

где a – значение уставки; D – диапазон изменения параметра.

Для проверки отображения действующих значений технологических параметров и признаков недостоверности на аналоговые входы ПТК подаются соответствующие сигналы (с помощью средств ISaGRAF и дополнительно по электрическим цепям от задатчиков эталонных сигналов). Учитывается визуальный контроль изменений на видеокдрах.

Выводы

По разработанной методике были проведены сертификационные испытания ПТК "Торнадо" и признано его соответствие требованиям норматив-

Сердюков Олег Викторович – канд. техн. наук, руководитель, Скворцов Алексей Николаевич – аспирант, Тимошин Александр Иванович – научный сотрудник, ведущий инженер Инженерного центра № 6 Института Автоматики и Электроники СО РАН, Дорошкин Александр Владимирович – ведущий инженер, Тимиртдинов Юрий Анатольевич – инженер программист компании "Модульные Системы Торнадо".

Контактный телефон (3832) 39-93-52.

E-mail: info@tornado.nsk.ru Http://www.tornado.nsk.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАСКАДНЫХ АСР

**В.П. Плюто, И.И. Дубровский, В.Л. Лукьянов,
В.И. Дубровский (РХТУ им. Д.И. Менделеева)**

Исследованы каскадные автоматические системы регулирования (АСР), которые наиболее широко используются среди многоконтурных систем управления. Эффективность каскадных АСР зависит от выбора оптимальных параметров настройки регуляторов как основного, так и вспомогательного контура. Последующее моделирование на ПК каскадной АСР позволяет выйти на заданные критерии качества регулирования на стадии проектирования.

Наиболее распространенной АСР с усложненной структурной схемой является каскадная система. Каскадные системы могут быть использованы для улучшения качества регулирования в том случае, если в объекте помимо основной регулируемой величины x имеется вспомогательная величина x_1 , которая имеет меньшее значение запаздывания и инерционности по отношению к основным возмущениям объекта и регулирующему воздействию, чем основная регулируемая величина x . Этот принцип обеспечивает более высокое быстродействие работы вспомогательного регулятора $1P$ сравнительно с основным регулятором P .

Важно отметить, что при этом вспомогательная величина x_1 неоднозначно определяет протекание ТП и не позволяет исключить из контура регулирования основную регулируемую величину x .

В качестве объекта исследований была выбрана ректификационная колонна, у которой необходимо поддерживать заданный состав кубового продукта за счет целенаправленного изменения расхода пара, поступающего в кипятильник – объект регулирования. Задача АСР по стабилизации состава кубового продукта сводится к обеспечению постоянной температуры в нижней части колонны. Возмущающими воздействиями являются: давление пара, расход, температура, теплоемкость исходной смеси, состояние поверхности теплообменника и др.

Исходя из конкретных условий работы теплообменника было установлено, что основным возмущением (по величине и частоте возникновения) является давление пара. Компенсировать колебания давления пара (a , следовательно, колебания температуры насыщенного пара) можно с помощью регулятора давления. Объектом регулирования такой АСР является небольшой участок паропровода, имеющий запаздывание $\tau = 0,5 - 1$ с и постоянную времени $T = 2 - 3$ с, что обеспечивает регулятору давления очень высокое быстродействие и, следовательно, хорошее качество регулирования давления пара.

Но регулятор давления не компенсирует прочие возмущения. Поэтому для компенсации прочих возмущений необходимо предусмотреть регулятор температуры. Объектом регулирования АСР температуры является кипятильник, имеющий значительно худшие динамические характеристики, чем отрезок трубопровода АСР давления. Промышленные теплообменники имеют запаздывание $\tau = 25 - 30$ с и постоянную времени $T = 100 - 150$ с. Такие характеристики объекта регулирования не позволяют получить качество регулирования, как в АСР давления. Но, как уже отмечалось выше, прочие возмущения относительно небольшие по величине и нечастые. Поэтому АСР температуры обычно обеспечивает требуемое качество регулирования путем изменения количества подаваемого пара.

