

А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов

АВТОМАТИКА

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора **А. С. Серебрякова**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
высшего образования в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по электротехническим,
электрохимическим и электроэнергетическим направлениям
и специальностям*

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки
140400 «Электроэнергетика и электротехника»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2016

УДК 681.5(075.8)

ББК 32.965я73

С32

Авторы:

Серебряков Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации факультета информационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (гл. 1; гл. 2: 2.3—2.5, 2.7; гл. 3; гл. 4: 4.3, 4.6; гл. 5; гл. 6; гл. 7: 7.4; гл. 8);

Семенов Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации и автоматизации, заместитель декана факультета информационных технологий и систем связи по научно-производственной работе Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (гл. 2: 2.1, 2.2, 2.6, 2.8; гл. 4: 4.1, 4.2, 4.4, 4.5; гл. 7: 7.1—7.3, 7.5, 7.6; гл. 9: 9.4, 9.5);

Чернов Евгений Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики Образовательно-научного института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева (гл. 9: 9.1-9.3).

Рецензенты:

Папков Б. В. — доктор технических наук, профессор кафедры электрификации и автоматизации факультета информационных технологий и систем связи Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ;

Титов В. Г. — доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики Образовательно-научного института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева, заслуженный деятель науки РФ.

Серебряков, А. С.

С32

Автоматика : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов ; под общ. ред. А. С. Серебрякова. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 431 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-5403-6

В учебнике изложены основы теории систем автоматического регулирования. Рассмотрены принцип действия систем автоматического регулирования и управления, функции и параметры основных элементов данных систем. Приведен анализ динамики линейных систем автоматического регулирования, а также анализ и синтез дискретных систем управления с применением интегрированных пакетов MathCad и MATLAB. Представлена методика изображения процесса регулирования на фазовой плоскости, а также методика оценки качества процесса регулирования. Изложены сведения о системах управления с использованием нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Освещены основные теоретические положения схмотехники и телемеханики. Приведены примеры применения телемеханики на железной дороге и в электроэнергетике. Рассмотрены вопросы автоматического управления процессом диагностирования и поиском неисправностей в электрических цепях с релейными элементами, а также инженерная методика проектирования электроавтоматики промышленных механизмов с применением циклограмм.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Учебник предназначен для студентов электротехнических, электромеханических и электроэнергетических направлений подготовки и специальностей вузов, а также может быть полезен инженерам и техникам, занятым разработкой и обслуживанием систем автоматики и телемеханики.

УДК 681.5(075.8)

ББК 32.965я73

© Серебряков А. С., Семенов Д. А.,
Чернов Е. А., 2015

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

ISBN 978-5-9916-5403-6

Оглавление

Предисловие	7
Глава 1. Принцип действия систем автоматического регулирования и управления	11
1.1. Основные понятия теории автоматического управления	11
1.2. Системы автоматического регулирования с регулятором прямого действия и статической характеристикой	13
1.3. Анализ процессов в САР в статическом режиме	20
1.4. Анализ процессов в простейшей статической САР в динамическом режиме	24
1.5. Система автоматического регулирования с регулятором косвенного действия и астатической характеристикой	30
1.6. Автоматизация инженерных расчетов	37
1.7. Расчет САР частоты вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в статическом режиме	47
1.8. Классификация САУ	50
<i>Выводы</i>	53
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	53
Глава 2. Основные элементы и звенья САУ. Их функции и параметры	55
2.1. Основные элементы САУ	55
2.2. Звенья САУ. Математическое описание звеньев САУ в статическом режиме	56
2.3. Математическое описание звеньев САУ в динамическом режиме	58
2.4. Частотные характеристики	69
2.5. Основные типовые звенья САР	76
2.6. Структурные схемы и их передаточные функции	98
2.7. Связь между характеристиками системы регулирования в замкнутом и разомкнутом состояниях	101
2.8. Автоматические регуляторы	104
<i>Выводы</i>	109
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	109
Глава 3. Анализ динамики линейных систем автоматического регулирования	111
3.1. Анализ переходных процессов в САР. Устойчивость САР	111
3.2. Алгебраические критерии устойчивости	121
3.3. Частотные критерии устойчивости	124
3.4. Анализ устойчивости САР с транспортным запаздыванием	126

