

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАЛЬНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

*Описывается выбор и аналитический метод расчета реальных дифференцирующих, интегро-дифференцирующих и неминимальнофазовых интегро-дифференцирующих звеньев, применяемых в качестве реальных компенсаторов в комбинированных системах управления (СУ). Приведен пример расчета компенсатора комбинированной СУ с реальным компенсатором в виде неминимальнофазового интегро-дифференцирующего звена.*

**О**сновой расчета комбинированных автоматических систем регулирования (АСР) является принцип инвариантности. Существует две структурных схемы комбинированных АСР, когда сигнал от компенсатора подается на вход объекта и когда он подается на вход регулятора.

При практической реализации комбинированных АСР обычно добиваются приближенной инвариантности системы в определенном диапазоне частот. При этом реальный компенсатор выбирается из числа наиболее легко реализуемых динамических звеньев, параметры которых рассчитываются из условия близости частотных характеристик идеального  $W_k^И$  и реального  $W_k^P$  компенсаторов в заданном диапазоне частот.

Для практической реализации астатических компенсирующих и развязывающих устройств в качестве реальных часто используют реальные дифференцирующие звенья (1):

$$W_k^P = \frac{T_D \cdot s}{T \cdot s + 1} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Сачко Максим Анатольевич, старший преподаватель кафедры Информационных систем и компьютерных технологий ВГУЭС.

e-mail: keeper@vvsu.ru.. Научный руководитель – Кривошеев Владимир Петрович, профессор кафедры ИСКТ ВГУЭС.

Кривошеев Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры ИСКТ ВГУЭС.

Специальность 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Для практической реализации статических компенсирующих устройств в качестве реальных часто используют интегро-дифференцирующие (2) и неминимальнофазовые интегро-дифференцирующие звенья (3):

$$W_k^p = k \frac{T_B \cdot s + 1}{T \cdot s + 1}, \quad (2)$$

$$W_k^p = k \frac{1 - T_B \cdot s}{1 + T \cdot s}. \quad (3)$$

Выбор подходящего типа компенсатора осуществляется при помощи сравнения значений амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) реального и идеального компенсаторов на нулевой и рабочей частоте. После этого выбираются такие настроечные параметры реального компенсатора ( $T$  и  $T\theta$ ), при которых добиваются максимального совпадения значений реальной и идеальной АФХ на этих частотах.

Рабочая частота выбирается при нахождении настроечных параметров регулятора в одноконтурной АСР комбинированной системы регулирования.

В тех случаях, когда невозможно добиться совпадения графиков на обеих частотах, добиваются совпадение хотя бы на одной из них и максимального приближения на другой. К примеру, когда для реализации выбрано реальное дифференцирующее звено, а точка АФХ идеального компенсатора на рабочей частоте находится в отрицательной области оси абсцисс<sup>1</sup>. Предлагается аналитический метод расчета.

Выбор реального дифференцирующего звена в качестве реального компенсатора производится в том случае, когда АФХ идеального компенсатора на нулевой частоте равна нулю, а на рабочей частоте её мнимая составляющая больше нуля. В случае если АФХ идеального компенсатора на рабочей частоте лежит в I квадранте, т.е.  $Re_k > 0$ , расчет настроечных параметров осуществляется по следующим формулам:

$$T_\theta = \frac{Re_k^2(\omega_p) + Im_k^2(\omega_p)}{\omega_p \cdot Im(\omega_p)}, \quad (4)$$

$$T = \frac{Re_k(\omega_p)}{\omega_p \cdot Im_k(\omega_p)}, \quad (5)$$

где  $Re_k$  – вещественная составляющая идеального компенсатора;

$Im_k$  – мнимая составляющая идеального компенсатора;

$\omega_p$  – рабочая частота.

