

На правах рукописи



МАРШАЛОВ Евгений Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2012

Работа выполнена на кафедре систем управления ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель

Тверской Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Андрюшин Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор, НИУ «Московский энергетический институт», заведующий кафедрой автоматизированных систем управления технологическими процессами

Кондрашин Анатолий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры автоматизации технологических процессов

Ведущая организация

филиал «Калининградская ТЭЦ-2» ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация»

Защита состоится 4 мая 2012 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01

E-mail: uch_sovet@ispu.ru

Автореферат разослан 31 марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Тютиков Владимир Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При автоматизации технологических объектов управления и создании современных многофункциональных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры особые требования предъявляются к регулирующей арматуре. Это связано, прежде всего, с тем, что эффективность работы энергетического оборудования существенно зависит от характеристик исполнительных устройств (ИУ). Поэтому, при проектировании объектов энергетики проблеме выбора регулирующей арматуры всегда уделяли повышенное внимание. Однако, в последнее время, предпочтение стоимостным критериям в ущерб информационно-технологическим привело к появлению некачественной арматуры и соответственно неэффективной работе систем управления.

В условиях реальной эксплуатации тепловых электростанций получение характеристик регулирующей арматуры путем активного эксперимента сопряжено с известными трудностями. В то же время, необходимая информация о состоянии регулирующей арматуры может быть получена путем соответствующей обработки трендов, хранящихся в архиве АСУТП.

Узел регулирования технологической среды, состоящий из электропривода, регулирующего органа (РО) и гидравлической линии (сети) представляет собой единую информационно-технологическую систему. При этом на вид расходной характеристики (РХ) влияет множество факторов, связанных с особенностями топологической структуры трубопроводов, характеристиками насосов, свойствами регулируемой среды, режимами течения и др. Некоторые типы регулирующей арматуры вообще не позволяют иметь линейную расходную характеристику из-за конструктивных особенностей. Поэтому проблема исследования характеристик регулирующей арматуры в условиях электростанции, выявления устранимых и неустранимых дефектов, оптимизации характеристик регулирующих органов в замкнутых автоматических системах регулирования (АСР) является актуальной.

Цель работы заключается в обеспечении эффективности работы энергетического оборудования в широком диапазоне нагрузок путем оптимизации характеристик регулирующих органов в замкнутых автоматических системах регулирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать программно-аппаратный комплекс и методику экспериментального диагностирования характеристик регулирующей арматуры по данным архива АСУТП энергоблока.

2. Выполнить экспериментальные исследования статических характеристик регулирующей арматуры в широком диапазоне нагрузок в каналах управления движением сред и провести анализ экспериментальных материалов.

3. Разработать математические модели гидравлических систем с типовыми (серийного производства) регулирующими органами.

4. Разработать способ алгоритмической оптимизации (линеаризации) нелинейных расходных характеристик регулирующих органов в каналах управления движением сред при изменении параметров гидравлических систем.

Методы исследования. В работе используются методы теории автоматического управления, обобщенного термодинамического анализа, гидродинамики, имитационного моделирования и вычислительного эксперимента.

Научная новизна.

1. Разработан программно-аппаратный комплекс экспериментального исследования характеристик регулирующей арматуры по данным архива АСУТП энергоблока и методика проведения исследований в условиях электростанции.

2. Впервые получены экспериментальные характеристики регулирующей арматуры в составе АСУТП энергоблоков парогазовых установок (ПГУ) и выполнен их анализ. Показано, что практически все типовые регулирующие органы имеют существенно нелинейные статические характеристики, а также как устранимые, так и неустраняемые дефекты.

3. Разработаны математические модели гидравлических систем с типовыми регулируемыми органами в каналах управления движением сред, отличающиеся тем, что учитываются топологические и режимные факторы гидравлической системы.

4. Разработан способ оптимизации (линеаризации) расходных характеристик регулирующих органов в каналах управления движением сред путем корректировки командного сигнала управления на перемещение исполнительного механизма с учетом сигнала невязки по фактическому и оптимальному положению РО.

Практическая ценность работы.

1. Созданная система доведена до уровня программно-аппаратного комплекса диагностирования характеристик регулирующих органов по данным архива АСУТП энергоблока.

2. Разработанные методики позволяют в ходе штатной эксплуатации осуществлять своевременное диагностирование состояния регулирующей арматуры, адекватно планировать ремонты, соответственно повысить срок службы технологического оборудования и экономическую эффективность работы энергоблока.

3. Разработанные модели РО используются при создании тренажеров энергоблоков и в учебном процессе по направлению 220400 «Управление в технических системах».

Автор защищает.

1. Методику диагностирования характеристик регулирующих органов в условиях электростанции и результаты экспериментальных исследований расходных характеристик регулирующих органов.

2. Методику создания моделей гидравлических систем с регулирующими органами и имитационные модели гидравлических систем с типовыми регулируемыми органами.

3. Способ совершенствования расходных характеристик регулирующих органов в каналах управления движением сред путем корректировки командного сигнала управления на перемещение исполнительного механизма с учетом сигнала невязки по фактическому и оптимальному положению РО.