3.5. Пример анализа устойчивости САР третьего порядка.....	128
3.6. Изображение процесса регулирования на фазовой плоскости	138
3.7. Оценка качества процесса регулирования САР	144
<i>Выводы</i>	148
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	149
Глава 4. Анализ и синтез дискретных систем управления.	
Основы схемотехники	150
4.1. Релейные системы управления. Алгебра логики. Логические элементы автоматики	150
4.2. Анализ и синтез логических устройств. Методы минимизации логических функций и схем.....	158
4.3. Автоматическое управление процессом диагностирования и поиском неисправностей в электрических цепях с релейными элементами	167
4.4. Программируемые контроллеры и интеллектуальные реле	184
4.5. Программирование логических контроллеров на языке функциональных логических блоков	191
4.6. Нелинейные системы автоматического регулирования прерывистого действия с релейными элементами	199
<i>Выводы</i>	211
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	211
Глава 5. Системы управления с использованием нечеткой логики и нейронных сетей	213
5.1. Основы нечеткой логики	213
5.2. Операции нечеткой логики	221
5.3. Нечеткое моделирование в среде MATLAB.....	229
5.4. Нейронные сети.....	232
<i>Выводы</i>	237
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	238
Глава 6. Основы телемеханики	239
6.1. Общие понятия о системах телеуправления и телесигнализации	239
6.2. Способ образования искусственных цепей	244
6.3. Методы разделения сигналов и уплотнения линий связи	245
6.4. Линии связи.....	251
6.5. Телеизмерение. Телеизмерительные системы ближнего действия	254
6.6. Телеизмерительные системы дальнего действия	259
6.7. Системы автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте.....	261
6.8. Системы телемеханики в электроэнергетике	274
<i>Выводы</i>	280
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	281
Глава 7. Аппаратные средства систем автоматики и телемеханики	282
7.1. Функции и общие характеристики элементов систем автоматики и телемеханики.....	282
7.2. Датчики линейного перемещения.....	284
7.3. Системы дистанционной передачи угла и датчики углового перемещения	291

7.4. Датчики температуры.....	299
7.5. Релейные и бесконтактные логические элементы автоматики	310
7.6. Усилители и исполнительные механизмы	321
<i>Выводы</i>	325
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	325
Глава 8. Автоматизация систем электроснабжения	327
8.1. Общие замечания об управлении системой электроснабжения	327
8.2. Общие сведения о релейной защите	330
8.3. Токовые отсечки.....	336
8.4. Максимальная токовая защита с независимыми и ограниченно зависимыми характеристиками времени	341
8.5. Направленная токовая защита.....	346
8.6. Дифференциальная защита трансформаторов	354
8.7. Устройства послеаварийной автоматики электрических сетей.....	358
8.8. Включение синхронных генераторов на параллельную работу	361
8.9. Децентрализованная автоматизация управления воздушными распределительными сетями с помощью автономных интеллектуальных устройств	365
<i>Выводы</i>	369
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	369
Глава 9. Проектирование, монтаж и наладка электроавтоматики промышленных механизмов	371
9.1. Общие замечания о методике проектирования алгоритмов управления промышленными механизмами	371
9.2. Инженерная методика проектирования электроавтоматики станков с числовым программным управлением.....	378
9.3. Электроприводы станков с ЧПУ.....	397
9.4. Надежность и технико-экономические показатели работы систем автоматизации	415
9.5. Расчет экономической эффективности и срока окупаемости внедряемой системы автоматики.....	424
<i>Выводы</i>	426
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	427
Список литературы	429

Предисловие

Автоматизация производственных процессов во всех отраслях промышленности и агропромышленного комплекса (АПК) является одним из самых прогрессивных направлений современной науки и техники. Автоматизация обеспечивает повышение производительности труда, улучшение условий работы обслуживающего персонала и повышение качества выпускаемой продукции. Она способствует снижению материальных и энергетических затрат и, следовательно, повышению эффективности любого производства. Автоматическое управление часто оказывается более точным, быстродействующим и надежным, лишенным субъективных ошибок и экономически более выгодным, чем ручное управление. Это и понятно, поскольку развитие техники привело к применению процессов, происходящих настолько быстро, что человек не успевает управлять ими.

