

## Оптимизация характеристик регулирующих органов в системах автоматического управления

Ю.С. Тверской, д-р техн. наук, Е.Д. Маршалов, инж.

Рассмотрены способы оптимизации расходных характеристик регулирующих органов, а также методика алгоритмической коррекции нелинейных расходных характеристик в системах автоматического управления, применимая для всех типов дроссельной регулирующей арматуры и не требует конструктивных вмешательств в исполнительное устройство.

*Ключевые слова:* расходная характеристика, регулирующий орган, алгоритмическая коррекция, система автоматического управления.

### Optimization of Control Valve Characteristics in Automation Control Systems

U.S. Tverskoy, Doctor of Engineering, E.D. Marshalov, Engineer

The methods of control valve metering characteristics optimization are considered. The technique of algorithmic correction for nonlinear metering characteristics in automatic control systems is developed. This technique can be used for all types of throttling control valves and does not require any changes in design of an execution unit.

*Keywords:* metering characteristics, control valve, algorithmic correction, automatic control system.

**Введение.** При автоматизации технологических объектов управления (ТОУ) и создании современных АСУТП особые требования предъявляют к регулирующей арматуре [1, 2]. Это связано прежде всего с тем, что качество работы систем управления существенно зависит от характеристик исполнительных устройств (ИУ). При некорректном выборе ИУ или изменении их свойств в процессе эксплуатации, как правило, невозможно получить качественный процесс автоматического регулирования при работе ТОУ в широком диапазоне нагрузок. Поэтому проблема оптимизации характеристик регулирующих органов в системах управления энергоблоков ТЭС всегда представлялась актуальной [3–6].

Однако при проектировании объектов энергетики поставки основного и вспомогательного оборудования ТЭС, проектные организации уделяют этой многофакторной проблеме недостаточное внимание, отдавая предпочтение стоимостным критериям [7]. В результате имеют место трудности в реализации функций управления в составе АСУТП, что подтверждается результатами диагностирования регулирующих клапанов, в том числе, на новых энергоблоках [2, 8]. В настоящее время наибольшее распространение имеет энергетическая арматура производства Чеховского завода «Энергомаш», производственного объединения «Красный котельщик» и производственного объединения «Сибэнергомаш», которая в большинстве своем имеет нелинейные характеристики, причем характеристики не всегда могут быть линеаризованы на этапе проектирования тепловой схемы энергоблока и ТЭС.

**Методы оптимизации характеристик ИУ.** Типовой узел регулирования (рис. 1) 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.

В реальных условиях расходная характеристика РО зависит от множества факторов (рис. 2), поэтому на этапе проектирования АСУТП энергетических объектов невозможно заранее рассчитать точную форму РХ [9]. Ввиду того, что между приводом и регулирующим органом может быть любая форма связи, целесообразно рассматривать расходную характеристику не регулирующего органа в отдельности, а комплекта «привод – регулирующий орган».

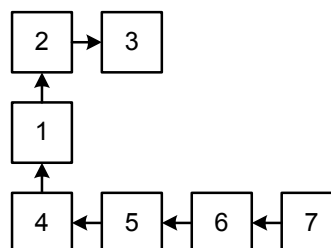


Рис. 1. Типовой узел регулирования: 1 – трубопровод; 2 – преобразователь расхода (датчик); 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – регулирующий орган; 5 – исполнительный механизм (привод); 6 – усилитель управляющего сигнала; 7 – цифро-импульсный преобразователь

Если характеристика связи выходного вала исполнительного механизма со штоком клапана

линейная, то расходные характеристики регулирующего органа и комплекта совпадают.