Обоснованность результатов научной работы обусловлена корректным применением методов теории автоматического управления, обобщенного термодинамического анализа, гидродинамики, имитационного моделирования и вычислительного эксперимента. **Достоверность** результатов научной работы обусловлена соответствием расчетных и экспериментальных данных и экспертной оценкой специалистов в области автоматизации.

Экспериментальная часть работы по исследованию характеристик регулирующей арматуры выполнена на энергоблоке ПГУ-450Т филиала «Калининградская ТЭЦ-2» ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация» и энергоблоке ПГУ-325 филиала «Ивановские ПГУ» ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация».

Соответствие паспорту специальности.

Соответствие диссертации формуле специальности

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют формуле специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», объединяющей вопросы математического, информационного, алгоритмического и машинного обеспечения создания автоматизированных технологических процессов и систем управления ими, включающей методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем.

Соответствие диссертации области исследования специальности

Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», а именно:

- п. 4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация» паспорта специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» соответствуют полученные автором математические и имитационные модели гидравлических систем с регулирующими органами, учитывающие конструктивные характеристики регулирующих органов и режимы работы технологического объекта управления.

- п. 14 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» соответствуют методика проведения исследований в условиях электростанции и экспериментальные характеристики регулирующей арматуры, полученные по данным архивов АСУТП энергоблоков.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ (ТУ), 2005, 2007, 2008 гг.); Международной научной конференции «Теория и практика построения и функционирования АСУТП (CONTROL–2008)» (Москва, МЭИ (ТУ), 2008 г.); Всероссийской конференции «Управление и информационные технологии» (Санкт-Петербург, ЛЭТИ, 2008 г.); Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011 гг.); Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, ИГЭУ, 2011 г.); совещании по техническим требованиям к приводам запорной и регулирующей арматуры, применяемой в автоматизации технологических процессов в энергетике, (Тула, ЗАО «Тулаэлектропривод», 2008 г.); научно-технических семинарах кафедры систем управления (2002-2012 гг.) и др.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 24 работах, в том числе в 5-ти статьях по списку ВАК, материалах 9 докладов на конференциях. В ходе исследований получен патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, библиографического списка из 105 наименований. Текст диссертации изложен на 182 страницах, из них 156 страниц основного текста, содержит 139 рисунков, 28 таблиц, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ факторов, влияющих на работу регулирующих органов в АСУТП и анализ особенностей регулирующей арматуры в составе АСУТП. Рассмотрены основные способы корректировки характеристик РО.

В последние годы в энергетике России существенно возросли объемы и интенсивность работ по модернизации систем контроля и управления (СКУ) технологического оборудования тепловых электростанций (ТЭС) и внедрению современных АСУТП на базе программно-технических комплексов сетевой иерархической структуры. Требование ускоренной замены физически и морально устаревших СКУ и информационно-вычислительных систем (ИВС) на современные АСУТП объективно обусловлено снижением эксплуатационной надежности технологического оборудования электростанций и единой энергетической системы России в целом.

Общая характерная особенность современного этапа развития АСУТП – это реализация в полном объеме как информационно-вычислительными системами, так и управляющих функций, реализующих дистанционное дис-

плейное (ручное) управление исполнительными устройствами, автоматическое регулирование, логическое (пуск, останов и др.) и аварийное (технологические защиты и блокировки) управление.

Анализ множества факторов, влияющих на работу регулирующих органов в АСУТП и соответственно на эффективность работы энергоблока в целом, позволил выделить наиболее существенные:

- 1) форма заводской характеристики (линейная, равнопроцентная, S-образная и др.);
- 2) перепад давления на регулирующем органе;
- 3) перепад давления в регулируемой системе.

Типовой узел регулирования включает в себя две подсистемы: контроля и управления. Подсистема контроля, состоящая из преобразователя расхода и аналого-цифрового преобразователя, производит непрерывное измерение текущей величины расхода. Подсистема управления, состоящая из цифро-импульсного преобразователя, усилителя управляющего сигнала, исполнительного механизма и регулирующего органа, отвечает за изменение расхода регулируемого параметра в соответствии с требованиями технологического процесса (рис. 1).

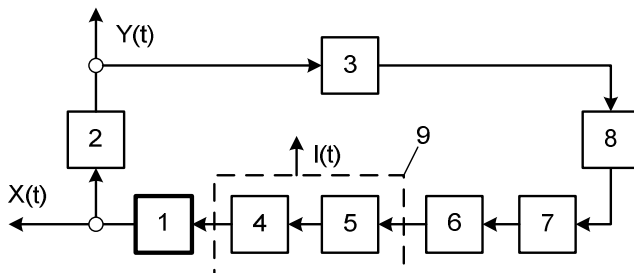


Рис. 1. Типовой узел регулирования:

- 1 – трубопровод; 2 – преобразователь расхода (датчик); 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – регулирующий орган; 5 – исполнительный механизм (привод); 6 – усилитель управляющего сигнала; 7 – цифро-импульсный преобразователь; 8 – контроллер; 9 – исполнительное устройство; X(t) – физический параметр; Y(t) – физический непрерывный сигнал от датчика расхода; I(t) – физический непрерывный сигнал от указателя положения исполнительного устройства

