

## **СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ САУ ВЫСОКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ**

**Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Воюш Н.В.**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Теория автоматического управления указывает направления улучшения качества и повышения динамической точности систем автоматического регулирования в переменных режимах на базе современных математических методов и технических средств. Одна из главных целей состоит в раскрытии объективного характера системных противоречий и разработке методов их преодоления. Проектированию систем автоматического управления (САУ) высокой динамической точности, на основе традиционной теории автоматического управления, препятствует ряд основных принципиальных проблем, снижающих эффективность использования промышленных регуляторов серийного производства: повышение точности экспериментальной идентификации объектов с запаздыванием; формирование показателей существенного улучшения качества САУ при основных воздействиях; выбор типа регулятора и метода его оптимальной динамической настройки; решение проблемы технического противоречия между быстродействием и устойчивостью системы; решение проблемы физической реализуемости оптимальных регуляторов и инвариантных систем; сохранение высокого качества регулирования во всем диапазоне изменения нагрузок объекта.

Решение этих проблем позволяет существенно повысить качество управления технологическими параметрами сложных объектов, например, ТЭС и АЭС во всем диапазоне нагрузок теплоэнергетических объектов при глубоких возмущениях. Это приводит к повышению экономичности, надежности, долговечности и экологичности работы теплоэнергетического оборудования.

Основные трудности идентификации объектов заключаются в четкой математической формулировке задачи, которые можно преодолеть с помощью соответствующих методов аппроксимации, например используемых в работах [1÷4]. Так, в работе [1] впервые было предложено для объектов с запаздыванием использовать инерционные звенья второго порядка с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия. В работе [3] приведена универсальная методика определения динамики объектов регулирования передаточными функциями различной структуры. В работе [1] предложен метод полной компенсации в частном виде для расчета настроек ПИ- и ПИД-регуляторов с критерием оптимальности в виде колебательного звена с коэффициентом демпфирования, равным  $\xi = 1/\sqrt{2}$ , обеспечивающим максимальное

быстродействие при обработке скачка задания. Вместе с тем при использовании для выбора регулятора из ряда типовых и определения параметров его динамической настройки в методе полной компенсации в общем виде предложен критерий оптимальной обработки скачка задания в виде инерционного звена первого порядка с условным запаздыванием, численное значение которого равно времени разгона [2]. Однако при этом в большинстве случаев оптимальная передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию не будет соответствовать структуре передаточной функции объекта по каналу управляющего воздействия и графики переходной характеристики системы будут лишь приближаться к заданной. Для устранения этого недостатка критерий оптимальности при обработке скачка задания целесообразно представить в виде следующей заданной передаточной функции системы [5]:

$$W_{3д}(p) = \frac{e^{-\tau_{3д}p}}{(T_{3д}p + 1)^{n-m}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{3д}$  – заданное значение запаздывания равно условному запаздыванию объекта по каналу регулирующего воздействия;  $T_{3д}$  – заданное значение постоянной времени критерия оптимальности, численное значение которой определяет требуемые прямые показатели качества обработки скачка задания;  $n, m$  – соответственно порядок знаменателя и числителя передаточной функции объекта по регулирующему воздействию.

Критерий оптимальности обработки задания (1) входит в передаточную функцию оптимального регулятора с динамической компенсацией [4]:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{W_{3д}(p)}{W_{об}(p)[1 - W_{3д}(p)]}. \quad (2)$$

Здесь  $W_{об}(p)$  – передаточная функция объекта по управляющему воздействию:

$$W_{об}(p) = W_{об}^o(p)e^{-\tau_y p}, \quad (3)$$

где  $W_{об}^o(p)$  – часть передаточной функции объекта, которая не содержит условного запаздывания  $\tau_y$ .