Степень автоматизации управления различными технологическими и вычислительными процессами характеризует общий уровень развития техники в стране. Для автоматизации любого, в том числе сельскохозяйственного, производства необходимо знать теорию и принципы работы систем автоматического управления и контроля, а также устройство и принцип действия отдельных элементов технических средств, из которых состоят системы автоматического управления и контроля.

Теория автоматического регулирования и управления является наукой, которая опирается на сложный математический аппарат в решении линейных и нелинейных дифференциальных уравнений. При этом точные методы решения известны не для всех классов дифференциальных уравнений. Трудями ученых многих стран мира разработаны различные методы, упрощающие решение этих сложных задач. К ним относятся прежде всего операторный метод и частотные методы. Они помогают упростить решение задачи, но делают его менее наглядным. Например, оценку качества систем автоматического регулирования производят по распределению корней, по анализу вещественной частотной характеристики и по логарифмической амплитудно-частотной характеристике.

Широкие возможности современной вычислительной техники и методов математического моделирования позволили практически исключить необходимость в трудоемких процедурах нахождения аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений и специальных методов графического построения переходных процессов. В отличие от принятых ранее частотных методов исследования систем автоматического регулирования, новые методы сделали возможным ввести в теорию автоматики временной анализ. Это позволило взглянуть на многие положения теории

управления с позиции представлений человека о развитии явлений во времени и упростить понятия управления.

Начало создания теории автоматического регулирования было положено публикацией И. А. Вышнеградского «Об общей теории регуляторов» в 1876 г. С тех пор процессы, подлежащие управлению, значительно усложнились, повысились требования к качеству систем автоматического управления. Однако фундаментальные принципы управления остались неизменными. Новый облик теории автоматического управления нашел отражение в монографиях и отдельных публикациях в нашей стране и за рубежом. Однако в учебной литературе эти новые методы освещены еще недостаточно полно.

Цель настоящего учебника — изложить основные методы теории автоматического управления с учетом новейших разработок и таким образом дать представление о современном состоянии данной области науки. Учебник представляет собой введение в теоретический курс по системам управления и автоматического регулирования. В нем подробно описаны классические принципы теории управления, а также отражены основные изменения в методологии основ автоматизации, обусловленные новейшим этапом ее развития.

В настоящее время во многих случаях конечным результатом практической деятельности специалистов по автоматизированному управлению является создание управляющей системы с микроконтроллером, микропроцессором или микроЭВМ, т.е. цифровая реализация полученных алгоритмов управления. Поэтому в структуру учебника включены главы, посвященные дискретным и цифровым системам, а также системам управления с использованием нечеткой логики и искусственных нейронных сетей.

В книге рассмотрены современные методы математического описания процессов в системах автоматического регулирования (САР) с применением хорошо разработанных методов решения дифференциальных уравнений в интегрированных пакетах MathCad и MATLAB. Язык современной теории управления — это математические модели отдельных звеньев САР. Поэтому в условиях бурного развития вычислительной техники именно грамотно составленное математическое описание процессов в САР позволяет анализировать и прогнозировать процессы в них. Сегодня всё меньше требуется умение решать уравнения в общем виде, пользуясь различными аналитическими методами, и всё больше требуется умение решать много задач с применением одного наиболее удобного численного метода. Авторы стремились не перегружать книгу сложными математическими выводами, трудными для понимания студентов, а давать лишь начальные уравнения.

За последние десятилетия техника автоматизации пополнилась новыми большими достижениями. Достаточно сказать, что в современных условиях врач, находящийся за тысячи километров от больного, может, управляя роботизированным устройством, сделать больному сложнейшую операцию. Конечно, осветить в одном пособии все аспекты автоматизации невозможно. Поэтому в книге даны основы автоматизации, которые помогут читателю, пользующемуся дополнительной специальной литературой, разобраться во многих сложных вопросах автоматизации.