Изменение параметров X(t) движущегося потока подчиняется фундаментальным законам гидродинамики, основным из которых является закон сохранения количества движения, выражающий баланс внутренней энергии потока, которое для установившегося движения выражается уравнением Бернулли. Для двух сечений установившегося потока несжимаемой жидкости (параметры приведены к центрам сечений потока) оно имеет вид:

$$p_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho_1 g h_1 = p_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \rho_2 g h_2 + \Delta p_{12} \quad (1)$$

где p – статическое давление; ρ – плотность среды; v – скорость; h – высота над условным нулевым уровнем; g – ускорение свободного падения; Δp_{12} – потери полного давления.

Потеря давления в гидравлической сети определяется суммой потерь давления на трение и на отдельных местных сопротивлениях:

$$\Delta P_{сети} = \sum_{i=1}^m \Delta P_{тр_i} + \sum_{j=1}^n \Delta P_{м_j} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\ell_i}{D_i} \frac{\rho v_i^2}{2} + \sum_{j=1}^n \zeta_{м_j} \frac{\rho v_j^2}{2}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{тр_i}$ – потеря давления на трение в i -ом прямолинейном участке; $\Delta P_{м_j}$ – потеря давления в j -ом местном сопротивлении; λ_i – коэффициент сопротивления трения i -ого прямолинейного участка; ℓ_i – длина i -ого прямолинейного участка; D_i – внутренний диаметр трубопровода i -ого участка; $\zeta_{м_j}$ – местный коэффициент сопротивления j -ого элемента сети; v_i , v_j – средние скорости в соответствующих участках; ρ – средняя плотность среды в системе.

Привод и регулирующий орган в работе рассмотрены как единый комплект «привод – регулирующий орган». Расходная характеристика комплекта «привод – регулирующий орган» зависит как от формы расходной характеристики регулирующего органа, так и от характеристики связи, и желаемую форму расходной характеристики комплекта «привод – регулирующий орган» можно получить как за счет перепрофилирования проходного сечения, так и за счет изменения характеристики связи.

Основными отрицательными моментами обеих упомянутых методов можно считать необходимость конструктивных преобразований исполнительных устройств, применимость для ограниченного круга регулирующей арматуры и невозможность качественной всережимной настройки.

Таким образом, в гидравлической системе один и тот же РО может иметь различные расходные характеристики, не совпадающие с его пропускной характеристикой. Иными словами, на этапе проектирования АСУТП энергетических объектов невозможно заранее рассчитать точную форму РХ органа управления.

Вторая глава посвящена экспериментальному анализу характеристик регулирующей арматуры, выявлению устранимых и неустранимых дефектов регулирующей арматуры.

Наличие различных дефектов в работе арматуры может быть выявлено только при экспериментальном исследовании ее работы в широком диапазоне нагрузок технологического оборудования.

Система диагностирования характеристик регулирующей арматуры представляет собой программно-аппаратный комплекс (ПАК), который путем подключения специализированной рабочей станции (назовем ее станцией диагностирования) расширяет техническую структуру верхнего уровня АСУТП. ПАК позволяет осуществить выбор трендов требуемых

сигналов за заданный период времени, построить расходные характеристики и оформить их в виде, удобном для восприятия и последующей обработки.

В процессе исследований разработана методика диагностирования характеристик регулирующей арматуры в условиях электростанции. В частности, оценка расходных характеристик арматуры осуществлялась по фактическим трендам сигналов по положению исполнительного механизма $I(t)$ и расходу регулируемой среды $Y(t)$.

Впервые проведено экспериментальное исследование характеристик на новых энергоблоках ПГУ (проведено диагностирование 95 регулирующих органов). Диагностирование выполнено по трендам сигналов, полученным в основном для режима штатной эксплуатации. В некоторых случаях проводились также специальные испытания (активный эксперимент) по определению расходных характеристик. По наиболее ответственным регуливающим клапанам диагностирование выполнялось многократно в различные интервалы времени.

В результате определены параметры регулирующего органа (значения люфтов, изменение крутизны расходной характеристики и др.), что позволяет обоснованно принять соответствующее решение по состоянию арматуры, качеству проведенного ремонта и др. (рис. 2).