Для объектов с запаздыванием по каналу управляющего воздействия передаточную функцию оптимального регулятора (2) целесообразно представить в виде:

$$W_p^{opt}(p) = W_\phi(p) \frac{1}{1 - W_{3д}(p)}, \quad (4)$$

где передаточная функция фильтра будет физически реализуема и равна:

$$W_\phi(p) = \frac{W_{3д}(p)}{W_{об}(p)} = \frac{W_{3д}^o(p)e^{-\tau_y p}}{W_{об}^o(p)e^{-\tau_y p}} = \frac{W_{3д}^o(p)}{W_{об}^o(p)}. \quad (5)$$

В этом случае порядок числителя передаточной функции фильтра, компенсатора динамики объекта, равен порядку знаменателя. Это позволяет обеспечить качество регулирования САУ, равное заданному (1), и добиться оптимальной отработки не только задания, но и внутренних и крайних внешних возмущений, а также реализовать структуру и настройки типовых регуляторов на базе передаточных функций оптимальных регуляторов, приближая качество регулирования при основных воздействиях к оптимальным переходным процессам САУ с динамической компенсацией.

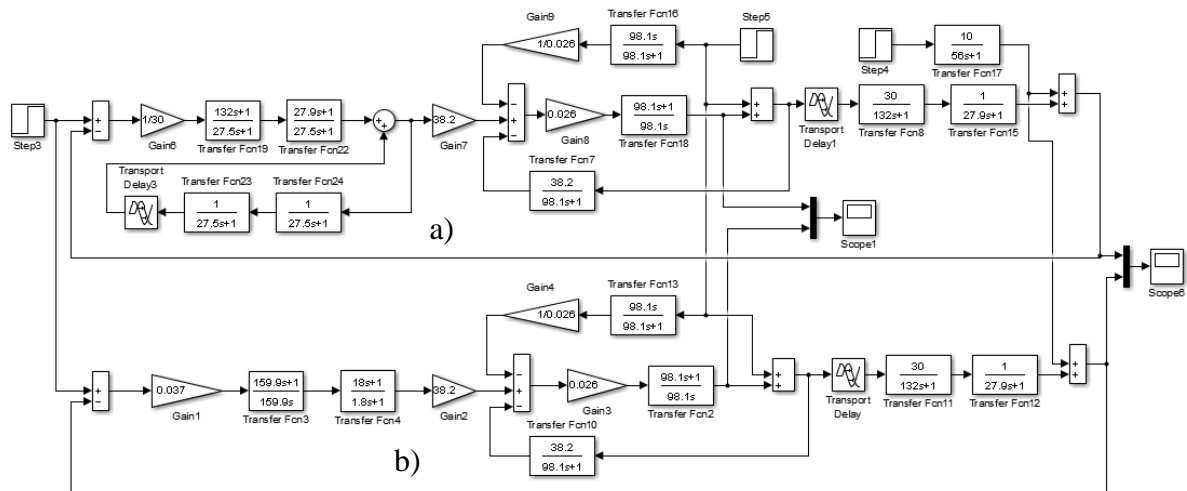


Рис. 1. Схемы моделирования переходных процессов сравниваемых двухконтурных КСАР

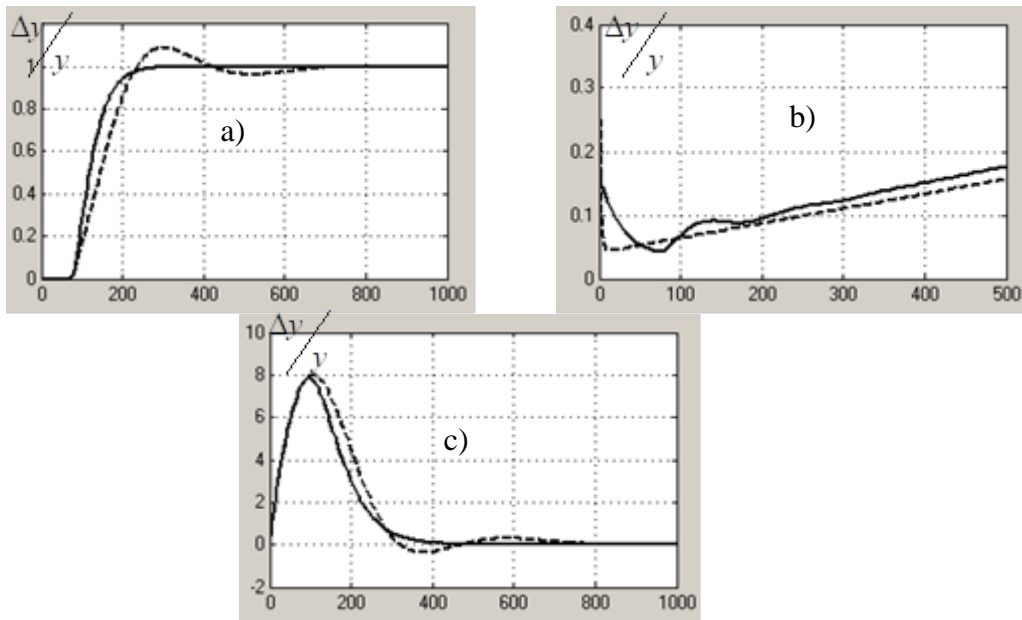


Рис. 2. Графики переходных процессов в сравниваемых КСАР с корректирующим регулятором на базе передаточной функции оптимального регулятора (б) и реального ПИД-регулятора

На рис. 1 приведены структурные схемы моделирования переходных процессов в двухконтурной каскадной системе автоматического

регулирования (КСАР) с корректирующим регулятором (КР) на базе оптимального регулятора (схема *a*) и реального ПИД-регулятора с настройкой по методу полной компенсации в общем виде [4] (схема *в*). В обеих схемах внутренние контура реализуют динамику усилителя с единичным коэффициентом передачи, что позволяет структуру и настройки КР реализовать по передаточной функции главного участка, а также добиться полной инвариантности по отношению к наиболее опасному измеряемому внутреннему возмущению [4].