В основу предлагаемого учебного издания авторы положили собственный многолетний опыт преподавания в Нижегородском государственном инженерно-экономическом университете (НГИЭУ). Содержание учебника и практикума соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и учебным планам по электротехническим, электромеханическим и электроэнергетическим направлениям и специальностям.

В результате освоения данного учебника студент должен:

знать

- основные принципы построения систем автоматического регулирования с регуляторами прямого и косвенного действия; математическое описание типовых звеньев САР и типовых входных воздействий, структурные схемы и передаточные функции САР; алгебраические и частотные критерии устойчивости, критерии для оценки качества регулирования;
- основные логические операции и реализацию их на релейно-контактных и бесконтактных элементах; программное обеспечение программируемых логических контроллеров и интеллектуальных реле; основные операции нечеткой логики и принцип функционирования систем с нечеткой логикой;
- основные понятия о системах телеуправления, телесигнализации и телеизмерения ближнего и дальнего действия, методы разделения сигналов, уплотнения каналов связи и методы повышения достоверности передачи кодированной информации; принцип селективности релейной защиты и принцип ближнего и дальнего резервирования;
- характеристики и технические возможности современных автоматических устройств; правила построения циклограмм и математический аппарат, применяемый при синтезе систем электроавтоматики промышленных механизмов;

уметь

- анализировать процессы в простейших САР в статическом и динамическом режимах, а также переходные процессы в типовых звеньях САР с помощью временных и амплитудно-фазовых частотных характеристик; анализировать динамические процессы в САР с помощью критериев устойчивости;
- применять методы минимизации логических функций и схем с использованием основных законов алгебры логики; определять количество информации, получаемое в результате единичной проверки системы, и ее энтропию; формулировать на основе эмпирических знаний базу нечетких правил, используемых в системе нечеткого вывода;
- анализировать процессы в простейших телеизмерительных системах интенсивности и кодоимпульсных системах; выбирать уставки и выдержки времени основных и резервных защит с учетом ступени селективности их срабатывания;
- производить обоснованный выбор технических средств автоматизации, отвечающих конкретным условиям эксплуатации, и находить по циклограммам комбинационное решение или вводить в исходную циклограмму промежуточные сигналы, исключающие неоднозначность решения задачи построения системы промышленной автоматики;

владеть

- методами математического описания САУ и основными понятиями о моделировании процессов в простейших САР с помощью современных математических пакетов MathCad и MATLAB; методами преобразования структурных схем САР и алгоритмом выбора промышленных регуляторов для различных объектов управления; методами изображения процессов на фазовой плоскости и основными понятиями о моделировании динамических процессов в САР с помощью передаточных функций;

- методикой составления таблиц неисправностей и алгоритмов диагностирования неразветвленных и разветвленных электрических цепей с дискретными элементами с применением метода дихотомии; методами математического моделирования процессов в системах с нечеткой логикой в среде MATLAB с использованием пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox;

- методами математического описания с помощью булевой алгебры в интегрированном пакете MathCad телемеханической системы трехзначной кодовой автоблокировки на железнодорожном транспорте; понятиями, характеристиками, методами расчета уставок релейной защиты и методами математического моделирования процессов в сложных устройствах релейной защиты с помощью интегрированного математического пакета MathCad;

- навыками выбора и расчета технических средств автоматики, используемых в системах управления; методами проектирования и ввода в эксплуатацию регулируемых электроприводов станков с ЧПУ и их настройкой, достаточной для нормального функционирования привода.

Авторы выражают глубокую благодарность кандидату физико-математических наук, доценту Я. К. Любимцеву (Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского) за полезные замечания, высказанные на этапе предварительного обсуждения рукописи.

Авторы выражают также признательность рецензентам: доктору технических наук, профессору кафедры «Электрификация и автоматизация» факультета информационных технологий и систем связи НГИЭУ, почетному работнику высшего профессионального образования Б. В. Папкову и доктору технических наук, профессору кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Образовательно-научного института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ), заслуженному деятелю науки РФ В. Г. Титову — за ценные замечания, которые в значительной мере способствовали улучшению содержания предлагаемого учебника.