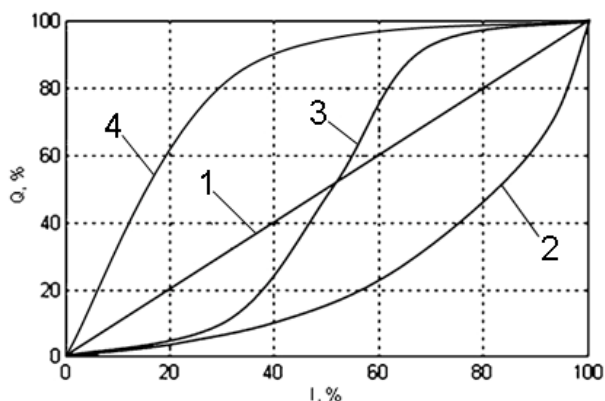


Рис. 2. Типовые расходные характеристики РО: 1 – линейная; 2 – равнопроцентная; 3 – S-образная; 4 – шиберов

Так как расходная характеристика комплекта «привод – регулирующий орган» зависит как от формы расходной характеристики регулирующего органа, так и от характеристики связи, то желаемую форму расходной характеристики комплекта «привод – регулирующий орган» можно получить как за счет перепрофилирования проходного сечения, так и за счет изменения характеристики связи [6].

При выборе метода преобразования расходной характеристики комплекта «привод – регулирующий орган» следует принимать во внимание конструктивные особенности регулирующего органа и привода и избегать чрезмерно сложных механизмов сочленения.

Метод перепрофилирования регулирующего органа отличается простотой реализации (не требует усложнения механизмов сочленения с регулирующим органом), но дает меньшую точность воспроизведения требуемой расходной характеристики комплекта «привод – регулирующий орган» по сравнению с методом введения нелинейной связи. Область применения данного метода – клапаны со встроенными исполнительными механизмами; а также в тех случаях, когда введение нелинейной связи приводит к усложнению механизмов сочленения. Этот метод не применим для поворотных заслонок и шаровых кранов [6].

Метод введения нелинейной связи при правильном выборе механизма связи обеспечивает достаточно точное воспроизведение характеристики «привод – регулирующий орган». Область применения метода – поворотные заслонок и шаровые краны; а также во всех случаях, когда не требуется сложный механизм сочленения привода с регулирующим органом. Метод не используется для регулирующих органов со встроенным исполнительным механизмом.

Наиболее простым, компактным и жестким видом сочленения является непосредственное соединение выходного вала (штока) регулирующего органа с валом (штоком) исполни-

тельного механизма. Перемещения выходного устройства исполнительного механизма и подвижной части регулирующего органа при этом способе сочленения одинаковы, а скорости равны.

К системам с непосредственной связью относятся и такие сочленения, при которых связь между регулирующим органом и исполнительным механизмом хотя и осуществляется с помощью каких-либо промежуточных звеньев, однако остается линейной или близкой к линейной. При этом перемещения выходного вала исполнительного механизма и подвижного элемента рабочего органа различаются только масштабом. В качестве промежуточных звеньев чаще всего применяются различного рода тяги, рычаги, тросы и т.п.

Наибольшее распространение получили способы сочленения с нелинейными связями между исполнительным механизмом и регулирующим органом. Эти связи позволяют за счет некоторых конструктивных усложнений осуществлять неравные перемещения регулирующего органа при относительно равных перемещениях выходного элемента исполнительного механизма, а также расширяют границы возможных топологических решений. Обычно такие сочленения выполняются либо как шарнирный четырехзвенник (иногда многозвенник), либо как устройство с профильными кулачками [10, 11].

Общим требованием, которое предъявляется к элементам, применяемым для сочленения регулирующих органов с исполнительными механизмами, является необходимость обеспечения достаточной жесткости соединений и минимальных люфтов в кинематических парах. Наличие люфтов вносит дополнительную нелинейность в систему автоматического регулирования, что всегда нежелательно, поскольку резко ухудшает качество работы системы.

Наличие люфтов в сочленении приводит к гистерезису расходной характеристики регулирующего органа и может быть выявлено при экспериментальном определении расходной характеристики при прямом и обратном его ходе.

