

У статті викладається спосіб побудови каскадної системи управління з безпосереднім використанням моделі об'єкта в алгоритмах керування та автоналаштуванням, наведено результати математичних досліджень

Ключові слова: адаптація, внутрішня модель, оптимізація, каскадна система керування

В статті излагается способ построения каскадной системы управления с непосредственным использованием модели объекта в алгоритмах управления и автоналажкой, приведены результаты математических исследований

Ключевые слова: адаптация, внутренняя модель, оптимизация, каскадная система управления

This article represents a method of constructing of cascade control system with direct use of the object model in control algorithms and with autotuning, describes results of mathematical research

Keywords: adaptation, internal model, optimization, cascade control system

УДК 621.311:681.5

РЕГУЛИРУЮЩИЙ АДАПТИВНЫЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ С МОДЕЛЬЮ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Степанец

Ассистент

Кафедра автоматизации

теплоэнергетических процессов

Национальный технический университет

Украины «Киевский политехнический

институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, 03056

Контактный тел.: 066-375-19-82

E-mail: aard@bk.ru

1. Почему контурами энергетических установок непросто управлять?

Теплоэнергетические объекты управления имеют ряд особенностей, затрудняющих управление ими: изменение в широких пределах параметров из-за нагрузки и с течением времени, взаимовлияние через объект большого количества технологических параметров, нелинейности, значительные запаздывания в информационных каналах. Примерами таких объектов являются энергоблоки, отдельные котлоагрегаты, системы отопления и кондиционирования, печи, сушилки и т.д. Показательным в этом плане является прямоточный котлоагрегат, к системам автоматического управления (САУ) которого выдвигаются высочайшие требования к надежности, экономичности и эффективности. Работу САУ усложняют многосвязность контуров управления, сложность настройки регуляторов и поддержания технологических параметров в допустимых пределах. Для котлоагрегата характерно работать в различных режимах при разных нагрузках, большом количестве контролируемых и неконтролируемых возмущений, с энергоносителями различных характеристик. Как показывает опыт эксплуатации, штатные системы регулирования недостаточно хорошо функционируют при больших возмущающих воздействиях, в том числе при глубоких изменениях нагрузки. При этом регулируемые параметры выходят за допустимые регламентом значения, что приводит к снижению надежности оборудования, а в некоторых случаях - к срабатыванию аварийных защит котла и остановке энергоблока. В долгосрочной перспективе это способствует повышенному износу элементов котлоагрегата и перерасходу энергоносителей. Соблюдение норм технического ре-

гламента возможно только путем использования современных систем автоматического управления.

Кроме этого, теплоэнергетическая отрасль характеризуется консервативностью и инерционностью внедрения новых решений по автоматизации, что обусловлено высокой конечной стоимостью оборудования и длительной процедурой принятия в эксплуатацию. Поэтому для повышения эффективности работы объекта необходимо найти золотую середину между новейшими достижениями автоматизации и их преемственностью с традиционными методами управления.

2. Знание души объекта - путь к качественному регулированию

Принцип структурно-параметрической оптимизации САУ с обратной связью говорит [1], что регулятор должен содержать динамическое звено с передаточной функцией, равной или близкой обратной передаточной функции объекта управления. Логичным шагом при синтезе системы управления выглядит использование регулятора с внутренней моделью (ИМС-регулятор, Internal model control) [2, 3, 4]. Для него характерно включение выбранной структуры модели в состав регулятора, что позволяет автоматически получить параметры регулятора с высокими показателями качества управления. В алгоритме управления используется модель объекта, повторяющая с достаточной точностью динамику установки, и регулятор [5]. Регулятор представляет собой инвертированную модель объекта управления. Точнее, ту часть, какая может быть обращена - транспортное запаздывание в математическом описании регулятора не фигуриру-

ет. Кроме того, инвертированную модель дополняют апериодическим фильтром, порядок которого должен быть не ниже, чем у исходной модели. Фильтр уменьшает влияние высокочастотных помех и влияет на управляющее воздействие регулятора, однако у него есть ещё одна, более важная роль. Постоянная времени фильтра, фактически, является отдельным параметром настройки системы, отвечающим за робастность системы.