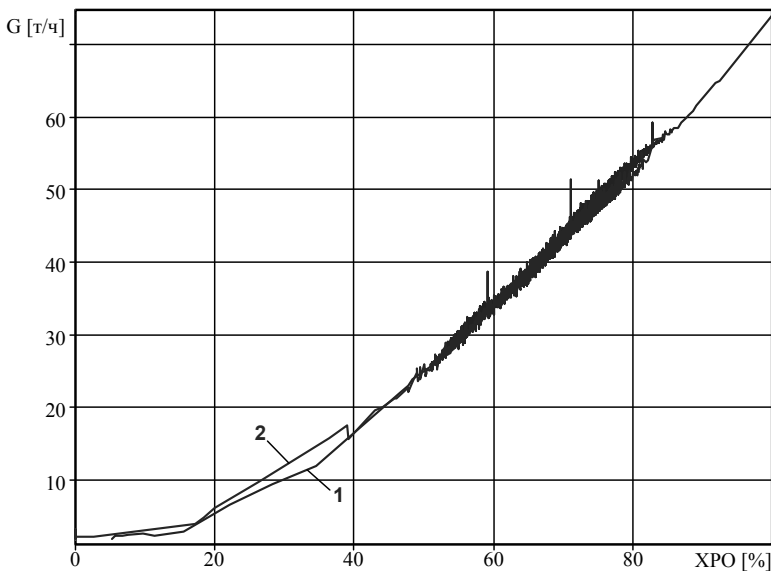


Рис. 2. Экспериментальная расходная характеристика регулирующего питательного клапана контура низкого давления котла-утилизатора блока ПГУ:
1 — на открытие; 2 — на закрытие

Полученные характеристики регулирующих органов включены в программный комплекс (ПК) «Фонд экспериментальных характеристик объектов энергетики». Данный ПК представляет собой базу экспериментальных статических и динамических характеристик теплоэнергетического оборудования (ТЭО). Комплекс построен на базе многофункциональной СУБД. «Фонд экспериментальных характеристик объектов энергетики» является открытой системой, позволяющей пополнять базу данных новой информацией. Данное программное средство используется на кафедре систем управления в учебно-научном процессе при разработке имитационных моделей, оценке адекватности аналитических моделей ТЭО с целью полноценной поддержки этапа функционального проектирования АСУТП энергоблоков.

Диагностирование позволило выявить основные дефекты регулирующей арматуры, которые включают в себя: наличие недопустимого люфта, существенную нелинейность РХ, большой начальный пропуск среды через РК, «перетяг» РК, неправильную настройку датчика указателя положения, и др.

В третьей главе рассмотрены обобщенные термодинамические потенциалы и координаты гидравлической системы, теоретические основы моделирования гидравлических систем с регулирующими органами. Рассмотрен вопрос формирования модели РО в рамках получения заводской характеристики. Отмечены особенности моделирования гидравлических сопровитлений.

При работе гидравлической системы сохраняется баланс технологической среды на входе и выходе гидравлической системы и обеспечиваются штатные (нормальные, расчетные) режимы работы технологического оборудования, при которых технологический объект управления (ТОУ) в целом может работать устойчиво сколь угодно долгое время. Рассмотрены работа перемещения потока технологической среды в пространстве гидравлической системы, работа по преодолению гидравлических сопротивлений и работа по преодолению гравитационных сил.

В реальных условиях эксплуатации гидравлических систем перепад давления на регулирующем органе изменяется в зависимости от гидравлических характеристик насосной установки, составляющих элементов трубопроводной системы, расхода среды потребителями, свойств перемещаемой среды, ее вязкости, гидравлического режима движения, способности вскипания в связи с понижением давления и некоторых других факторов.

В качестве параметра, характеризующего гидравлическую систему, используют коэффициент формы расходной характеристики S :

$$S = \frac{\Delta p_{PO \min}}{\Delta p_{C \max}}, \quad (3)$$

где $\Delta p_{PO \min}$ – минимальный перепад давления на РО, т.е. при его полном открытии; $\Delta p_{C \max}$ – максимальные суммарные потери давления в гидравлической системе, включая РО.

Наряду с коэффициентом формы используют модуль гидравлической системы n :

$$n = \frac{\Delta p_{Л \max}}{\Delta p_{PO \min}}, \quad (4)$$

где $\Delta p_{Л \max}$ – максимальные потери давления в трубопроводе без РО.

Коэффициенты S и n связаны между собой соотношением:

$$S = \frac{1}{1+n}. \quad (5)$$

При известных перепадах давления на РО и в системе для потока несжимаемой невязкой среды аналитическая зависимость выражается следующей формулой:

$$q = \sqrt{\frac{\overline{\Delta p_C}}{1 + S \left(\frac{1}{K_V^2} - 1 \right)}}, \quad (6)$$

где q – относительный расход среды; $\overline{\Delta p_C} = \frac{\Delta p_C}{\Delta p_{C \max}}$ – отношение суммарных потерь давления в системе при текущем расходе к потерям при максимальном расходе среды; Δp_C – суммарные потери давления в гидравлической системе, включая РО при текущем расходе среды; $\overline{K_V}$ – относительная пропускная способность РО.

При постоянном значении коэффициента расхода РО $\mu_{PO} = const$, коэффициент формы расходной характеристики однозначно определяет зависимость между расходной и конструктивной характеристиками, т.е.

$$q = \sqrt{\frac{\overline{\Delta p_C}}{1 + S \left(\frac{1}{S_{ПП}^2} - 1 \right)}}, \quad (7)$$

где $S_{ПП}$ – степень открытия регулируемого проходного сечения.