Таким образом, способы сочленения регулирующего органа с исполнительным механизмом определяются в каждом конкретном случае типом и конструкцией регулирующего органа и исполнительного механизма, их взаимным расположением, характером перемещения регулирующего органа и другими местными условиями.

**Постановка задачи.** Рассмотрим общий вид и основные элементы регулируемой системы (рис. 3). Из общей магистрали среда подается по трубопроводу через регулирующий орган к объекту. На трубопроводе установлены запорные органы и измерительная диафрагма.

В общем случае располагаемый перепад давления в системе  $\Delta P_{СИСТ}$  определяется следующим образом [4, 6]:

$$\Delta P_{СИСТ} = P_{НАЧ} - P_{КОН} + \Delta P_h, \text{ Н/м}^2,$$

где  $P_{НАЧ}$  – давление в начале системы;  $P_{КОН}$  – давление в конце системы;  $\Delta P_h$  – напор, создаваемый столбом жидкости.

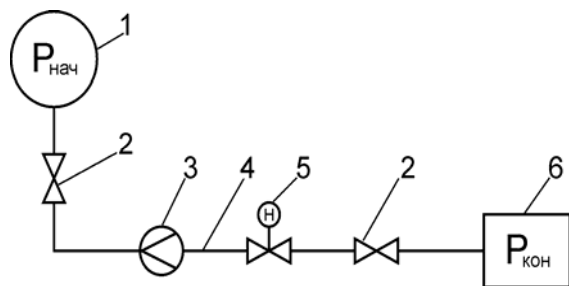


Рис. 3. Регулируемая система: 1 – общая магистраль; 2 – запорный орган; 3 – датчик расхода; 4 – участок линии «вход – выход» ТОО; 5 – регулирующий орган; 6 – технологический объект управления

Уравнение расхода через дроссельный регулирующий орган показывает, что расход через регулирующий орган зависит от степени открытия регулирующего органа, гидравлического сопротивления сети и располагаемого перепада давления в системе [4], м<sup>3</sup>/с:

$$Q = \varepsilon \Psi F_y \sqrt{\frac{2\Delta P_{СИСТ}}{\rho(\zeta_{СЕТИ} + \zeta_{РО})}},$$

где  $\varepsilon$  – поправочный множитель на сжимаемость среды;  $\Psi$  – поправочный множитель на вязкость среды;  $F_y$  – площадь условного прохода РО, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta_{СЕТИ}$  – коэффициент гидравлического сопротивления сети, отнесенный к средней скорости потока на входе в РО;  $\zeta_{РО}$  – коэффициент гидравлического сопротивления РО, отнесенный к средней скорости среды на его входе.

Оптимизация характеристики ИУ в системах управления осуществляется путем построения корректирующей модели невязки между оптимальной линейной характеристикой и фактической при заданной нагрузке (открытии клапана) (рис. 4).

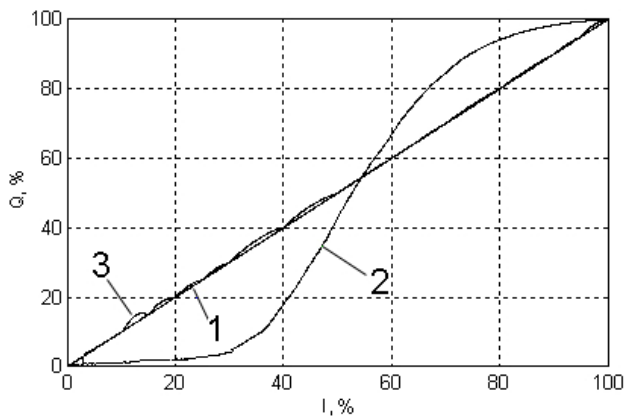


Рис. 4. Сравнение расходных характеристик клапана: 1 – линейная РХ; 2 – РХ без коррекции (заводская); 3 – РХ с коррекцией

**Пример.** Исходные данные для разработки методики автоматической корректировки параметров настройки АСР были получены в процессе испытаний и диагностики стационарного оборудования [12]. Работу РО в системах управления рассмотрим на примере работы общестанционного оборудования.