Варьируя значение этого параметра, можно ослабить влияние ошибок идентификации модели и дрейфа объекта на качество регулирования.

Например, для контура управления перегревом первичного пара, объект по каналу «изменение количества воды на впрыск — температура после пароперегревателя» описывается передаточной функцией

$$W_{об}(s) = \frac{0,43e^{-15s}}{(78s+1)(27s+1)} \quad (1)$$

Графики переходных процессов в одноконтурной системе с ИМС-регулятором иллюстрируют влияние постоянной фильтра на динамику изменения задания (рис. 1) и отработки возмущения (рис. 2). Тут модель объекта аппроксимирована инерционным звеном первого порядка с запаздыванием. Параметры модели: $K_{обм} = 0,43^{\circ}\text{C}/\% \text{РО}$; $T_{обм} = 110\text{A}$; $\tau_{обм} = 20\text{A}$, %РО — положение регулирующего органа. Таким образом симулирована ситуация, когда обработка экспериментальных данных вводит дополнительную погрешность в расчет системы из-за идентификации объекта. Постоянная фильтра λ варьировалась в диапазоне от $0,5\tau_{обм}$ до $3\tau_{обм}\lambda$

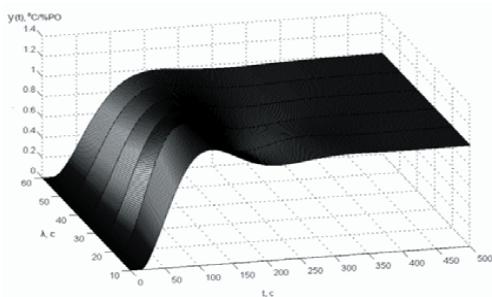


Рис. 1. Пространственная модель переходных процессов при отработке задания в зависимости от значения параметра λ

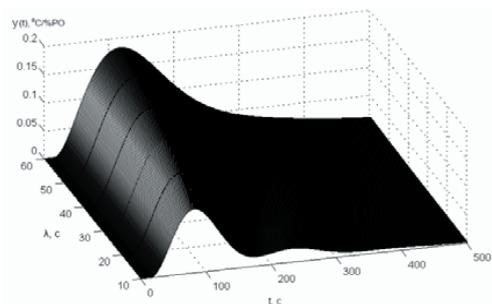


Рис. 2. Пространственная модель переходных процессов при отработке возмущений на входе объекта в зависимости от значения параметра λ

Как видно на приведенных графиках, увеличение λ обеспечивает более плавное регулирование, приближая переходный процесс к апериодическому, но при этом несколько увеличивается время регулирования и динамическая ошибка при отработывании возмущений. Несмотря на это, в любом из вариантов прослеживается качественная реакция систем на изменение задания и подавление возмущений за время, не превышающее $3T_{обм}$. Колебательность переходных процессов при малых λ связана с влиянием погрешности аппроксимации объекта моделью и устраняется с увеличением постоянной фильтра регулятора.

Теплоэнергетические объекты обладают существенной инерционностью, поэтому на базе ИМС-регулятора разработана каскадная система автоматического регулирования (рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения: $W_p(s)$ - главный ИМС-регулятор, $W_{PI}(s)$ - ИМС-регулятор внутреннего контура, $W_{опер}(s)$ и $W_{ин}(s)$ - передаточные функции опережающей и инерционной частей объекта, $W_{фи}(s)$ - фильтр регулятора $W_{PI}(s)$. Элементы с индексом «М» соответствуют моделям описанных частей объекта. Инерционная и опережающая части, расположенные последовательно в регуляторе, повторяют поведение всего объекта в целом. Стабилизирующий контур представляет собой систему с регулятором с внутренней моделью. Для улучшения отработки возмущений, так необходимого в задачах стабилизации, используется ИМС-регулятор с двумя степенями свободы. Так разрешается компромисс значений настроечных параметров для качественной отработки заданий и противодействия разного рода возмущениям. Система при этом обеспечивает как эффективную отработку заданий, так и сохранение требуемого значения технологического параметра в условиях возмущений.

