

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ВНУТРЕННЕЙ МОДЕЛЮ

Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Одной из основных проблем, снижающих эффективность использования стандартных промышленных регуляторов серийного производства, является вынужденное применение типовых алгоритмов управления для автоматизации объектов с большим запаздыванием по каналу регулирующего воздействия. Это порождает трудно разрешимую проблему “технических противоречий” между повышением быстродействия и устойчивостью системы. Повышение быстродействия типовых регуляторов неизменно приводит к снижению устойчивости [1].

Основными направлениями решения указанной проблемы является использование современных аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления теплоэнергетическими процессами [2 ÷ 5].

Возможности существенного повышения качества регулирования теплоэнергетических процессов с использованием указанных аналитических экспресс-методов покажем на примере формирования инвариантной каскадной системы автоматического регулирования (ИКСАР) с внутренней моделью.

Схема моделирования ИКСАР и типовой каскадной системы в пакете Simulink приведена на рис. 1.

Динамика опережающего участка объекта представлена передаточной функцией инерционного звена второго порядка:

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{(T_{\text{оп}}s + 1)(\sigma_{\text{оп}}s + 1)}, \quad (1)$$

где $k_{\text{оп}}$ – коэффициент передачи; $T_{\text{оп}}$, $\sigma_{\text{оп}}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени в минутах.

Структуру стабилизирующего регулятора (СР) определим на основе передаточной функции оптимального регулятора для объекта без запаздывания [5]:

$$W_{\text{р1}}^{\text{opt}}(s) = [W_{\text{оп}}^*(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s). \quad (2)$$

Здесь $W_{\text{оп}}^*(s)$ – расчетная передаточная функция опережающего участка, равная:

$$W_{\text{оп}}^*(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}^*s + 1}, \quad (3)$$

где постоянная времени передаточной функции (3) с учетом (1) равна:

$$T_{\text{оп}}^* = T_{\text{оп}} + \sigma_{\text{оп}}. \quad (4)$$

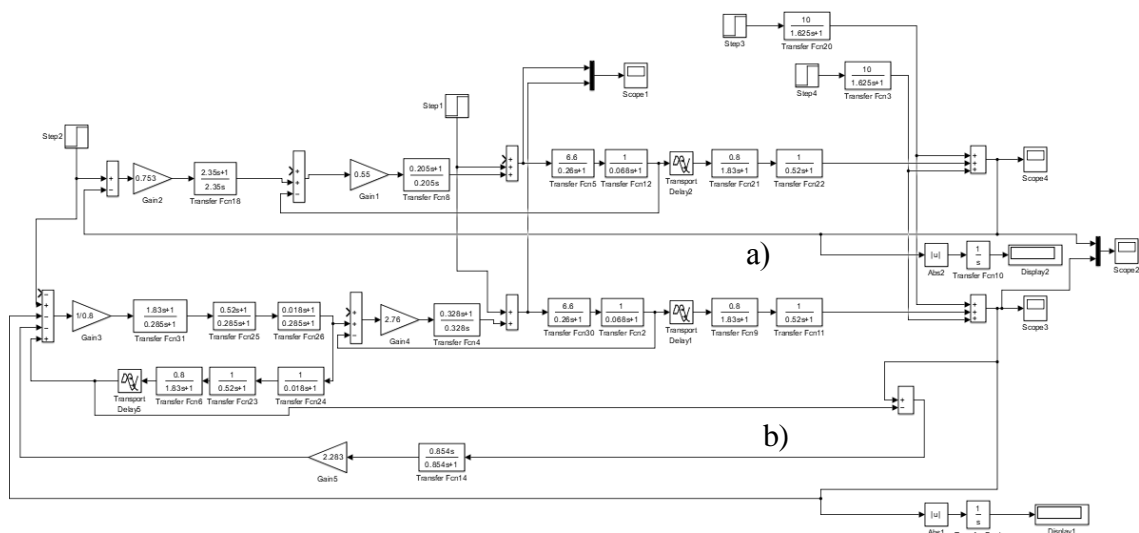


Рисунок 1 – Схема моделирования типовой (а) и инвариантной САР с внутренней моделью (б) в пакете Simulink