В ходе проделанной работы на основе полученных исходных данных были созданы модели АСР с регулирующими органами и участками технологического объекта управления [13]. Для получения оптимальных параметров настройки регуляторов проведена параметрическая оптимизация системы регулирования. Имитационное моделирование полученной системы выполнено в специализированном программном средстве VisSim.

Рассмотрим работу схемы регулирования расхода обессоленной воды на Н-катионитный фильтр АОУ с клапаном, имеющим расчетную расходную характеристику (рис. 5, 6).

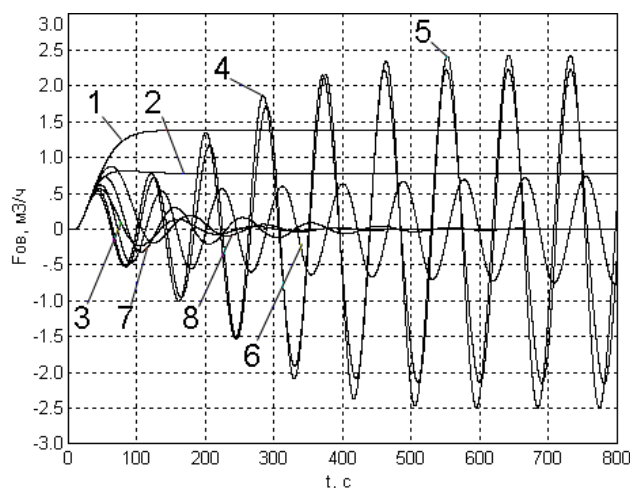


Рис. 5. Переходный процесс изменения расхода обессоленной воды при 10%-ном возмущении РО при начальной степени открытия: 1 – 20 %; 2 – 30 %; 3 – 40 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %; 6 – 70 %; 7 – 80 %; 8 – 90 %

Анализ полученных переходных характеристик свидетельствует о существенном влиянии нелинейности расходных характеристик на качество регулирования: для некоторых степеней открытия клапана система имеет большое отклонение регулируемой величины от заданного значения, а при других степенях открытия система становится неустойчивой, в зависимости от рабочей нагрузки (степени открытия клапана).

Расходная характеристика клапана имеет S-образную форму и 3 ярко выраженных участка: 0–25 %, 25–65 % и 65–100 %, на которых значительно меняется коэффициент усиления (рис. 4, кривая 2). В рассматриваемом примере регулятор рассчитывался на характеристику, близкую к линейной. На практике настройку регуляторов ведут на максимальную крутизну характеристики. Такой расчет обеспечивает гарантированный запас устойчивости системы,

однако приводит к затянутым переходным процессам.

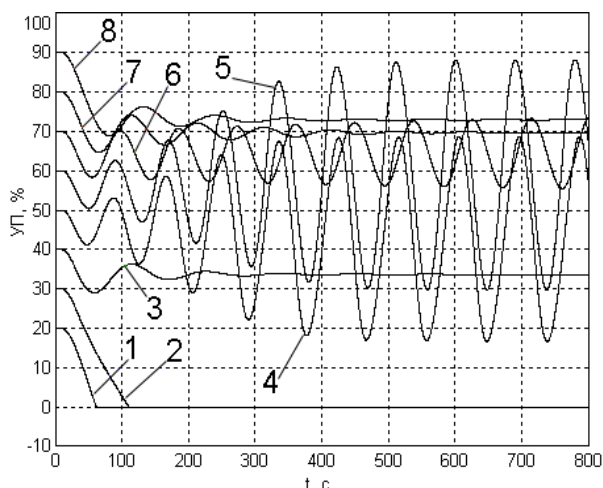


Рис. 6. Переходный процесс изменения указателя положения при 10%-ном возмущении РО при начальной степени открытия: 1 – 20 %; 2 – 30 %; 3 – 40 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %; 6 – 70 %; 7 – 80 %; 8 – 90 %

