

## КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ СТРУКТУР ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Одним из общих принципов, на которых базируются основные теоретические положения методов и алгоритмы расчета параметров в задачах синтеза оптимальных систем автоматического управления (САУ), является принцип динамической компенсации, в соответствии с которым в результате решения задачи синтеза системы определяют как структуру регулятора, так и параметры динамической настройки [1]. В этом случае задачи синтеза разделяют на два этапа: нахождение эталонной динамической характеристики системы при отработке скачка задания (например, в виде соответствующей передаточной функции) и синтез регулятора, обеспечивающий приближение реальной динамической характеристики к эталонной, т.е. нахождение оператора и параметров оптимального регулятора. Основной особенностью принципа динамической компенсации является возможность не учитывать динамику объекта по каналу регулирующего воздействия при синтезе регулятора, что достигается наличием в операторе регулятора сомножителей в виде передаточной функции объекта:

$$A_p = A_0^{-1} (1 - A^{\vartheta})^{-1} A^{\vartheta}, \quad (1)$$

где  $A_0$  - оператор объекта управления,  $A^{\vartheta}$  - оператор эталонной замкнутой системы.

Авторы [1] утверждают, что зависимость (1) определяющая оператор  $A_p$ , дает точное решение задачи синтеза регулятора оптимального при отработке задания, однако в большинстве случаев физически элемент с оператором  $A_p$  реализовать не удастся. Далее указано, что метод динамической компенсации применим лишь в том случае, если объект не содержит правых нулей и (или) полюсов, но область применимости этого метода можно расширить с помощью внедрения обратных связей, позволяющих провести стабилизацию объекта управления [2].

Замена оператора эталонной замкнутой системы  $A^{\vartheta}$  на заданную, выполняющую функцию критерия качества при отработке задания, с использованием экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации САУ и принципов двухканальности измеренного воздействия на управляемую величину позволяют аналитически формировать структуру системы на оптимальную отработку основных воздействий и определять параметры динамических настроек регуляторов и устройств компенсации изменяемых возмущений (рис. 1).

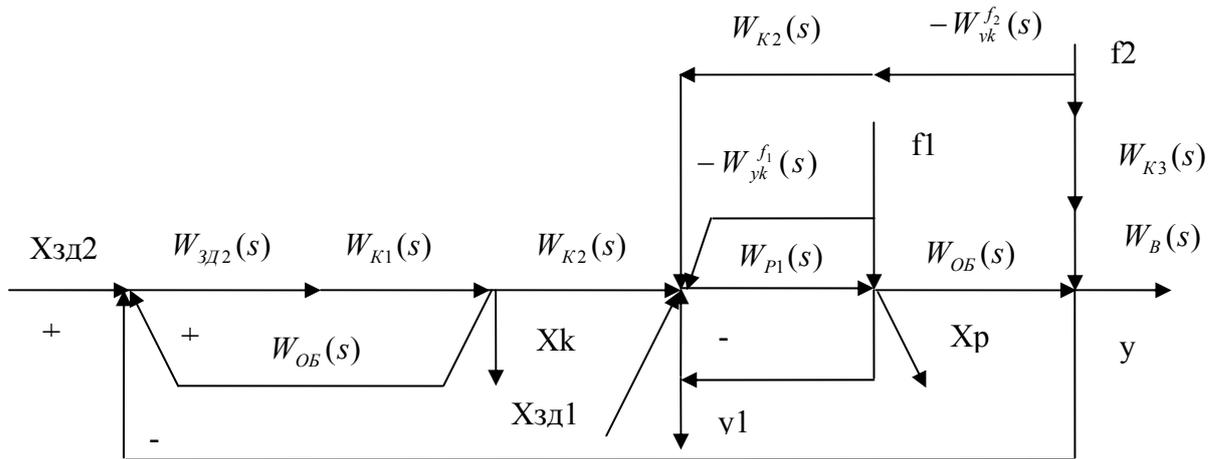


Рисунок 1. Блок-схема комбинированной САУ с использованием принципов динамической компенсации

Здесь приняты следующие обозначения передаточных функций:  $W_{об}(s) = W_{об}^o(s)e^{-\tau_y s}$  - главного участка объекта;  $W_{он}(s)$  - опережающего участка объекта;  $W_{б}(s)$  - крайнего внешнего возмущения  $f_2$ ;  $W_{п1}(s)$  - стабилизирующего регулятора (СР), настроенного на оптимальную отработку задания  $X_{зд1}$  и внутреннего возмущения  $f_1$ ;  $W_{п2}(s)$  - корректирующего регулятора (КР);  $W_{зд2}(s)$  - критерия качества отработки задания  $X_{зд2}$  КР;  $W_{к1}(p) = [W_{об}(s)]^{-1}$  - компенсатора главного участка объекта по каналу регулирующего воздействия;  $W_{к2}(s)$  - компенсатора регулирующего воздействия внутреннего контура САУ стабилизирующего регулятора при изменении корректирующего воздействия с выхода КР или выхода устройства компенсации внешнего возмущения с передаточной функцией  $W_{уk}^{f_2}(s)$ ;  $W_{к3}(s)$  - компенсатора запаздывания по каналу регулирующего воздействия;  $y; y_1$  - основная и вспомогательная регулируемые величины соответственно;  $x_k, x_p$  - корректирующее и регулирующее воздействия соответственно;  $\tau_y$  - запаздывание по каналу регулирующего воздействия.