Учитывая, что данный учебник и практикум не свободны от недостатков, авторы будут благодарны читателям за указания на обнаруженные упущения. Замечания и предложения по содержанию учебника просьба направлять в издательство «Юрайт» по адресу: 111123, Москва, ул. Плеханова, д. 4а.

Глава 1

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- основные понятия и определения автоматики;
- основные принципы построения простейших САР с регуляторами прямого и косвенного действия;

- математические методы для автоматизации инженерных расчетов;

уметь

- составлять функциональные и структурные схемы САР;
- анализировать процессы в простейших САР в статическом и динамическом режимах;

- применять математические методы для автоматизации инженерных расчетов;

владеть

- терминологическим аппаратом, необходимым при создании и анализе САР;
 - методами математического описания САУ и моделирования процессов в простейших САР с помощью математического пакета MathCad;
 - методами моделирования процессов в простейших САР с помощью математического пакета MATLAB.
-

1.1. Основные понятия теории автоматического управления

Повышение производительности труда, улучшение условий работы обслуживающего персонала и повышение качества выпускаемой продукции в большой степени зависят от механизации и автоматизации производства [1–5, 11]. Нет ни одной отрасли народного хозяйства, в которой системы автоматического регулирования не находили бы применение. Автоматизация производственных процессов, систем электроснабжения и транспорта является одним из самых прогрессивных направлений современной науки и техники. При этом для осуществления автоматизации технологических процессов в сельскохозяйственном производстве необходимо знать технологию производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, а также используемые средства механизации. Для автоматизации технологических процессов в металлургии необходимо знать металлургическое производство: работу доменных и мартеновских печей, коксовых батарей, нагревательных колодцев и прокатных станов. Система автомати-

ческого ведения поезда требует знания принципов регулирования движения железнодорожного транспорта и работы механизмов и устройств всего подвижного состава.

Итак, для автоматизации производственных процессов в любой отрасли народного хозяйства нужно хорошо знать соответствующий технологический процесс. Кроме этого необходимо знать теорию и принципы работы систем автоматического управления и контроля, а также устройство и принцип действия отдельных элементов (технических средств), из которых состоят системы автоматического управления и контроля.

Автоматика (др.-греч. *automates* — самодействующий) — область науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления (СУ), действующих без непосредственного участия человека. Автоматика является частью науки, называемой кибернетикой.

Кибернетика (др.-греч. *kybernetike* — искусство управления) — область науки, изучающая законы получения, хранения, передачи и переработки информации сложными развивающимися системами (в том числе техническими, биологическими и др.) и разрабатывающая общие принципы построения СУ.

Система автоматического управления (САУ) представляет собой совокупность объекта управления (ОУ) и устройства управления (УУ), связанных между собой каналами связи (КС) и взаимодействующих в процессе работы для достижения определенной цели управления. Процесс управления в этом случае происходит без участия человека-оператора и называется *автоматическим*.

Порядок взаимодействия ОУ и УУ задается *алгоритмом управления*. Слово «алгоритм» обозначает предписание, которое определяет содержание и последовательность действий, приводящих к желаемому результату. В случае когда процесс управления сводится к автоматическому регулированию или поддержанию на постоянном уровне одного или нескольких заданных параметров ОУ, такую систему и называют собственно *системой автоматического регулирования* (САР) или *системой стабилизации*.

Если заданная для регулирования величина изменяется по определенной, заранее установленной программе, то такую систему называют *системой с программным управлением*. Если же заданная величина может изменяться в широких пределах и по произвольному закону, то такую систему называют *следящей системой*.

Теория автоматического управления (ТАУ) — более широкое понятие по сравнению с теорией автоматического регулирования. Теория автоматического управления начала формироваться во второй половине XIX в. сначала именно как теория автоматического регулирования: с появлением паровых машин возникла настоятельная потребность в регуляторах, поддерживающих устойчивый режим работы паровой машины. Тогда же начались научные исследования в области теории управления техническими объектами.