Для настройки системы регулирования расхода обессоленной воды с моделью реального клапана разработана корректирующая модель. Принцип работы корректирующей модели заключается в приведении нелинейной характеристики клапана к линейной. Основная идея построения модели заключается в том, что сравнение заводской характеристики клапана и линейной обнаруживает существенное несоответствие между ними (рис. 4, кривые 1 и 3). Например, для получения расхода воды, равного 20 %, при линейной характеристике клапан нужно открыть на 20 %, но в реальном случае для получения такого расхода клапан необходимо открыть примерно на 40 %. Так как характеристики клапанов нелинейные, то при получении большего расхода может возникнуть необходимость открывать клапан на меньшую величину, чем того требует линейная характеристика. Поэтому для каждой степени открытия клапана находим несоответствие между характеристиками и вводим корректировку в систему.

Реализация корректировки осуществляется путем разбиения всего диапазона клапана на множество линейных отрезков, которые описывают изменение значений функции. По найденным коэффициентам коррекции производится модификация алгоритма управления приводом исполнительного устройства для обеспечения перемещения затвора РО в расчетное положение. Сравнение расходных характеристик до и после корректировки представлено на рис. 4.

Проверим работу АСП с расчетной расходной характеристикой и корректирующей моделью для данной характеристики (рис. 7, 8).

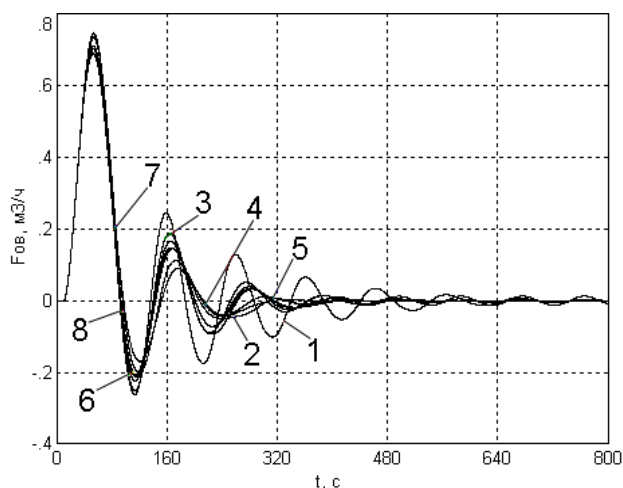


Рис. 7. Переходный процесс изменения расхода обессоленной воды при 10 %-ном возмущении РО при начальной степени открытия: 1 – 20 %; 2 – 30 %; 3 – 40 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %; 6 – 70 %; 7 – 80 %; 8 – 90 %

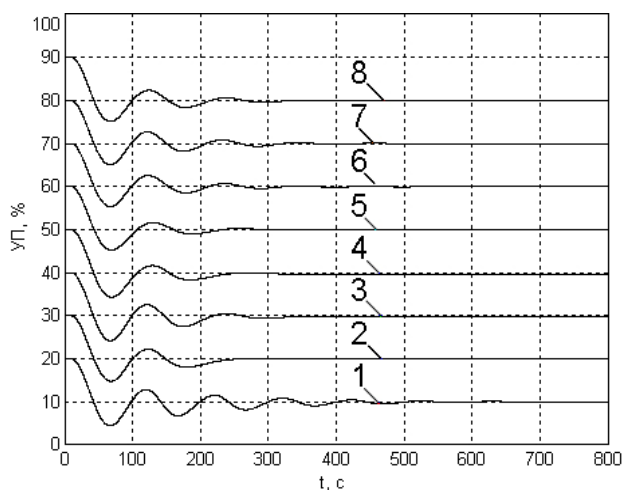


Рис. 8. Переходный процесс изменения указателя положения при 10 %-ном возмущении РО при начальной степени открытия: 1 – 20 %; 2 – 30 %; 3 – 40 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %; 6 – 70 %; 7 – 80 %; 8 – 90 %