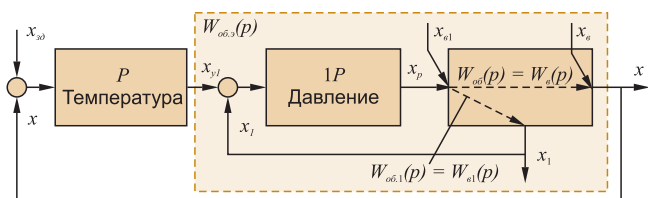


Рис. 1. Структурная схема каскадной АСР при совпадении передаточных функций по каналу регулирования и по каналу возмущения, где x – основная регулируемая величина – температура на выходе из теплообменника; x_1 – вспомогательная регулируемая величина – давление пара, поступающего в кипятильник; x_{e1} – прочие возмущения; $1P$ – вспомогательный регулятор (давления); P – основной регулятор (температуры); $W_{об.з}(p)$ – передаточная функция по каналу регулирования; $W_{об.п}(p)$ – передаточная функция по каналу возмущения; $W_{об.1}(p)$ – передаточная функция по вспомогательному каналу регулирования; $W_{об.в}(p)$ – передаточная функция по вспомогательному каналу возмущения

Но кипятильник ректификационной колонны имеет одно регулирующее воздействие – подачу пара. Поэтому реализацию двух АСР (давление и расход пара) можно осуществить только путем установки на паропроводе последовательно двух регулирующих клапанов – АСР давления и расхода пара, что имеет следующие недостатки:

1. регулирующий орган является наиболее слабым звеном в АСР с точки зрения надежности. Установка двух клапанов еще более понижает надежность системы регулирования и требует дополнительного увеличения капитальных и эксплуатационных затрат;

2. для обеспечения работы АСР необходимо на клапане иметь некоторый перепад давления, который означает частичную потерю давления, что на линии насыщенного пара снижает температуру последнего, вызывает уменьшение перепада температуры в теплообменнике, требует большей поверхности теплообмена, и, значит, является причиной увеличения капитальных затрат.

Чтобы избежать указанных выше недостатков регулятор температуры включается не на клапан, а на задатчик регулятора давления. Таким образом, формируется каскадная АСР, где основные возмущения системы x_{e1} (давление пара) компенсируются регулятором давления, обеспечивающим быстрое подавление основных возмущений в самом начале их возникновения. Другие сравнительно редкие и небольшие возмущения x , а также оставшиеся небольшие отклонения компенсируются регулятором температуры путем изменения задания регулятору давления. Регулирование, осуществляемое в каскадной АСР, производится за счет целенаправленного изменения давления пара, поступающего в кипятильник, а возмущением температуры в нем является стохастические изменения давления того же пара в паропроводе. Таким образом, в данном случае каналы регулирования и возмущения совмещаются, так как регулирующий клапан устанавливается на линии возмущения. Структурная схема каскадной АСР приведена на рис. 1.

Для данного объекта передаточные функции: $W_{об}(p) = W_e(p)$ и $W_{об.1}(p) = W_{e1}(p)$. В системе каскадного регулирования участвуют одновременно два регулятора (а иногда и три), выбор типа регулятора и определение параметров его настройки в общем случае оказывается более сложной операцией, чем определение параметров настройки одноконтурной АСР.

Рассмотрим основные уравнения, которые рекомендуется использовать для приближенных расчетов двухкаскадных систем.

Если инерционность регулируемого объекта по каналу вспомогательной величины x_1 значительно меньше инерционности по каналу основной регулируемой величины x , то быстродействие регулятора $1P$ будет значительно выше быстродействия регулятора P . Тогда изменение задания регулятору $1P$ (величина x_{y1}) происходит относительно медленно и регулятор $1P$ успевает поддерживать вспомогательную величину x_1 почти точно на заданном значении, т. е. можно записать, что $x_1 \approx x_{y1}$.