В дальнейшем оказалось, что результаты и выводы этой теории могут быть применимы к управлению объектами различной природы с различными принципами действия. В настоящее время сфера ее влияния расши-

рилась и первоначальное название «теория автоматического регулирования» было заменено на более широкое понятие «теория автоматического управления» [10].

Если в сложных системах часть операций выполняется автоматически, но человек-оператор участвует в процессе управления и также выполняет часть операций, то такое управление считают *автоматизированным*.

Объектом управления могут быть поле, водоем, ферма, теплица, помещение, машина, агрегат и другие установки, производственными процессами в которых управляют устройства управления. В сельскохозяйственном производстве к ОУ относятся и биологические объекты: животные, птицы, растения и др. Однако из-за отсутствия датчиков, контролирующих их параметры, в качестве ОУ обычно принимают совокупность технологического и биологического объектов: ферму с крупным рогатым скотом, птичник с птицами, теплицу с растениями и т.п. В металлургии объектами управления могут быть как отдельные механизмы, например, прокатного стана (валки, нажимное устройство, рольганги), так и весь прокатный стан в целом.

Из сказанного становится ясно, что современные системы автоматического управления представляют собой сложные комплексы взаимодействующих технических устройств и элементов, работа которых основана на различных физических принципах. Эти устройства имеют разные конструктивные исполнения и технические характеристики. При изучении курса теории автоматического управления невозможно подробно рассмотреть все имеющиеся устройства, поэтому основное внимание мы будем уделять не техническим свойствам отдельных элементов, а функциям, которые они выполняют в системе управления, характеру связей между ними и общим закономерностям в системах регулирования. Начнем наше более подробное знакомство с САУ с простейших систем автоматического регулирования (САР) [8, 9].

1.2. Системы автоматического регулирования с регулятором прямого действия и статической характеристикой

Для наглядного пояснения основного принципа действия любой системы автоматического регулирования рассмотрим для сравнения системы ручного и автоматического управления на примере управления уровнем жидкости в резервуаре. Система ручного управления схематично показана на рис. 1.1. Здесь под управлением или, точнее, регулированием мы будем понимать поддержание заданного уровня жидкости в резервуаре. Информацию об уровне H жидкости в резервуаре 1 в зависимости от расхода Q_p и подачи Q_n человек-оператор получает с помощью измерительного устройства $И$, состоящего из поплавка 2 (датчика) и системы рычагов 3 (информационного преобразователя). Оператор, следя глазами за стрелкой измерительного устройства $И$, шкала которого проградуирована в единицах длины, например в сантиметрах, следит тем самым за уровнем H жидкости в резервуаре и управляет этим уровнем, изменяя с помощью задвижки 4 , или дросселя, подачу жидкости Q_n в резервуар 1 . В зависимости от того,

в какую сторону отклоняется уровень жидкости от требуемого значения, человек-оператор уменьшает или увеличивает подачу жидкости $Q_{п}$. Например, если уровень жидкости понижается, оператор увеличивает ее подачу. Поддерживая таким образом постоянный уровень жидкости в резервуаре, оператор обеспечивает равенство $Q_{п} = Q_{р}$. Расход жидкости и подача измеряется объемом жидкости в единицу времени.