Структурная схема моделирования переходных процессов САУ, позволяющая оптимально отработать задающие воздействия, внутренние и внешние возмущения, приведена на рис. 2.

Комбинированная САУ обеспечивает полную инвариантность системы при отработке измеряемого наиболее опасного внутреннего возмущения при выполнении следующего условия:

$$W_{уk}^{f_2}(s) = [W_{п1}(s)]^{-1}, \quad (2)$$

где передаточная функция стабилизирующего регулятора имеет следующий вид [3]:

$$W_{п1}(s) = [W_{оп}(s)]^{-1} W_{зд1}^{PC(n=1)}. \quad (3)$$

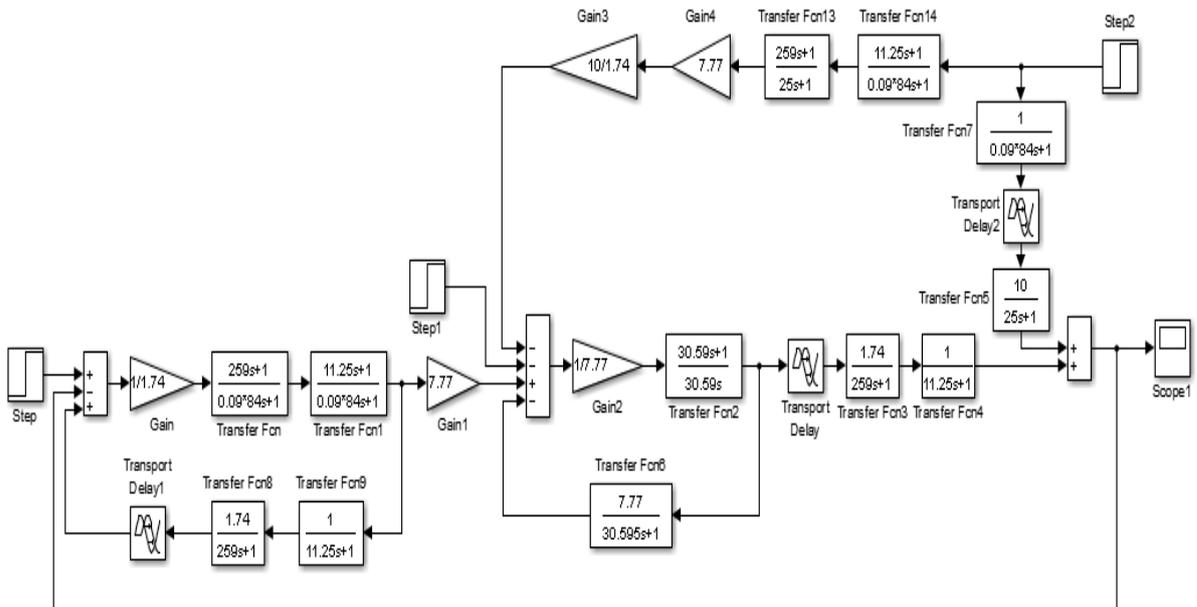


Рисунок 2. Структурная схема моделирования переходных процессов комбинированной САУ при  $\tau_y = 84c$

При описании динамики опережающего участка объекта инерционным звеном:

$$W_{оп}(s) = \frac{K_{ин}}{T_{оп}s + 1} \quad (4)$$

передаточная функция разомкнутой системы принимает вид:

$$W_{зД1}^{PC(n=1)} = \frac{1}{T_{зД}s}, \quad (5)$$

где  $T_{зД1}$  - параметр динамической настройки СР.

С учетом (4) и (5) передаточная функция стабилизирующего регулятора будет соответствовать ПИ-регулятору с одним параметром динамической настройки  $T_{зД1}$ :

$$W_P(s) = \frac{T_{оп}s + 1}{K_{оп}T_{зД1}s}. \quad (6)$$

Отработка задания  $x_{зД2}$  по основной регулируемой величине  $y$  зависит от численного значения параметра динамической настройки КР с передаточной функцией вида:

$$W_{P2}(s) = \frac{W_{зД2}(s)W_{К1}(s)}{1 - W_{зД2}(s)W_{К1}(s)W_{об}(s)}, \quad (7)$$

где  $W_{зД2}(s) = W_{зД2}^0(s)e^{-\tau_y s}$ ,

(8)

$$W_{об}(s) = W_{об}^0(s)e^{-\tau_y s}, \quad (9)$$

$$W_{К1}(s) = [W_{об}(s)]^{-1}. \quad (10)$$

Подставив передаточные функции (8), (9) и (10) в передаточную функцию КР (7), получаем

$$W_{P2}(s) = \{W_{об}(s)\}^{-1} [1 - W_{3Д2}^0(s) e^{-\tau_y s}]^{-1} W_{3Д2}(s), \quad (11)$$

т.е. оптимальный регулятор (1), но с заменой оператора эталонной замкнутой системы  $A^э$  на заданную передаточную функцию, выполняющую роль критерия качества при отработке задания.

