

УДК 621.52

ВОЮШ Н.В., аспирант (БНТУ)
САВОСТЬЯНОВ М.С., магистрант (БНТУ)
Научный руководитель КУЛАКОВ Г.Т., д.т.н., профессор (БНТУ)
Республика Беларусь, г. Минск

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Одним из основных направлений повышения качества регулирования по сравнению с ПИД-регулятором является синтез регуляторов на базе принципа динамической компенсации с использованием аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического регулирования теплоэнергетическими процессами [1÷3].

Системы автоматического управления теплоэнергетическими процессами ТЭС и АЭС в большинстве случаев реализуют на основе типовых регуляторов (П, И, ПИ, ПД, ПИД-типов), из которых наилучшее качество регулирования обеспечивают ПИД-регуляторы различной структуры. Вместе с тем при низких нагрузках объектов регулирования (даже при оптимальных параметрах динамической настройки ПИД-регуляторов) качество регулирования технологическими параметрами оказывается ниже по сравнению с высокими нагрузками. Это происходит из-за существенного ухудшения динамических характеристик объектов регулирования теплоэнергетических процессов. В связи с этим актуальной становится проблема повышения качества управления технологическими параметрами ТЭС и АЭС во всем диапазоне изменения нагрузок.

Первоочередной задачей для решения указанной проблемы является синтез оптимальных структур регуляторов, позволяющих обрабатывать задание в полном соответствии с выбранным критерием оптимальности.

Рассмотрим последовательность необходимых действий. Прежде всего необходимо описать динамику объекта по каналу регулирующего воздействия с высокой точностью совпадения переходных процессов модели и объекта — например, с использованием передаточных функций в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием [3]:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} e^{-\tau_y p}}{(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)} = \frac{1,488 \cdot e^{-21,3p}}{(37p + 1)(7,31p + 1)} \quad (1),$$

где $k_{об}$ — коэффициент передачи объекта; T_1 , σ — соответственно большая и меньшая постоянная времени передаточной функции объекта; τ_y — условное запаздывание.

Передаточной функции объекта (1) соответствует следующая заданная передаточная функция критерия оптимальной обработки задания [3]:

$$W_{3д}^{3с}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{3д}p+1)^2} = \frac{e^{-21,3p}}{(3,11p+1)^2} \quad (2),$$

где $T_{3д}$ — заданная постоянная времени передаточной функции; это единственный расчетный параметр динамической настройки оптимального регулятора с динамической компенсацией, рассчитанный по формуле [3]:

$$T_{3д} = \gamma \cdot \tau_y = 0,146 \cdot 21,3 = 3,11 \text{ с.} \quad (3)$$

Здесь γ — весовой коэффициент, выбираемый из ряда чисел пропорции золотого сечения, исходя из максимально допустимого значения регулирующего воздействия и принятия за целое численного значения условного запаздывания передаточной функции объекта (1): $\gamma \in [1; \varphi; \varphi^2; \varphi^3; \dots; \varphi^n]$, где $\varphi = 0,618..$ — число Фибоначчи.

Схемы моделирования переходных процессов предлагаемой САР и САР с реальным ПИД-регулятором приведена на рисунке 1.