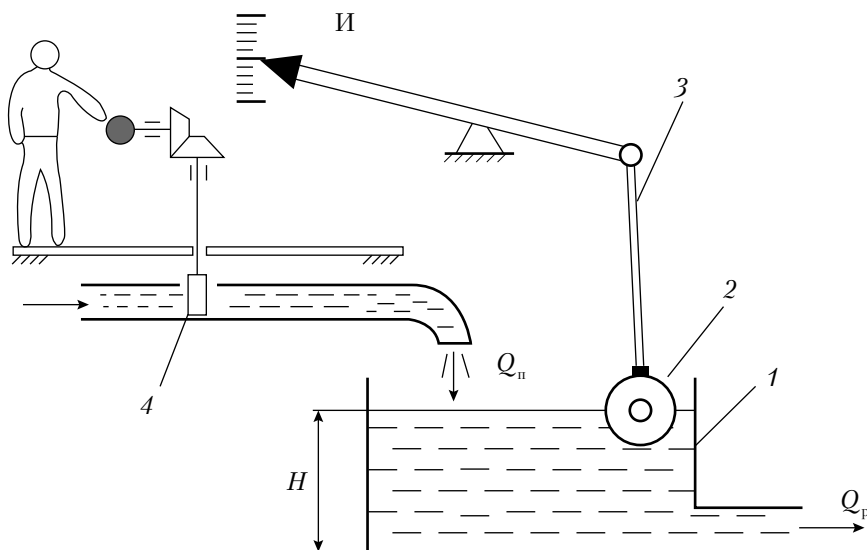


Рис. 1.1. Схема системы управления уровнем жидкости вручную

Точность поддержания заданного уровня зависит от квалификации и опыта оператора. Если он отвлечется на какое-то время, то уровень жидкости может подняться выше или опуститься ниже допустимых значений. Функциональная схема ручного регулирования уровня жидкости в резервуаре приведена на рис. 1.2.

Функциональная схема представляет собой графическое изображение системы регулирования, поясняющее ее принцип действия. На ней показывают отдельные части системы, выполняемые ими функции, а также связи между отдельными частями.

Элементами функциональной схемы называют конструктивно обособленные части системы, выполняющие определенные функции. Их изображают в виде отдельных блоков — прямоугольников.

В описанной системе человек управляет задвижкой 4 в зависимости от наблюдаемого им уровня жидкости H в резервуаре (или отклонения h уровня от требуемого значения). В данном случае отклонение h есть нежелательное отклонение уровня от заданного значения. Очевидно, что открытие задвижки 4 должно быть прямо пропорционально отклонению h . Такой закон регулирования называется *законом регулирования по отклонению*. Функция человека в процессе ручного регулирования в схеме на рис. 1.1 как раз и заключается в том, что он выполняет этот закон регулирования, следя за отклонением уровня жидкости в резервуаре. Система получа-

ется замкнутой с помощью человека (см. рис. 1.2). Такая система может надежно функционировать только тогда, когда человек является неотъемлемой частью этой системы и добросовестно выполняет свои функции. Если же человек отлучится, то система станет разомкнутой и регулирование прекратится, ввиду чего систему на рис. 1.2 без участия человека называют *разомкнутой системой*.

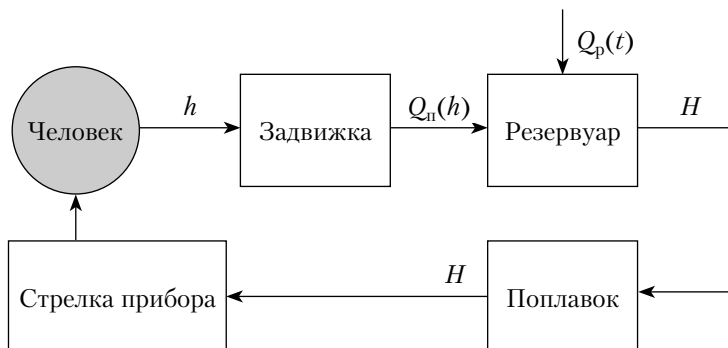


Рис. 1.2. Функциональная схема ручного регулирования уровня жидкости в резервуаре

С учетом сказанного возникает мысль: сделать управление задвижкой 4 в зависимости от уровня жидкости в резервуаре без участия человека так, чтобы сама система всё время работала на уничтожение нежелательного отклонения. Для этого задвижку 4 следует непосредственно (без участия человека) связать с поплавком 2 и сделать систему *замкнутой*. Такая система автоматического управления уровнем жидкости схематически показана на рис. 1.3. Именно таким был первый в истории техники автоматический регулятор, изобретенный И. И. Ползуновым в 1765 г. и предназначенный для регулирования уровня воды в котле его паровой машины.