Из вышеприведенных формул определения расхода следует, что для построения расходной характеристики требуется знать ряд величин, в частности перепад давления на регулирующем органе. Ввиду того, что на реальных теплоэнергетических объектах датчики измерения давления могут находиться на значительном расстоянии от РО, необходимо вычислять потери давления на участках от датчика давления до входного патрубка РО и от выходного патрубка РО до второго датчика давления. Таким обра-

зом, для определения перепада давления на РО при известной величине потери давления в системе необходимо вычислить потери давления в линии, которые складываются из потерь давления в прямолинейных участках трубопровода, потерь давления в местных сопротивлениях и изменения давления, вызванного разностью высот начальной и конечной точками трубопровода.

Местные потери напора обуславливаются преодолением местных сопротивлений, создаваемых фасонными частями, арматурой и прочим оборудованием трубопроводных сетей. Местные сопротивления вызывают изменение величины или направления скорости движения жидкости на отдельных участках трубопровода, что связано с появлением дополнительных потерь напора. Движение в трубопроводе при наличии местных сопротивлений является неравномерным. Потери напора в местных сопротивлениях h_m (местные потери напора) вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (8)$$

где v – средняя скорость в сечении, как правило, расположенном ниже по течению за данным сопротивлением;

ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Для определения потерь давления Δp_m формула Вейсбаха преобразуется к виду:

$$\Delta p_m = \frac{\xi \rho v^2}{2}. \quad (9)$$

Значения коэффициентов местных сопротивлений зависят от конфигурации местного сопротивления и режима потока, подходящего к сопротивлению. Этот режим определяется коэффициентом гидравлического трения λ подходящего потока, т.е. числом Рейнольдса и относительной шероховатостью.

Регулирующие органы характеризуются множеством параметров, которые указываются, в частности, в паспортах и технических описаниях. Построение модели РО начато с обработки заводской характеристики, в качестве которой выступает конструктивная или пропускная характеристика. Для моделирования заводской характеристики определены значения каждой точки кривой непосредственно по исходным графическим зависимостям. Эта процедура выполнена посредством сканирования графика и последующей обработки в графическом редакторе.

Разработанные модели РО реализованы в виде динамически подключаемых библиотек, что позволяет осуществить их многократное применение различными программными приложениями. Применение динамически подключаемых библиотек позволяет существенно расширить возможности и область применения моделей регулирующих органов.

Создание динамически подключаемых моделей РО проведено при использовании среды программирования на основе языка высокого уровня. Программный код представляет собой набор процедур и функций, описывающих работу конкретных РО.

В структуру описываемой модели включены такие функции, как:

- расчет конструктивной характеристики РО;
 - расчет пропускной характеристики РО;
 - расчет расходной характеристики РО;
 - расчет расходной характеристики реального РО на открытие;
 - расчет расходной характеристики реального РО на закрытие.
- Основные величины, используемые при построении характеристик:
- степень открытия регулирующего органа;
 - площадь проходного сечения РО;
 - пропуск среды через РО;
 - расход среды через РО;
 - расход среды через реальный РО при его открытии;
 - расход среды через реальный РО при его закрытии.

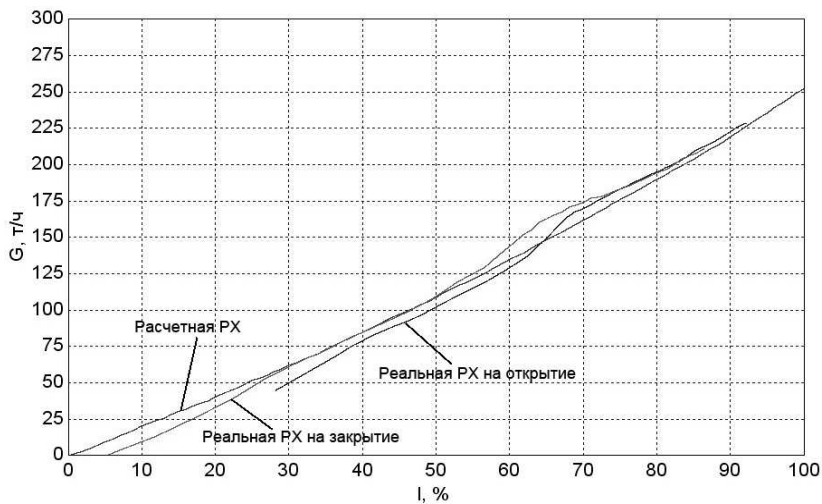
Имитационные модели гидравлических систем состоят из блоков, представляющих отдельные гидравлические сопротивления, в которых указываются значения давлений на входе в систему и на выходе из нее, длины участков от датчика давления до входного патрубка РО и от выходного патрубка РО до второго датчика давления, коэффициенты динамической вязкости и плотность протекающей среды, а также толщина и диаметры трубопроводов и т.д.

Каждый отдельный блок модели представляет собой реализацию набора формул, необходимых для расчета потери давления. Расчет ведется параллельно по обоим участкам (до и после РО).