Корректирующий же контур использует в качестве модели объекта описание инерционной части, но с транспортным запаздыванием, равным запаздыванию всего объекта, и поправкой на динамику внутреннего контура. Такое построение возможно ввиду особенностей отработки регулятором с внутренней моделью управляющих воздействий - близкий к апериодическому переходный процесс со временем, нарастающим экспоненциально, компенсируется постоянной фильтра регулятора.

Передаточная функция компенсатора имеет вид [2]:

$$W_{ПК}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i}{(\epsilon s + 1)^n}; \quad \alpha_0 \equiv 1, \quad (2)$$

где n - количество полюсов в модели возмущений в виде передаточной функции $W_{возм}(s)$, которые должны быть скомпенсированы нулями уравнения (3):

$$(1 - W_{оперМ}(s)W_{PI}(s)W_{ПК}(s)) \cdot (3)$$

Сравнение работы предложенной структуры с традиционной системой с двумя ПИ-регуляторами показывает (рис. 4) выигрыш ИМС-регуляторов в обеспечении минимального перерегулирования, близости переходного процесса к апериодическому и минимизации времени регулирования.

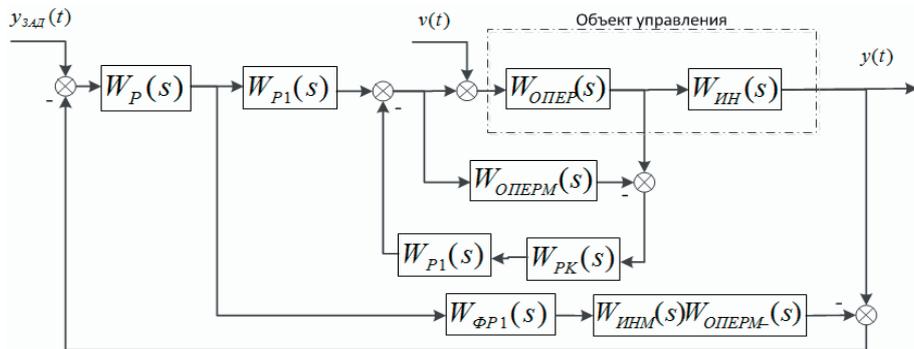


Рис. 3. Каскадная система управления с регуляторами с внутренней моделью

Эти требования часто выдвигаются технологами теплоэнергетических объектов как обязательные к выполнению. На графиках изображены приведенные переходные характеристики в системах после подачи единичного возмущения $v(t)$ на вход объекта управления. Моделировалось поведение системы с объектом, описанным ранее. При сравнении использовалась каскадная система с двумя ПИ-регуляторами, настроенная на минимум интегрального квадратичного критерия качества. Использование системы с типовыми ИМС-регуляторами позволило уменьшить интегральный показатель качества на 11% по сравнению с каскадной системой с ПИ-регуляторами, а использование в стабилизирующем контуре регулятора с двумя степенями свободы - на 40%.