<sup>1</sup> Ротац В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротац. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

В случае если АФХ идеального компенсатора на рабочей частоте лежит во II квадранте, т.е.  $Re_k < 0$ , расчет настроечных параметров осуществляется по следующим формулам:

$$T = \frac{Re_B(\omega_p) \cdot \left( Re_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right)}{\omega_p \left[ Re_B(\omega_p) \cdot \left( Re_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \cdot Im_k(\omega_p) \right]}, \quad (6)$$

$$T_\partial = T \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max}, \quad (7)$$

где  $Re_B(\omega_p) = \min Re_{1,2}(\omega_p) = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$ ,

$$a = 1 + \frac{Im_k^2(\omega_p)}{\left( Re_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right)^2},$$

$$b = \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \cdot \left( 1 + \frac{Im_k^2(\omega_p)}{\left( Re_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right)^2} \right),$$

$$c = 0.25 \cdot \left( \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right)^2 \cdot \frac{Im_k^2(\omega_p)}{\left( Re_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max} \right)^2}$$

Значения соотношения  $\left( \frac{T_\partial}{T} \right)^{\max}$  выбирается из условий реализуемо-

сти реального компенсатора.

Выбор интегро-дифференцирующего звена в качестве реального компенсатора производится в тех случаях, когда АФХ идеального компенсатора на нулевой частоте больше нуля.

В случае, когда действительная составляющая АФХ идеального компенсатора  $Re_k$  на рабочей частоте больше коэффициента усиления идеального компенсатора  $k$ , расчет настроечных параметров осуществляется по следующим формулам:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{k - Re_k(\omega_p)}{Re_k(\omega_p) - Re_k^p(\infty)}}, \quad (8)$$

$$T_B = T \cdot \frac{\operatorname{Re}_k^p(\infty)}{k}, \quad (9)$$

где  $\operatorname{Re}_k^p(\infty) = \operatorname{Re}_k(\omega_p) - \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{k - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}$ .

В случае, когда действительная составляющая АФХ идеального компенсатора  $\operatorname{Re}_k$  на рабочей частоте меньше коэффициента усиления  $k$ , расчет настроечных параметров осуществляется по следующим формулам:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{k - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - k \cdot (T_B / T)^{\max}}}, \quad (10)$$

$$T_\sigma = T \cdot (T_B / T)^{\max} \quad (11)$$

Значение соотношения  $\left(\frac{T_B}{T}\right)^{\max}$  выбирается так же, как в (6) и (7), из условий реализуемости реального компенсатора.

В тех случаях, когда точка АФХ идеального компенсатора на рабочей частоте находится в IV квадранте, помимо интегро-дифференцирующего выбирают неминимальнофазовое интегро-дифференцирующее звено. В случае, когда действительная составляющая АФХ идеального компенсатора  $\operatorname{Re}_k$  на рабочей частоте меньше коэффициента усиления  $k$ , расчет настроечных параметров осуществляется по формулам (8) и (9).

В случае, когда действительная составляющая АФХ идеального компенсатора  $\operatorname{Re}_k$  на рабочей частоте больше коэффициента усиления  $k$ , расчет настроечных параметров осуществляется по следующим формулам:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{k - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - k \cdot (T_B / T)^{\min}}}, \quad (12)$$

$$T_\sigma = T \cdot (T_B / T)^{\min} \quad (13)$$

Ниже приведен пример комбинированной АСР с реальным компенсатором в виде неминимальнофазового интегро-дифференцирующего звена.

Передаточные функции объекта по каналу возмущения (14) и по каналу управления (15) соответственно равны:

$$W_{OB} = 10 \frac{e^{-2.2S}}{10000S^2 + 210S + 1}, \quad (14)$$

$$W_{OY} = 2 \frac{e^{-0.2S}}{100S^2 + 80S + 1}. \quad (15)$$

Рабочая частота АСР  $\omega_p = 0,86$ , а настроечные параметры регулятора  $K_0=9,191$ ,  $K_1=45,075$ .