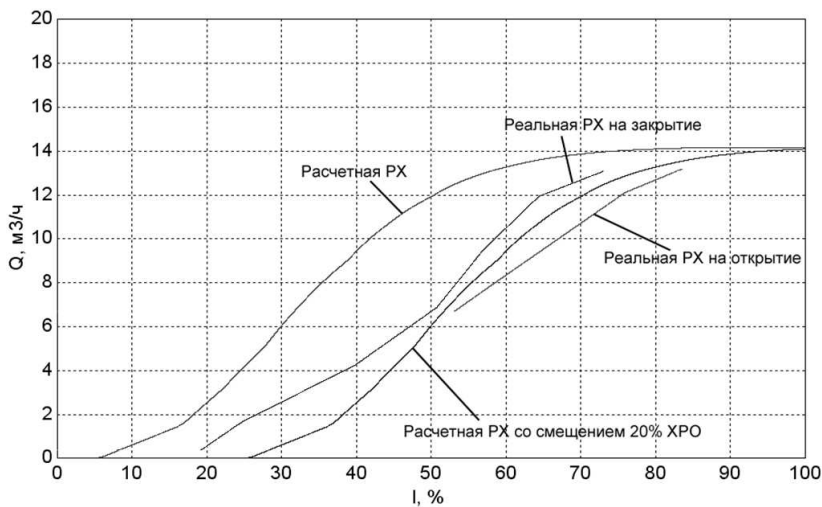
Оценка меры адекватности разработанной математической модели выполнена путем сравнения полученных в ходе вычислительного эксперимента расходных характеристик регулирующих органов с экспериментальными характеристиками (рис. 3). Не трудно видеть, что расчетная расходная характеристика основного регулирующего питательного клапана высокого давления практически совпадает с экспериментальной характеристикой как при прямом ходе регулирующего органа, так и при обратном (рис. 3, а). Характеристики соответствуют нормативным требованиям.

В то же время характеристики регулирующего затвора собственных нужд с узла баков обессоленной воды явно указывают на наличие «перетяга» клапана на 20% и недопустимого люфта (устраняемые дефекты). Введение в модель дефекта в виде «перетяга» клапана на 20% показывает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик (рис. 3, б). Причем расчетная характеристика расположилась строго между экспериментальными характеристиками при прямом и обратном ходе регулирующего органа.

Местные сопротивления моделируются с помощью специального алгоритмического блока, особенностью которого является инвариантная структура и варьируемые части, отличающиеся типом местного сопротивления.



а)



б)

Рис. 3. Сравнение расходных характеристик:
 а) регулирующий питательный клапан контура высокого давления котла-утилизатора блока ПГУ;
 б) регулирующий затвор собственных нужд с узла баков обессоленной воды

Таким образом, разработанные математические модели гидравлических систем с регулирующими органами, позволяют рассчитывать характеристики РО с учетом режима работы технологического объекта управления. Математические модели доведены до уровня имитационных моделей гидравлических систем с регулирующими органами, позволяющими проводить различного рода исследования. Однако, практически все расходные характеристики имеют нелинейный вид, что в типовых схемных решениях может привести к ухудшению качества регулирования в замкнутых системах управления.

В четвертой главе выполнено исследование влияния особенностей гидравлической системы на работу систем управления и разработан способ алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов в структуре замкнутой АСР.

Исследование проведено на примере многосвязной АСР производительности и рециркуляции осветлителя. Данная схема регулирования на реальном оборудовании реализована совместно с регулирующими клапанами АИ7.509.1322-АА и АИ7.511.1322-АА, представляющими собой поворотные затворы.

На основе активного эксперимента получены переходные характеристики по каналам регулирования. Для вычисления оценок переходных характеристик применена методика совмещения экспериментальных кривых разгона по «нулевым линиям». Динамические модели участков технологического объекта управления получены путем аппроксимации переходных характеристик в частотной области. Это позволило строго определить порядки объекта и получить корректные передаточные функции по каналам регулирования.

Проведена параметрическая оптимизация системы регулирования. Имитационное моделирование полученной системы выполнено в специализированном программном средстве «VisSim». Проведенные исследования АСР показали, что нелинейная характеристика РО не позволяет получить требуемые показатели качества в замкнутой системе.

Для оптимизации работы систем регулирования совместно с арматурой с нелинейными расходными характеристиками разработан способ алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов в структуре замкнутой АСР. Исходные данные для разработки способа получены в процессе испытаний и диагностики технологического оборудования.

Суть предложенного способа заключается в коррекции командного сигнала контроллера, поступающего на привод исполнительного устройства с целью его дополнительного перемещения на величину, значение которой определяется невязкой с эталонной характеристикой (рис. 4).

Полученные переходные процессы в замкнутой АСР подтверждают эффективность алгоритма оптимизации расходных характеристик регулирующих органов (рис. 5).