При этом заданная передаточная функция разомкнутой системы представлена интегрирующим звеном [5]:

$$W_{зд1}^{PC(n=1)}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s}, \quad (5)$$

где $T_{зд1}$ – единственный расчетный параметр динамической настройки СР, численные значения которого рассчитывают по формуле:

$$T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}^* \quad (6)$$

Здесь $\gamma_1 \in [0,618; 0,382; 0,236; \dots; 0,09; 0,056]$ – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, где за целое принято численное значение $T_{оп}^*$ [5].

Подставив в передаточную оптимального регулятора (2) передаточные функции (3) и (5), получим:

$$W_{зд1}^{opt}(s) = \frac{k_{p1}(T_{н1}s+1)}{T_{н1}s}, \quad (7)$$

где время интегрирования $T_{н1} = T_{оп}^* = 0,328$ мин, (8)

а коэффициент передачи СР $k_{p1} = \frac{T_{оп}^*}{K_{оп}T_{зд1}}$. (9)

При $\gamma_1=0,056$, с учетом максимально допустимой величины регулируемого воздействия при отработке скачка задания, численное значение коэффициента передачи стабилизирующего регулятора будет равно $k_{p1} = 2,76 \frac{T/C}{oC}$. В результате чего внутренний контур системы со СР может быть заменен на передаточную функцию вида:

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s+1}, \quad (10)$$

где $T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}^* = 0,018$ мин. (11)

Динамика инерционного участка объекта представлена инерционным звеном второго порядка с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия [3]:

$$W_{\text{ин}}(s) = \frac{k_{\text{ин}} e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{ин}} s + 1)(\sigma_{\text{ин}} s + 1)}, \quad (12)$$

где $k_{\text{ин}}$ – коэффициент передачи; $T_{\text{ин}}$, $\sigma_{\text{ин}}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени передаточной функции (12); τ_y – условное запаздывание.

С учетом (10) и (12) эквивалентная передаточная функция объекта для формирования структуры корректирующего регулятора имеет следующий вид:

$$W_{\text{зкв}}(s) = W_{\text{зд1}}(s) W_{\text{ин}}(s) = \frac{k_{\text{ин}} e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{ин}} s + 1)(\sigma_{\text{ин}} s + 1)(T_{\text{зд1}} s + 1)}. \quad (13)$$

Выход корректирующего регулятора (КР) подключаем с плюсом к входу КР с использованием полной модели эквивалентного объекта:

$$W_{\text{зкв}}^{\text{мод}}(s) = W_{\text{зкв}}(s) = \frac{k_{\text{ин}} e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{ин}} s + 1)(\sigma_{\text{ин}} s + 1)(T_{\text{зд1}} s + 1)}. \quad (14)$$

В результате чего, полная модель при отработке скачка задания полностью компенсирует сигнал главной обратной связи замкнутой системы. При этом замкнутая система превращается в разомкнуто-замкнутую систему, т.е. замкнутую по промежуточной регулируемой величине и разомкнутую по основной регулируемой величине. Это позволяет на корректирующий регулятор возложить функцию компенсатора той части передаточной функции полной модели (14), которая не содержит запаздывания:

$$W_{\text{КР}}^{\text{opt}}(s) = W_{\text{п2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{1}{W_{\text{зкв}}^{\circ}(s)}. \quad (15)$$

Для физической реализации КР передаточную функцию (15) умножаем на передаточную функцию:

$$W_{\text{зд2}}^{\circ}(s) = \frac{1}{(T_{\text{зд2}} s + 1)^2}, \quad (16)$$

где $T_{\text{зд2}} = \gamma_2 \tau_y = 0,146 * 1,95 = 0,285$ миллисекунд так как за целое в данном случае принята величина условного запаздывания τ_y [5].