При этом структура передаточной функции критерия качества должна полностью соответствовать структуре передаточной функции объекта по каналу регулирующего воздействия [3]:

$$W_{3Д2}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{3Д2}s + 1)^{n-m}}, \quad (12)$$

где  $n$ ,  $m$  – соответственно порядок знаменателя и числителя передаточной функции объекта;  $T_{3Д2}$  – параметр динамической настройки КР, численное значение которого определяет прямые показатели качества системы при отработке скачка задания.

Добавление в систему компенсатора регулирующего воздействия с передаточной функцией  $W_{K2}(s)$  позволяют сформировать структуру КР по передаточной функции главного участка объекта, а с учетом компенсатора запаздывания  $W_{K3}(s)$  реализовать инвариантность  $y$  по отношению к крайнему внешнему возмущению с точностью до  $\varepsilon$  при выполнении следующего условия инвариантности по двум каналам воздействия измеряемого возмущения на выходную переменную:

$$W_B(s)W_{K1}(s)W_{об}(s) = W_{K3}(s)W_B(s), \quad (13)$$

где передаточная функция устройства компенсации  $W_{VK}^f(s) = W_B(s)W_{K1}(s)$ .

Графики переходных процессов в системе при отработке скачка задания и крайнего внешнего возмущения приведены соответственно на рис. 3 и 4.

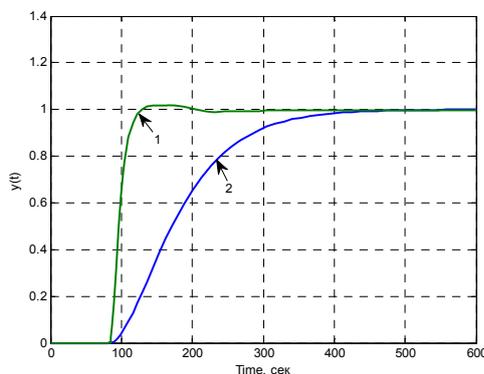


Рисунок 3. Графики переходных процессов САУ при отработке задания и различных значениях параметра динамической настройки оптимального корректирующего регулятора: 1 -  $T_{3Д2} = 0.09 * 84c$ ; 2 -

$$T_{3Д2} = 0.618 * 84c$$

Видно, что при обработке задания с уменьшением численного значения параметра динамической настройки КР  $T_{зд2}$  время регулирования уменьшается, приближаясь к величине запаздывания по каналу регулирующего воздействия.

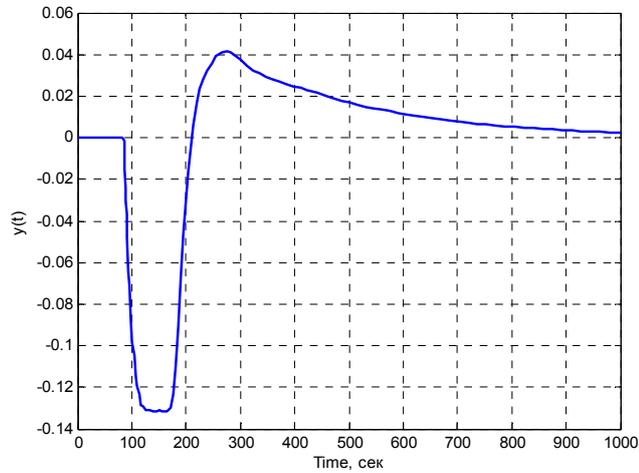


Рисунок 4. График переходного процесса комбинированной САУ при обработке крайнего внешнего возмущения

Максимальная динамическая ошибка регулирования при плановом изменении нагрузки составляет 13.5% от величины коэффициента усиления передаточной функции крайнего внешнего возмущения, т.е. достигнута инвариантность с точностью до  $\varepsilon$ .

При этом достигается полная инвариантность по отношению к изменяемому внутреннему возмущению  $f_1$ .

Таким образом сконструирована комбинированная САУ высокой динамической точности по отношению к основным воздействиям.

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления/ под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2000. – 736с.; ил.

2. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления/ А.А. Первозванский. – М.: Наука, 1986. – 616с.

3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами/ Учебное пособие под ред. Г.Т. Кулакова и [др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238с.: ил.