В этом случае объектом регулирования для регулятора P будет являться комплекс, состоящий из вспомогательного регулятора $1P$ и объекта регулирования. Назовем этот комплекс эквивалентным объектом регулирования и передаточную функцию его обозначим $W_{об.э.}(p)$.

Эта передаточная функция может быть найдена из системы уравнений:

$$\begin{aligned} x(p) &= W_{об}(p)x_p(p); \\ x_1(p) &= W_{об.1}(p)x_p(p); \\ x_1(p) &\approx x_{y1}(p). \end{aligned}$$

Исключив $x_1(p)$ и $x_p(p)$, получим

$$W_{об.э.}(p) = \frac{x(p)}{x_{y1}(p)} = \frac{W_{об}(p)x_p(p)}{W_{об.1}(p)x_p(p)} = \frac{W_{об}(p)}{W_{об.1}(p)}, \quad (1)$$

или

$$W_{об.э.}(i\omega) = \frac{W_{об}(i\omega)}{W_{об.1}(i\omega)}.$$

Напомним, что для определения $W_{об.э.}(i\omega)$ необходимо разделить модули $A_{об}(\omega)/A_{об.1}(\omega)$ и вычесть фазы $\varphi_{об}(\omega) - \varphi_{об.1}(\omega)$ при одинаковых частотах.

На вход регулятора $1P$ действуют две параллельные системы:

1. основной контур с передаточной функцией $W_{об}(p)W_p(p)$;
2. вспомогательный контур с передаточной функцией $W_{об.1}(p)$.

Передаточная функция системы параллельно включенных звеньев равна сумме передаточных функций звеньев. Поэтому эквивалентный объект вспомогательного регулятора $1P$:

$$W_{об.э.1}(i\omega) = W_{об.1}(i\omega) + W_{об}(i\omega)W_p(i\omega). \quad (2)$$

При существенной разноинерционности характеристик $W_{об}(i\omega)$ и $W_{об.1}(i\omega)$ слагаемое $W_{об}(i\omega)W_p(i\omega)$ обычно пренебрежимо мало и может не учитываться.

Каскадные системы обычно реализуются следующими регуляторами для:

а) основного регулятора P используется ПИ-регулятор;

б) вспомогательного регулятора $1P$ используется П-регулятор. Его статическая погрешность ликвидируется изменением его задания основным регулятором P .

В заключение еще раз отметим, что каскадные системы могут значительно улучшить качество регулирования, но только в том случае, если объект регулирования имеет малоинерционную вспомогательную величину, быстро реагирующую на основные возмущения. Исследования каскадных АСР показали, что быстрое действие регулятора $1P$ прежде всего определяется временем запаздывания по вспомогательному каналу регулирования (рис. 2).

Поэтому, если в объекте имеется несколько параметров, которые можно использовать в качестве вспомогательной величины, то следует выбрать параметр с минимальным запаздыванием.

Но не всегда в каскадных системах объекты регулирования имеют совмещенные каналы регулирования и возмущения. Примером такого объекта может быть барабанная сушилка. Основным регулируемым параметром в сушильных агрегатах является влагосодержание продукта на выходе из сушилки. Прямое измерение влажности сыпучего материала весьма затруднительно и поэтому часто влажность определяется по косвенному показателю – температуре материала. Входными переменными процесса сушки являются влажность поступающего на сушку материала (возмущение) и температура теплоносителя (регулирующее воздействие). Барабанные сушилки характеризуются распределенными параметрами по длине барабана, большой постоянной времени по каналу регулирования. Для улучшения качества регулирования используются каскадные АСР, в которых основной регулирующей величиной является температура продукта на выходе из сушилки, а вспомогательной величиной – температура материала в первой трети длины барабана, при этом регулирующим воздействием является количество подаваемого в топку топлива. Структурная схема такой каскадной АСР приведена на рис. 3.