При помощи имеющихся данных о комбинированной АСР строим АФХ идеального компенсатора (рис. 1), значение  $Re$  на начальной частоте равно 5, а точка АФХ на рабочей частоте находятся в III квадранте. Отсюда следует, что в качестве реального компенсатора подходит неминимальнофазовое интегро-дифференцирующее звено. По формуле (12) и (13) определяем настроечные параметры реального компенсатора:  $K=5$ ;  $Td=-1,73$ ;  $T=119,48$ .

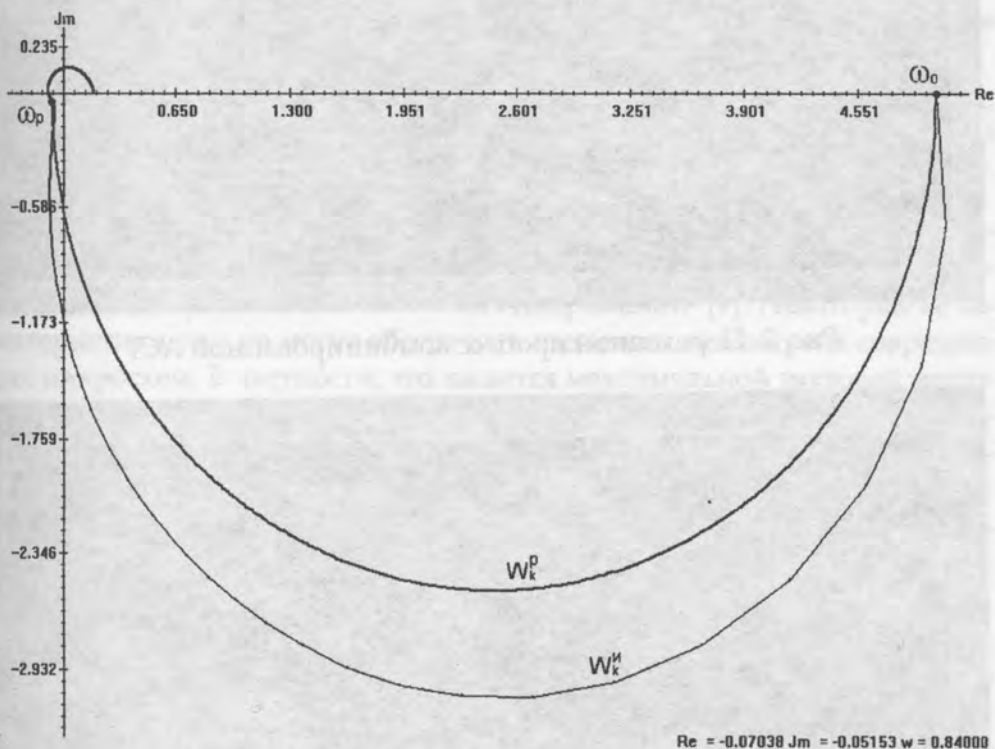


Рис. 1. АФХ реального и идеального компенсаторов комбинированной АСР

Сравнивая переходные процессы рассматриваемой комбинированной АСР (рис. 2) и одноконтурной АСР (рис. 3), видно, что качество переходного процесса комбинированной системы значительно лучше, т.к. величина его максимальной амплитуды колебаний меньше почти в 5 раз.