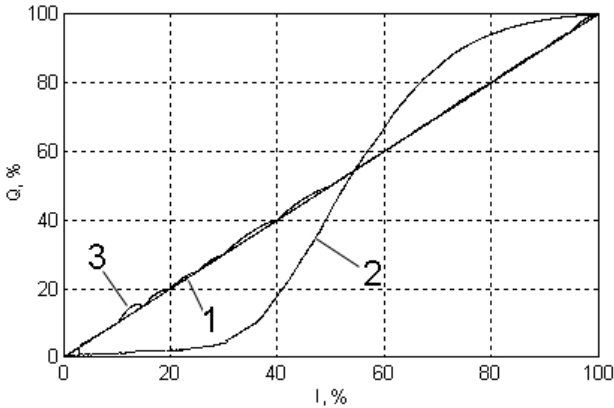


Рис. 4. Сравнение расходных характеристик клапана:
1 – линейная РХ; 2 – РХ без коррекции (заводская); 3 – РХ с коррекцией

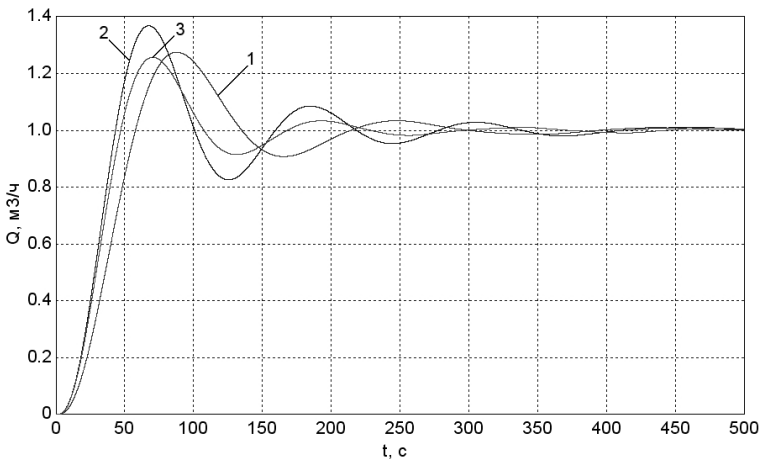


Рис. 5. Переходные процессы изменения расхода коагулированной воды:
1 – АСР с линейной характеристикой РО; 2 – АСР с нелинейной характеристикой РО;
3 – адаптивная АСР с нелинейной характеристикой РО

Разработанный способ алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов в структуре замкнутой АСР применим для всех типов дроссельной регулирующей арматуры, не требует конструктивных вмешательств и чрезмерных усложнений схем автоматического регулирования, позволяет адаптировать расходные характеристики регулирующей арматуры для переменных режимов работы объекта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. При автоматизации технологических объектов управления и создании современных распределенных многофункциональных АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры особые требования предъявляют к регулирующей арматуре. Это связано с существенно возросшими требованиями к эффективности работы систем автоматического управления. Поэтому проблема исследования характеристик регулирующей арматуры в условиях электростанции и оптимизации работы регулирующей арматуры в замкнутых автоматических системах регулирования представляется весьма актуальной.

2. Для экспериментального исследования характеристик регулирующей арматуры впервые в отечественной практике разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию программно-аппаратный комплекс диагностирования характеристик регулирующих органов по данным архива АСУТП энергоблока. Разработанный комплекс может функционировать в виде автономного устройства, а также при его интеграции в структуру АСУТП в виде дополнительной станции диагностирования.

3. В условиях реальной эксплуатации энергоблоков ПГУ-450 и ПГУ-325 проведены объемные экспериментальные исследования расходных характеристик регулирующей арматуры в широком диапазоне нагрузок в каналах управления движением технологических сред. Показано, что фактические нелинейные расходные характеристики регулирующих органов существенно зависят от особенностей гидравлической системы. При этом в работе регулирующей арматуры наблюдаются устранимые и неустраняемые дефекты. В настоящей работе полагается, что устранимые дефекты арматуры (люфт, «нулевой» пропуск, «перетяг» клапана и др. факторы, связанные с некачественным монтажом, ремонтом и проч.) устраняются в планово-оперативном порядке согласно требованиям нормативных документов.

4. Рассмотрены особенности известных способов устранения нелинейности расходных характеристик, основанные на перепрофилировании проходного сечения регулирующего органа и на изменении характеристик связи привода с регулирующим органом. Отмечена неэффективность конструктивных методов при работе энергоблока в широком диапазоне нагрузок вследствие неоднозначного влияния гидравлической линии на форму характеристики.

5. С целью исследования определяющих факторов влияния на нелинейные расходные характеристики разработана многопараметрическая математическая модель гидравлических систем с типовыми регулирующими органами. Модель разработана на основе фундаментальных законов гидродинамики, отличающаяся учетом гидравлических характеристик насосной установки, составляющих элементов трубопроводной системы, свойств перемещаемой среды и гидравлического режима движения. Математическая модель доведена до уровня реализации в универсальной системе имитационного моделирования. Разработана методика расчета харак-

теристик регулирующих органов. Показано, что присущие гидравлической системе нелинейности расходных характеристик относятся к технологически неустранимым дефектам.