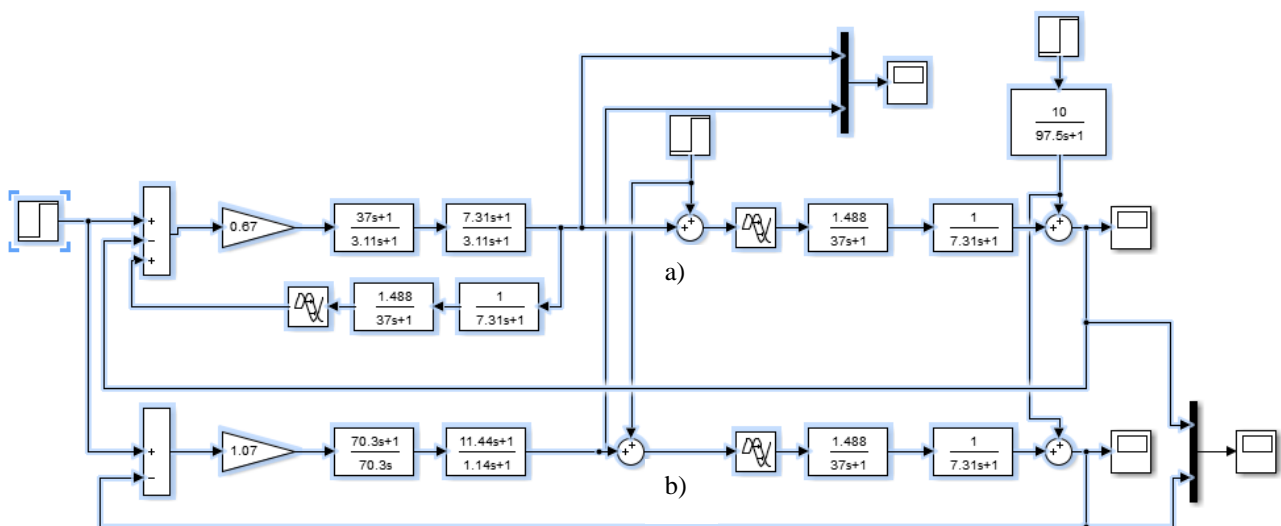


Рисунок 1. Схемы моделирования предлагаемой САР (а) и САР с реальным ПИД-регулятором (б) в пакете Simulink

Структура оптимального регулятора реализована при этом в виде отношения заданной передаточной функции критерия оптимальной отработки задания (2) и передаточной функции объекта (1), на рисунке 1 (а) называемой передаточной функцией фильтра, охваченного положительной обратной связью передаточной функцией объекта (1):

$$W_{\phi}(p) = \frac{W_{3д}^{3с}(p)}{W_{об}(p)} = \frac{(T_1 p+1)(\sigma p+1)}{k_{об}(T_{3д}p+1)^2} \quad (4).$$

В результате при отработке скачка задания главная обратная связь полностью компенсируется положительным сигналом полной модели объекта как

линейном упредителе Смита [3]. Система превращается в разомкнутую с передаточной функцией вида:

$$W_{y,x_{зд}}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{зд}p+1)^2} = W_{зд}^{3C}(p) \quad (5),$$

т.е. равной заданной передаточной функции критерия оптимальности (2).

Запишем передаточную функцию оптимального регулятора в виде:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_\Phi(p)}{1-W_\Phi(p)W_{об}(p)} \quad (6),$$

где $W_\Phi(p)$ — передаточная функция фильтра (4), подставленная в передаточную функцию оптимального регулятора (6); она превращает последнюю в известную передаточную функцию оптимального регулятора с динамической компенсацией [1, 3]:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{зд}^{3C}(p)}{W_{об}(p)[1-W_{зд}^{3C}(p)]} \quad (7).$$

На рисунке 1 (b) представлена передаточная функция реального ПИД-регулятора в классической форме [5]:

$$W_p(p) = \frac{k_p(T_{и}p+1)(T_{д}p+1)}{T_{и}p\left(\frac{T_{д}}{N}p+1\right)} = \frac{1,07(70,3p+1)(11,44p+1)}{70,3p(1,14p+1)} \quad (8),$$

где k_p — коэффициент передачи; $T_{и}$ — время интегрирования; $T_{д}$ — время дифференцирования; $N = 10$ — коэффициент для расчета балластной постоянной времени реального регулятора.

Расчет параметров динамической настройки ПИД-регулятора проведен по следующим формулам [5]:

$$k_p = \frac{0,482T_a}{k_{об}\tau} = \frac{0,482 \cdot 70,3}{1,488 \cdot 28,6} = 1,07 \quad (9).$$

Здесь T_a — время разгона, τ — запаздывание. Их численные значения определяют по методу Кумпфюллера аппроксимации переходных характеристик в виде инерционного звена с запаздыванием [6].

Время интегрирования ПИД-регулятора равно:

$$T_{и} = T_a = 70,3 \text{ с} \quad (10),$$

а время дифференцирования равно:

$$T_d = 0,4\tau = 0,4 \cdot 28,6 = 11,44 \text{ с} \quad (11).$$

Балластную постоянную времени регулятора рассчитываем по формуле:

$$T_6 = \frac{T_d}{N} = \frac{11,44}{10} = 1,14 \text{ с} \quad (12).$$

Графики переходных процессов сравниваемых САР при отработке скачка задания, внутреннего и внешнего возмущения приведены на рисунке 2.