Из анализа переходных процессов (рис. 2, *a*) следует, что график  $Y, X_{зд}$  отработки скачка задания  $X_{зд}$  в системе с реальным ПИД-регулятором (пунктирная линия) колеблется вокруг переходного процесса в системе с оптимальным регулятором (сплошная линия) с небольшим отклонением. Переходные характеристики  $X_{p, \varepsilon}$  обоих вариантов реализации корректирующего регулятора имеют ярко выраженные составляющие реального ПИД-регулятора (рис.2, *в*). При отработке крайнего внешнего возмущения  $y, f_2$  (рис.2, *с*) интеграл по модулю ошибки регулирования в КСАР с реальным корректирующим ПИД- регулятором больше значения соответствующего интеграла в системе с оптимальным регулятором всего на 20%. При этом включение в систему устройств компенсации внешнего возмущения при глубоких изменениях нагрузки уменьшает значение интеграла модуля ошибки регулирования в 11,6 раза по сравнению с типовой КСАР [5]. Для сохранения высокого качества регулирования во всем диапазоне изменения нагрузки объекта необходимо автоматически корректировать параметры динамической настройки и модели САУ в функции нагрузки. Экспресс-методы оптимизации САУ высокой динамической точности прошли апробацию на котлах ТГМП-114 и БКЗ-320-140 Лукомльской ГРЭС и Гродненской ТЭЦ-2 соответственно могут быть рекомендованы для широкого внедрения.

1. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. - Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 192с.
2. Кулаков, Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: Учеб. пособие / Г.Т. Кулаков. – Мн.: УП и Технопринт, 2003. – 135с.
3. Кулаков, Г.Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулаков. Минск: Вышэйшая школа, 2017. 238с.
4. Теория автоматического управления: учебное пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2022. – 197с.
5. Кулаков, Г.Т. Современная теория и практика автоматизации теплоэнергетических процессов / Г.Т. Кулаков, А.Т. Кулаков // Тезисы доклада, материалы IX МНПК «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино - и приборостроении» / ред. кол. : Маляревич А.М. (гл. ред.) [и др.]; Минск: Бизнессофт, 2021. С98-100.