6. Разработан способ алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов в структуре замкнутой АСР. Суть способа заключается в коррекции командного сигнала контроллера, поступающего на привод исполнительного устройства с целью его дополнительного перемещения на изменяющуюся величину, значение которой определяется невязкой с эталонной характеристикой. Разработанный способ применим для всех типов дроссельной регулирующей арматуры, не требует конструктивных вмешательств, что позволяет оптимизировать настройку расходных характеристик для разных режимов работы объекта.

7. Показана эффективность разработанного технического решения на примере системы автоматического регулирования производительности и рециркуляции коагулированной воды осветлителя общестанционного обслуживания энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Имитационная модель пылесистем по схеме прямого вдувания паровых котлов (теоретические основы и технология реализации на полигоне АСУТП) / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Е.Д. Маршалов и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С.61-69.

2. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Имитационное моделирование гидравлических систем с регулирующими органами / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С.84-87.

3. Агафонова, Надежда Александровна. Аппроксимация характеристик регулирующих органов нелинейными по параметрам моделями / Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов, Ю.В. Наумов // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 4. – С.65-69.

4. Тверской, Юрий Семенович. Оптимизация характеристик регулирующих органов в системах автоматического управления / Ю.С. Тверской, Е.Д. Маршалов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – № 4. – С.64-68.

5. Диагностирование характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков / Ю.С. Тверской, Н.А. Агафонова, Е.Д. Маршалов и др. // Теплоэнергетика. – 2012. – № 2. – С.51-57.

Основные публикации в других изданиях

6. A Simulation Model for Direct-Injection Coal-Pulverization Systems of Steam Boilers (and Theoretical Principles and Technology for Its Implementation as Part of the Process Control System) / Yu.S. Tverskoi, S.A. Talamonov, E.D. Marshalov and others // Thermal Engineering. – 2005. – № 9. – P.723-731.

7. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Исследование влияния характеристик исполнительных устройств на качество работы систем регулирования / Е.Д. Маршалов, М.В. Байкова, А.Н. Лебедева, Ю.С. Тверской // Радиотехника, электро-

техника и энергетика: секция 48 «Автоматизация и контроль в теплоэнергетике», 1–2 марта 2005 г / Минобрнауки РФ, МЭИ (ТУ). – Москва. – 2005. – Т. 3. – С.192.

8. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Исследование качества работы АСР при изменении характеристик исполнительных устройств / Е.Д. Маршалов // Технология АСУТП электростанций: материалы МНТК «XII Бенардосовские чтения»: секция 3 «Системы управления и автоматизация», 20–22 октября 2005 г / Фед. аг. по обр., ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина»; под ред. Ю.С. Тверского. – Иваново. – 2005. – Т. 3. – С.141–146.

9. Маршалов, Евгений Дмитриевич. К вопросу оптимальной формы расходной характеристики регулирующего органа / Е.Д. Маршалов, Е.В. Захарова // Технология АСУТП электростанций: материалы МНТК «XII Бенардосовские чтения»: секция 3 «Системы управления и автоматизация», 20–22 октября 2005 г / Фед. аг. по обр., ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина»; под ред. Ю.С. Тверского. – Иваново. – 2005. – Т. 3. – С.146–147.

10. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Многопараметрическая оптимизация расходных характеристик регулирующих органов в системах управления / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева, Ю.С. Тверской, Н.А. Агафонова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: секция 47 «Автоматизация и контроль в теплоэнергетике», 1–2 марта 2007 г / Минобрнауки РФ, МЭИ (ТУ). – Москва. – 2007. – Т. 3. – С.205–206.

11. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Разработка моделей гидравлических систем с серийно-выпускаемыми регулирующими органами / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы МНТК «XIV Бенардосовские чтения»: секция 3 «Системы управления и автоматизация», 29–31 мая 2007 г / Фед. аг. по обр., ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». – Иваново. – 2007. – Т. 1. – С.119.

12. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Анализ влияния конструктивных и технологических факторов регулирующих органов на характеристики канала управления / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева, Ю.С. Тверской // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: секция 47 «Автоматизация и контроль в теплоэнергетике», 28–29 февраля 2008 г / Минобрнауки РФ, МЭИ (ТУ). – Москва. – 2008. – Т. 3. – С.180–181.

13. Нелинейная динамическая модель пылесистем прямого вдувания котлов электростанций / Д.Ю. Тверской, Е.Д. Маршалов, Ю.С. Тверской и др. // Труды 5-й науч. конф. «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008) в 2-х томах / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – Санкт-Петербург, 2008. – в 2-х т. – Т.2. – С.100–102.

14. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Оптимизация работы регулирующих органов с нелинейными расходными характеристиками в современных АСУТП / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 205–209.

15. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Особенности выбора регулирующих органов систем управления технологическими процессами / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы МНТК «XV Бенардосовские чтения»: секция 3 «Системы управления и автоматизация», 27–29 мая 2009 г / Фед. аг. по обр., ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». – Иваново. – 2009. – Т. 1. – С.125–126.

16. Маршалов, Евгений Дмитриевич. Совершенствование характеристик регулирующих органов в системах управления энергоблоков / Е.Д. Маршалов // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы МНТК «XVI Бе-