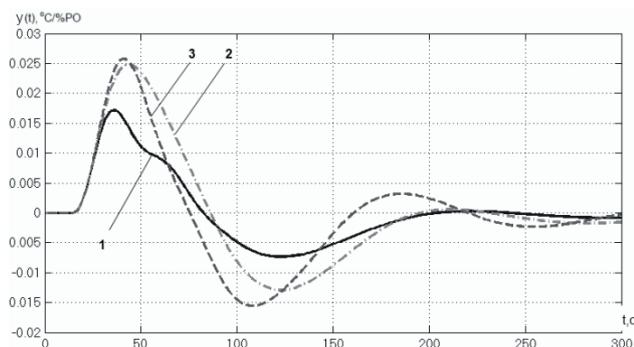


Рис. 4. Графики переходных процессов при обработке возмущений: 1 – каскадная система с ИМС-регуляторами и компенсацией возмущений; 2 – каскадная система с ИМС-регуляторами; 3 – каскадная система с двумя ПИ-регуляторами

При этом для окончательной настройки системы с ПИ-регуляторами потребовалась процедура оптимизации на заданный показатель качества, а в случае с ИМС-системой параметры настройки, полученные после идентификации модели, потребовалось лишь несколько уточнить.

3. След в след с объектом

Особенность ИМС-регуляторов - непосредственное использование модели объекта, может стать камнем преткновения в реализации системы, если модель не будет соответствовать объекту. Этот недостаток устра-

няется дополнением системы контуром идентификации, в результате чего регулятор будет иметь актуальную информацию о динамике объекта.

Особенности теплоэнергетического оборудования, зачастую, накладывают ограничения на процедуру идентификации параметров. Технологическая переменная должна находиться в допустимых пределах, а время идентификации желательно минимизировать, чтоб устранить

вероятность потери контроля над объектом. Методы пассивной идентификации наталкиваются на помехи в виде неконтролируемых возмущений, способные значительно исказить результаты, активные же методы, в основном, требуют полного завершения переходного процесса или сложного тестового сигнала. Если объект можно описать апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием, что допустимо для широкого класса теплоэнергетических контуров, то в качестве решения можно использовать метод, основанный на анализе начального участка переходного процесса [6]. Используя ключевые точки (начало процедуры идентификации, максимум первой производной контролируемой величины) и полученные аналитические зависимости параметров модели от этих точек, можно получить достаточно точный результат, не дожидаясь конца переходного процесса. Время запаздывания определяется как время между подачей тестового ступенчатого сигнала и реакцией объекта, а коэффициент передачи и постоянная времени находятся из зависимостей:

$$K_{об} = \dot{\epsilon}(t_1) \sum_{i=0}^4 a_i t_1^i, T_{об} = \sum_{i=0}^4 b_i t_1^i, \quad (4)$$

где a_i, b_i - константы, зависящие от параметров метода идентификации, t_1 - время достижения первой производной регулируемой величины своего максимального значения, $\dot{\epsilon}(t_1)$ - значение первой производной контролируемой величины в момент времени t_1 .

Защита метода идентификации от помех предусматривается как аппаратными методами в промышленных контроллерах - обработка показаний АЦП и фильтр скользящего среднего, так и программно - с помощью экспоненциального фильтра со значительной постоянной времени, отсекающего высокочастотные помехи.

Таким образом, используя указанный метод, можно обеспечить ИМС-регулятор необходимыми сведениями о работе объекта и обучить эффективному взаимодействию с ним.

4. От автоматизированной системы к автоматическому комплексу

Для работы рассматриваемой системы управления в переменных режимах работы теплоэнергетического оборудования необходимо, чтобы выполнялась ав-

томатическая подстройка. Дополнительный контур автоподстройки представляет собой математически-логический модуль, где определяется необходимость подстройки, формируются необходимые для нее условия и слежение за процессом. Специальными частями модуля обрабатываются данные, снимаемые с объекта, на основе чего подстраиваются регуляторы и модели.

