (объеме) параметров настройки автоматического регулятора линию, равную заданной степени колебательности.



Для расчета системы регулирования на заданную степень колебательности необходимо располагать расширенными амплитудно-фазовыми характеристиками (АФХ) объекта и регулятора, вычисление которых производится в следующей последовательности.

Исходное уравнение для расчета настройки замкнутой линейной системы автоматического регулирования, находящейся на границе заданной степени затухания имеет вид

$$W_o(m, j\omega) \cdot W_p(m, j\omega) = 1 \quad (5)$$

Рисунок 1

или

$$W_p(m, j\omega) = W_o^*(m, jw), \quad (6)$$

где $W_p(m, j\omega)$ – расширенная АФХ регулятора;

$$W_o^*(m, jw) = \frac{1}{W_o(m, jw)} - \text{обратная (инверсная) расширенная АФХ объекта.}$$

Уравнение (6) можно представить в алгебраической форме записи

$$\begin{cases} R_p(m, w) = R_o^*(m, w), \\ I_p(m, w) = I_o^*(m, w), \end{cases} \quad (7)$$

где $R_o^*(m, w)$ и $I_o^*(m, w)$ – соответствующие обратные (инверсные) расширенные вещественная и мнимая характеристики объекта (т.е вещественная и мнимая части обратной расширенной АФХ), а $R_p(m, w)$ и $I_p(m, w)$ – расширенные вещественная и мнимая характеристики регулятора.

Изложим порядок расчета системы управления. Объектом исследования является ленточный питатель с весоизмерителем, определяющим вес сыпучего материала по всей ленте. Динамические характеристики этого объекта были исследованы, а результаты опубликованы в [4].

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{o\bar{o}}(p) = \frac{29}{16p^2 + 12p + 3}. \quad (8)$$

Находим расширенную АФХ объекта

$$\begin{aligned} W_{o\bar{o}}(m, j\omega) &= \frac{29}{16(j\omega - m\omega)^2 + 12(jm - m\omega) + 3} = \frac{9,7}{5,33 \cdot (-\omega^2 - j2m\omega^2 + m^2\omega^2) + j4\omega - 4m\omega + 1} = \\ &= \frac{9,7}{-5,33\omega^2 - j10,66m\omega^2 + 5,33m^2\omega^2 + j4\omega - 4m\omega + 1} = \frac{9,7}{(1 - 5,33\omega^2 + 5,33m^2\omega^2 - 4mw) + j(4\omega - 10,66m\omega^2)} \end{aligned}$$

и инверсную расширенную АФХ объекта, в которой $p \rightarrow (j - m)w$

$$W_o^*(m, jw) = R_o^*(m, w) + jI_o^*(m, w) = \frac{(1 - 5,33w^2 + 5,33m^2w^2 - 4mw)}{9,7} + j \frac{4w - 10,66mw^2}{9,7}. \quad (9)$$

Для нахождения расширенной АФХ регулятора с двумя параметрами настройки в выражении передаточной функции регулятора (10) заменим $p \rightarrow (j - m)w$ и получим (11).

$$W_p(p) = -\frac{C_0}{p} - C_1, \quad (10)$$

где C_0 - настроечный параметр интегральной части регулятора;

C_1 - настроечный параметр пропорциональной части регулятора.

$$\begin{aligned} W_p(m, jw) &= -\frac{C_0}{(-mw + jw)} - C_1 = \frac{-C_0 - (-C_1 mw + jC_1 w)}{-mw + jw} = \\ &= \frac{(-C_0 - (-C_1 mw + jC_1 w)) \cdot (-mw - jw)}{(-mw + jw) \cdot (-mw - jw)} = \frac{C_0 mw - C_1 m^2 w^2 + jC_0 w - jC_1 mw^2 + jC_1 mw^2 - C_1 w^2}{m^2 w^2 + w^2} = \\ &= \frac{C_0 mw}{w^2(m^2 + 1)} - \frac{C_1 w^2(m^2 + 1)}{w^2(m^2 + 1)} + j \frac{C_0 w}{w^2(m^2 + 1)} = \frac{C_0 m}{w(m^2 + 1)} - C_1 + j \frac{C_0}{w(m^2 + 1)}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } R_p(m, w) = \frac{C_0 m}{w(m^2 + 1)} - C_1; \quad I_p(m, w) = \frac{C_0}{w(m^2 + 1)}.$$