Полученные переходные характеристики наглядно отражают правильность алгоритма построенной корректировочной модели. Данный вывод основывается на практически полном совпадении переходных характеристик, полученных при введении в работу системы регулирования модели реального клапана и корректировочной модели, с переходным процессом, полученным при работе идеальной схемы. Графики, иллюстрирующие изменение указателя положения рассматриваемого клапана, также подтверждают сделанные выводы, так как колебания затухающие и процесс достаточно быстро устанавливается.

Кроме того, областью применения полученной методики можно считать большой парк уже используемого энергетического оборудования, где на регулирующих узлах наблюдается значительная неравномерность расходных характеристик.

## Заключение

Наилучшими с точки зрения качества локальных систем управления в составе АСУТП являются регулирующие органы, изначально обеспечивающие близкие к линейным расходные характеристики. Основным недостатком переупрофилирования РО и метода введения нелинейной связи можно считать необходимость сложных конструктивных преобразований исполнительных устройств (это применимо для ограниченного круга регулирующей арматуры).

Разработанная методика оптимизации характеристик и повышения качества работы систем управления путем алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов применима для всех типов дроссельной регулирующей арматуры и не требует конструктивных вмешательств.

## Список литературы

1. **РД 153-34.1-39.504-00.** Общие технические требования к арматуре ТЭС (ОТТ ТЭС-2000). – М.: СПО ОРГРЭС, 2000.

2. **Технология АСУТП электростанций** // Технология АСУТП электростанций: мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения»: секция 3 «Системы управления и автоматизация» / под ред. Ю. С. Тверского; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2005. – Т. 3.

3. **Арзуманов Э.С.** Анализ методов расчета и выбора дроссельных регулирующих органов автоматических систем. – М.: ОНТИ Прибор, 1964.

*Тверской Юрий Семенович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой систем управления,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

*Маршалов Евгений Дмитриевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры систем управления,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

4. **Селезнев М.А.** Регулирующие органы в системах регулирования теплоэнергетических процессов. – М.: изд-во МЭИ, 1968.

5. **Арзуманов Э.С.** Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем. – М.: Энергия, 1971.

6. **Благов Э.Е., Ивницкий Б.Я.** Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

7. **Какузин В.Б.** Обзор рынка энергетической арматуры. – М.: Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – фирма «ОРГРЭС», 2007.

8. **Агафонова Н.А., Наумов Ю.В., Таламанов С.А.** Интервальные оценки характеристик объектов управления на основе архивных трендов сигналов, регистрируемых ПТК АСУ ТП // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: тр. Междунар. науч. конф. «Control-2008». – М.: изд-дом МЭИ, 2008. – С.144–148.

9. **Наладка** средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

10. **Справочник** по наладке автоматических устройств контроля и регулирования / А.Д. Нестеренко, В.А. Дубровский, Е.И. Забокрицкий. – Киев: Наукова думка, 1976.

11. **Патент** №139753 (ГДР). Einrichtung zur Regelung der Leistung von Dampf-oder Hei Bwasser-kessen mit Wanderrost-ferung / Tries, Dieter, DE, STEAG AG, Essen, DE. – AP F23N/209078 – 139753/16.01.80. F23N1/02.

12. **Станция** контроля качества автоматического регулирования и автоматизации настройки АСР // Инструкция по применению программного обеспечения подсистемы автоматизированного диагностирования регулирующих клапанов, версия 1.1. – Иваново: ООО «НПП "Илотэкс"», 2007.

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