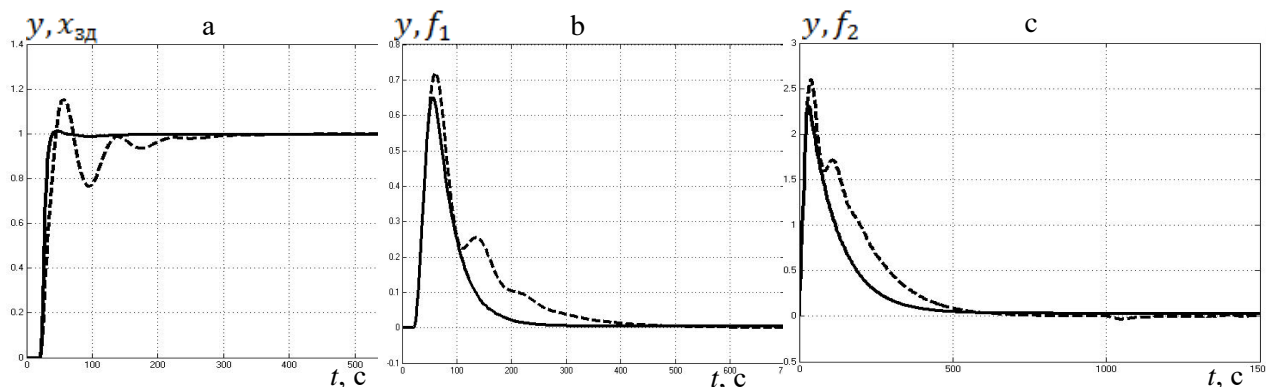


Рисунок 2. Графики переходных процессов сравниваемых САР при отработке скачка задания (а), внутреннего возмущения (б) и внешнего возмущения (с)

Из анализа графиков переходных процессов при основных воздействиях сравниваемых систем следует, что при отработке задания (рисунок 2 (а)) время регулирования оптимального регулятора с динамической компенсацией (сплошная линия) в 3,5 раза меньше, чем у реального ПИД-регулятора (штрихпунктирная линия). Также отсутствует перерегулирование, которое у ПИД-регулятора составляет 14%.

При отработке внутреннего возмущения (рисунок 2 (б)) время регулирования оптимального регулятора в 2 раза меньше, чем у реального ПИД-регулятора. При этом площадь ошибки регулирования в 1,5 раза меньше, чем у ПИД-регулятора, а максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшилась на 10%.

При отработке крайнего внешнего возмущения использовалась передаточная функция в виде инерционного звена первого порядка:

$$W_B(p) = \frac{k_B}{T_B p + 1} = \frac{10}{97,5p + 1} \quad (13),$$

где k_B – коэффициент передачи; T_B – постоянная времени, с.

Видно, что максимальная динамическая ошибка регулирования оптимального регулятора с динамической компенсацией уменьшилась на 13%, время регулирования — на 25%, а площадь ошибки регулирования — на 41% по сравнению с реальным ПИД-регулятором.

Таким образом можем заключить, что предложенный способ структурно-параметрического синтеза оптимального регулятора с динамической компенсацией обеспечивает повышение качества регулирования по сравнению с типовым классическим ПИД-регулятором при всех основных воздействиях.

Список литературы:

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления. / Под ред. Н.Д. Егупова. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 748с.
2. Кузьмицкий, И.Ф. Теория автоматического управления: учебник для студентов специальностей “Автоматизация технологических процессов и производств”, “Автоматизация паротурбинных установок и ядерных реакторов АЭС”, “Информационные технологии и управление в технических системах” / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010 – 574 с.
3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под общей ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 197с.
4. Сорока, Э.М. Золотые сечения процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонизации систем / Э.М. Сорока. М.: Ком-Книга, 2006. – 264 с.
5. Aidan, O`Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules / O`Dwyer Aidan. – 3rd Edition. – Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press, 2009. – 564 p.
6. Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского / Х. Гурецкий. – М., “Машиностроение” 1974. – 328с.