Влияние нагрузки на динамику объекта управления используется для коррекции параметров модели. Выполнив несколько идентификационных экспериментов на разных рабочих режимах, можно сформировать таблицу соответствия моделей нагрузке и использовать для оперативной автоматической подстройки регулирующих элементов. В случае описания объекта инерционным звеном с запаздыванием, предполагаемым в описанном методе идентификации, общий вид регуляторов внутреннего и внешнего контуров каскада имеет вид:

$$W_{P1}(s) = \frac{\left[\sum_{i=0}^n T_{\text{ОПЕР}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] s + 1}{\left[\sum_{i=0}^n K_{\text{ОПЕР}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] \cdot (\lambda_{\text{ОПЕР}} s + 1)}, \quad (5)$$

$$W_P(s) = \frac{\left[\sum_{i=0}^n K_{\text{ОПЕР}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] \cdot \left(\left[\sum_{i=0}^n T_{\text{ОБМ}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] s + 1 \right)}{\left[\sum_{i=0}^n K_{\text{ОБМ}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] \cdot \left(\left[\sum_{i=0}^n T_{\text{ОПЕР}i} \cdot \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{N - N_j}{N_i - N_j} \right] s + 1 \right) (\lambda s + 1)}$$

где N соответствует текущей нагрузке, а n — количеству идентифицированных режимов работы, индекс «об» соответствует объекту в целом и внешнему контуру, а «опер» — опережающей части объекта и внутреннему контуру регулирования.

Еще одним весомым фактором при внедрении описываемой системы автоматического управления квазистационарными объектами является возможность

ее реализации на промышленных контроллерах, что уменьшит затраты на внедрение АСР и даёт возможность использовать существующие на объекте устройства и средства автоматизации для малозатратной модернизации.

Разработанные алгоритмы могут применяться как в локальных системах автоматики, так и на стороне супервизорного управления всем оборудованием в целом. Оптимальной структурой информационно-управляющей системы является такая, где независимые системы управления нижнего уровня синхронизируются с диспетчерским пунктом для получения дополнительной информации, которая обеспечит эффективную работу контура и командных сигналов от оператора или автоматического блока супервизорного управления. Такая структура повышает надежность всей системы в целом, позволяет работать контура стабилизации в автономном режиме, а оператор может корректировать работу системы и ее настройки с центрального пульта.

Выводы

Предложена каскадная система автоматического управления на базе регуляторов с внутренней моделью. Внутренний контур усовершенствован для компенсации возмущений, что представляет особую ценность в задачах стабилизации.

Используя оперативную актуальную информацию о динамических свойствах объекта, можно добиться высокого качества регулирования во всех предусмотренных режимах работы оборудования.

Объединение структуры регулятора с внутренней моделью, имеющей бесспорные преимущества перед традиционными ПИД-регуляторами в плане обеспечения требуемых показателей качества и настройки системы управления, с эвристическим адаптивным контуром, позволяет спроектировать высокоэффективную и устойчивую к дрейфу параметров объекта систему управления теплоэнергетическими контурами.

Литература

1. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций [Текст] / П.Н. Сенигов – Челябинск: ЮУрГУ. – 2001. – 93с.
2. Brosilow, C. Techniques of Model-Based Control [Текст] / C. Brosilow, B. Joseph. – USA : Prentice Hall, 2002. – 704 p.
3. Leva, A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization [Электронный ресурс] / Leva, A., Cox C., Ruano A. – IFAC Professional Brief. – Режим доступа \www/ URL: <http://www.ifac-control.org/publications/list-of-professional-briefs> – 1.03.2011 p. – Загл. с экрана.
4. Daniel E. Rivera. Internal Model Control: A Comprehensive View [Текст] / Daniel E. Rivera – Department of Chemical, Bio and Materials Engineering College of Engineering and Applied Sciences Arizona State University, Tempe, Arizona, 1999. – 20 pp.
5. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. - №2. – С. 90-98.
6. Мовчан, А. П. Идентификация объектов управления в адаптивных системах управления [Текст] / А.П. Мовчан, В.Ф. Мысак, А.В. Степанец // Сучасні наукові дослідження – 2006: матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. – Д.: Наука і освіта, 2006. – С. 60-63.