Подставим в систему уравнений (7) найденные значения $R_p(m, w)$ и $I_p(m, w)$, $R_o^*(m, w)$ и $I_o^*(m, w)$ и получим систему уравнений (12)

$$\begin{cases} \frac{C_0m}{w(m^2+1)} - C_1 = \frac{1 - 5,33w^2 + 5,33m^2w^2 - 4mw}{9,7}, \\ \frac{C_0}{w(m^2+1)} = \frac{4w - 10,66mw^2}{9,7}. \end{cases} \quad (12)$$

Из второго уравнения системы (12) выразим C_0 , подставим в первое уравнение и найдем C_1

$$\begin{cases} C_1 = \frac{m(4w - 10,66mw^2)}{9,7} - \frac{(1 - 5,33w^2 + 5,33m^2w^2 - 4mw)}{9,7}, \\ C_0 = \frac{(4w - 10,66mw^2) \cdot w(m^2 + 1)}{9,7}. \end{cases} \quad (13)$$

Для дальнейших расчетов нужно задать степень колебательности m . В известной литературе рекомендуется задавать $m = 0,221$ [1]. Однако моделирования системы регулирования расхода показали, что при $m = 0,221$ переходный процесс получается излишне колебательный.

Для определения рациональной степени колебательности m были выполнены исследования системы регулирования с разной степенью колебательности. Исследования заключались в моделировании системы при разных m . Анализ результатов показал, что значение $m = 0,530$ даёт хорошие показатели качества.

Задавая степень колебательности $m = 0,530$ и ряд значений частот, находим численные значения настроек параметров регулятора и заносим в таблицу.

Далее строим линию, равную степени колебательности переходного процесса. По оси абсцисс откладываем значения C_1 , а по оси ординат – C_0 .

w	0,2	0,3	0,35	0,4	0,46	0,5	0,55	0,60	0,65	0,70
C_0	0,01	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,003
C_1	-0,04	0,01	0,04	0,07	0,10	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24

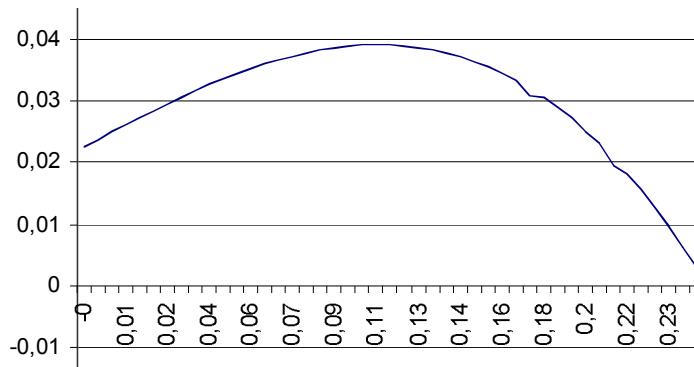


Рисунок 2 – Линия, равная степени колебательности

Анализ процессов, соответствующих различным значениям C_0 и C_1 , лежащим на линии, равной степени колебательности, показывает, что качество переходного процесса

при заданной степени затухания существенно зависит от этих параметров.

В [1] рекомендуется выбирать рабочую частоту для расчёта и выбора оптимальных значений C_0 и C_1 . Рабочая частота определяется как $w_p = 1,2w_{\max} = 1,2 \cdot 0,46 = 0,55$ рад/с. На частоте $w_p = 0,55$ рад/с оптимальные значения $C_0 = 0,03$ и $C_1 = 0,1$.

С помощью электронного моделирования в программе VisSim (рис. 3) получаем переходную характеристику замкнутой системы управления расходом (рис. 4).