С учетом (14), (15) и (16) передаточная функция КР примет вид:

$$W_{\text{п2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{(T_{\text{ин}} s + 1)(\sigma_{\text{ин}} s + 1)(T_{\text{зд1}} s + 1)}{k_{\text{ин}} (T_{\text{зд2}} s + 1)^2}. \quad (17)$$

Для существенного улучшения качества отработки внешнего возмущения второй выход полной модели с минусом подключаем к входу дополнительного элемента сравнения (ЭС), на второй вход которого подаем сигнал основной регулируемой величины, а выход ЭС подаем на вход устройства компенсации (УК) внешнего возмущения. При этом выход УК с минусом подаем на вход КР, а УК реализуем в виде реального дифференциатора со следующими значениями параметров настройками:

$$k_{\text{д}} = 1/3\gamma_2, T_{\text{д}} = 3T_{\text{зд2}} = 3\gamma_2 \tau_y.$$

Графики переходных процессов типовой и инвариантной САР при основных воздействиях приведены на рис. 2.

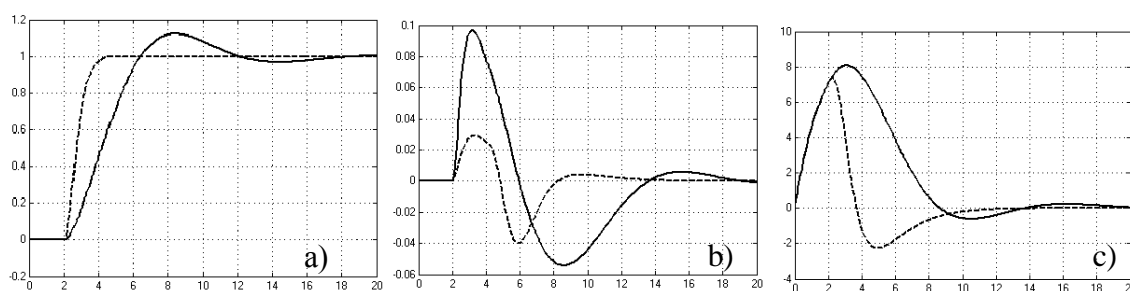


Рисунок 2 – Графики переходных процессов типовой и инвариантной САР при обработке основных воздействий

При обработке скачка задания (рис. 2, а) время регулирования ИКСАР (пунктирная линия) в 3,7 раза меньше, чем ТКСАР (сплошная линия). При этом максимальная величина перерегулирования ТКСАР составляет 12,5%, а у ИКСАР перерегулирование отсутствует.

При обработке внутреннего возмущения (рис. 2, в) максимальная динамическая ошибка регулирования ИКСАР в 3,6 раза меньше, чем ТКСАР. Причем время регулирования уменьшается в 1,6 раза, а интегральная оценка по модулю ошибки регулирования сокращается в 3,2 раза.

При обработке внешнего возмущения (рис. 2, с) быстродействие ИКСАР повысилась в 2,1 раза по сравнению с ТКСАР, а интегральная оценка по модулю ошибки регулирования уменьшилась в 1,8 раза.

Таким образом, ИКСАР существенно повышает качество обработки основных воздействий по сравнению с типовой.

1. Коновалов, М.А. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов / М.А. Коновалов. – К.: Феникс, 2009. – 312 с.

2. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования : справочное пособие / Г. Т. Кулаков. – Мн.: Вышэйшая школа, 1984. – 192 с.

3. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования : учеб. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 135 с.

4. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие для студентов специальности “Автоматизация технологических процессов и производств”, “Автоматизация пароторубинных установок и ядерных реакторов АЭС”, “Информационные технологии и управление в технических системах” / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010 – 574 с.

5. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.