Расчет параметров настройки для основного и вспомогательного контура такой АСР следует вести по стандартному сценарию, используя формулы (1) и (2).

При решении вопроса о целесообразности использования каскадной АСР для объекта с разделенными каналами регулирования и возмущения (рис. 3) следует иметь в виду, что эффективность таких каскадных АСР значительно меньше, чем эффектив-

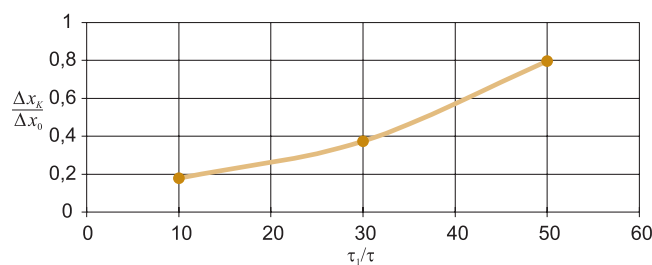


Рис. 2. График зависимости динамической ошибки переходного процесса от величины отношения: τ_1/τ . $\tau = const$ – запаздывание по основному каналу; τ_1 – запаздывание по вспомогательному каналу; Δx_K – динамическая ошибка каскадной АСР; $\Delta x_0 = const$ – динамическая ошибка одноконтурной АСР

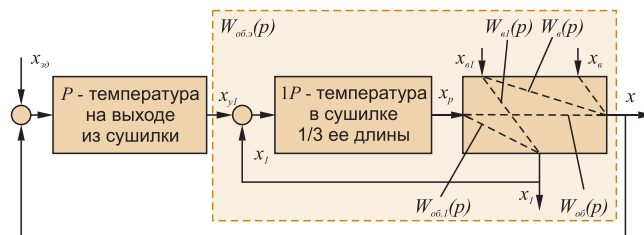


Рис. 3. Структурная схема двухкаскадной системы с разделенными каналами регулирования и возмущения

ность АСР с совмещенными каналами регулирования и возмущения (рис. 1).

Для объектов с разделенными каналами регулирования и возмущения (рис. 3)

$$\tau_{\sigma} \leq \tau_{\sigma 1} + \tau_{\sigma 2}, \quad (3)$$

где τ_{σ} – запаздывание по каналу возмущения основной регулируемой величины x ; $\tau_{\sigma 1}$ – запаздывание по каналу возмущения вспомогательной величины x_1 , $t_{об}$ – запаздывание по каналу регулирования основной регулируемой величины x .

Регулирующее воздействие x_p вспомогательного контура запаздывает по отношению к возмущению $x_{в2}$ на величину x , что может привести к отрицательному эффекту, т.е. каскадная система будет иметь большую динамическую ошибку, чем одноконтурная АСР.

В таких случаях, для улучшения качества регулирования объекта с разделенными каналами регулирования и возмущения необходимо проанализировать возможности измерения возмущений и использовать комбинированную АСР.

При проведении математического моделирования переходных процессов использовался программный комплекс URA99, созданный на кафедре "Кибернетика химико-технологических процессов" РХТУ им. Д.И. Менделеева в лаборатории "ТАУ и МПСУ"; на данный программный продукт выдано Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ¹.

Плюто Виктор Павлович – канд. техн. наук, доцент, **Дубровский Илья Иванович** – канд. техн. наук, доцент, **Лукьянов Василий Львович** – инженер-программист, **Дубровский Владимир Ильич** – студент кафедры "Кибернетика химико-технологических процессов" РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Контактные телефоны: (095) 978-91-78, 978-65-89.

¹ Свидетельство № 2001610194 от 22 февраля 2001 г. Официальный бюллетень российского агентства по патентам и товарным знакам. Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем, №2 (35), 2001, с.136