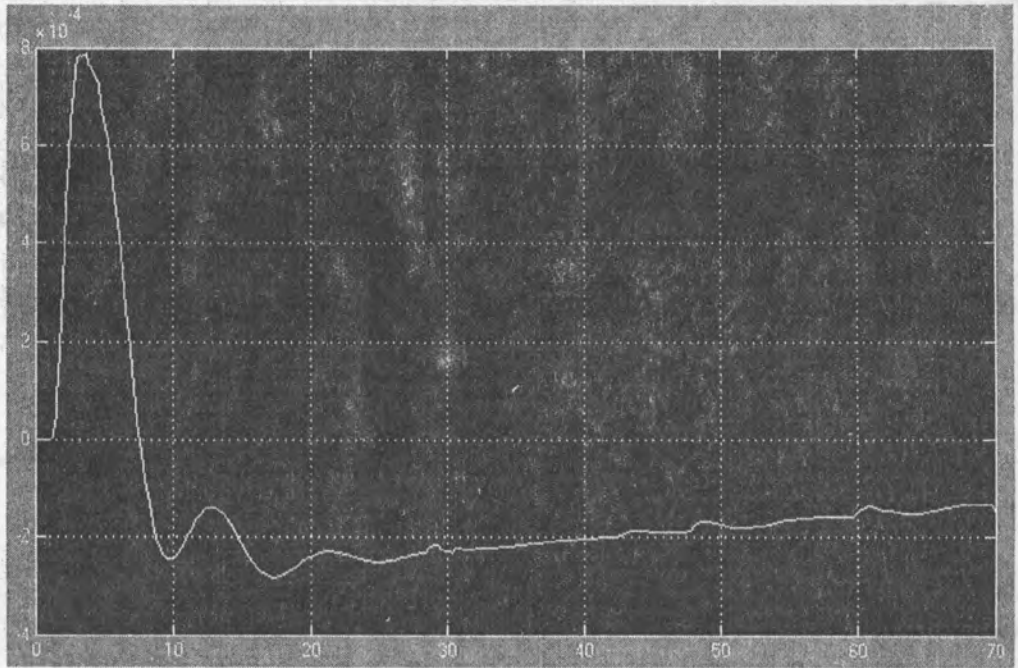


Рис. 2. Переходной процесс комбинированной АСР

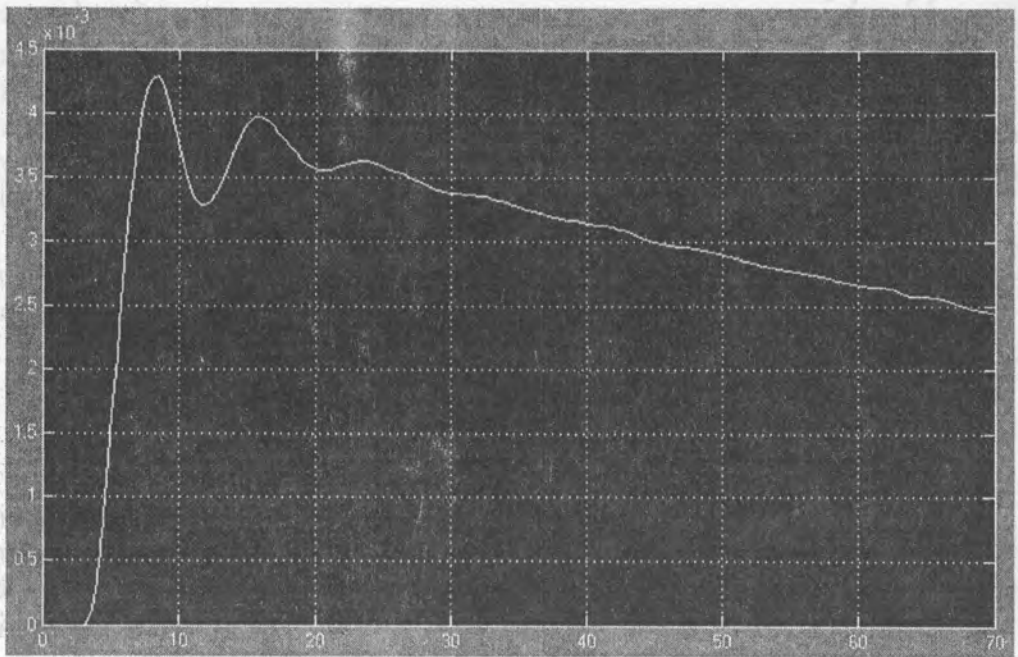


Рис. 3. Переходной процесс одноконтурной АСР