Как видно, рассчитанная система обеспечивает удовлетворительное качество регулирования. Время регулирования $t_p = 17$ сек, перерегулирование $\sigma = 13\%$, степень затухания $\psi = 92\%$, число полных колебаний $n = 2$ (рис. 4).

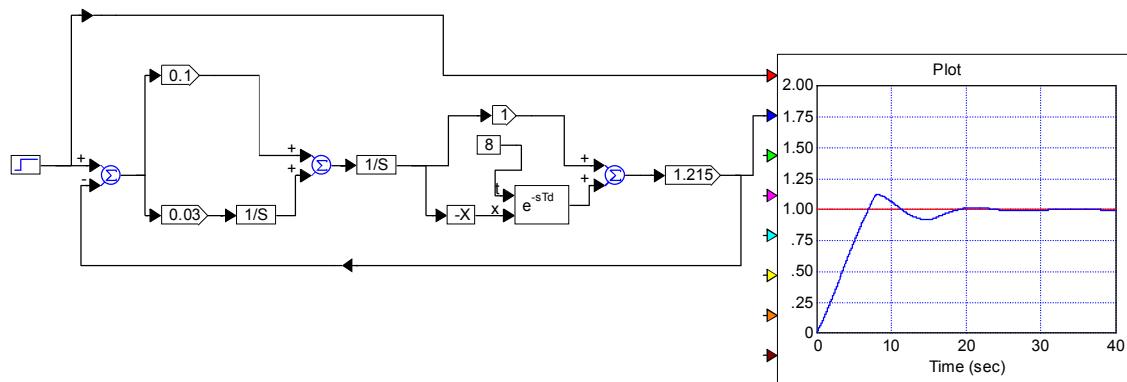


Рисунок 3 – Модель системы управления расходом

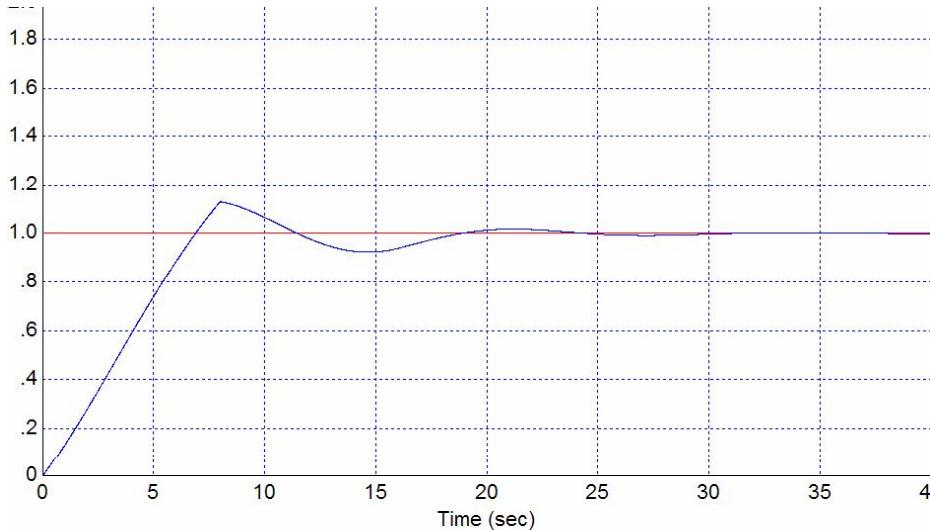


Рисунок 4 – График переходной характеристики

Список литературы

1. Автоматическое управление в химической промышленности: Учеб. для вузов / Под ред. Е.Г. Дудникова. - М.: Энергия, 1987.
2. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. - М.: Госэнергоатомиздат, 1960.
3. Макаревич С.П. Лекции по теории автоматического регулирования: Учебное пособие.- Усть-Каменогорск, 2001.
4. Структура модели бункерного дозирующего устройства // Вестник ВКГТУ. - 2010. - № 1. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ.
5. Клиначев Н.В. Моделирование систем в программе Vissim. 2001

Получено 22.04.10