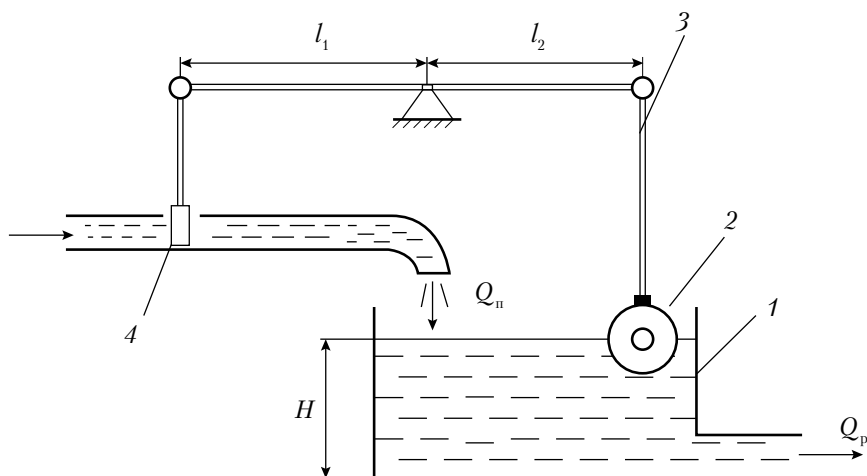


Рис. 1.3. Схема системы управления уровнем жидкости с регулятором прямого действия со статической характеристикой

Устройство автоматического управления уровнем жидкости в системе, представленной на рис. 1.3, состоит из поплавка 2, соединенного системой рычагов 3 с задвижкой 4. При увеличении расхода Q_p жидкости происходит уменьшение ее уровня H , поплавок 2 опускается, задвижка 4 автоматически открывается больше и увеличивает подачу $Q_{п}$ жидкости настолько, чтобы ее возросшая подача была равна возросшему расходу, т.е. $Q_{п} = Q_p$. При этом управляющее воздействие на $Q_{п}$ прямо пропорционально отклонению регулируемой величины. Обозначим отклонение уровня жидкости H от заданного значения H_0 через $h = H_0 - H$. Тогда подача $Q_{п}$ будет пропорциональна отклонению h , т.е. $Q_{п} = kh$, где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения плеч l_1 и l_2 рычага. Итак, рассматриваемая система реализует *закон регулирования по отклонению*, или *пропорциональный закон*, поэтому регулятор, реализующий этот закон, называют П-регулятором или *статическим регулятором*.

Замечание 1.1

Название «статический регулятор» не совсем правильно отражает суть регулятора. Но поскольку это определение сложилось исторически, мы будем им пользоваться, не путая его со статическим режимом.

При уменьшении расхода уровень жидкости поднимается и ее подача автоматически уменьшается. Задача рассматриваемой системы управления та же, что и у ручной, — обеспечивать подачу жидкости, равную ее расходу. При этом уровень H жидкости в резервуаре при разных расходах изменяется незначительно, т.е. можно в первом приближении считать, что он практически не изменяется. Поскольку уровень поддерживается примерно на одном и том же заданном значении, то такую систему по аналогии с системой ручного управления называют системой автоматического поддержания заданного уровня жидкости в резервуаре. Функциональная схема рассматриваемой простейшей системы автоматического регулирования, представленная в виде отдельных элементов, приведена на рис. 1.4. Свойства системы автоматики зависят от свойств отдельных элементов, из которых она составлена. Подробно эти свойства будут рассмотрены в гл. 2. Здесь же осветим общие вопросы автоматического регулирования исходя из функций, которые выполняют отдельные элементы системы.

Зависимость уровня жидкости H в установившемся режиме от состояния подающей задвижки, т.е. от подачи $Q_{п}$,

$$H = H(Q_{п}),$$

называется *прямой связью*, а зависимость подачи $Q_{п}$ от уровня H ,

$$Q_{п} = Q_{п}(H),$$

называется *обратной связью*, поскольку управляющее воздействие на задвижку 4 для обеспечения заданной подачи $Q_{п}$ формируется на основе информации о состоянии управляемого параметра (уровня H или его отклонения $h = H_0 - H$) объекта управления. Здесь H_0 — заданное значение уровня при отсутствии расхода.

В результате получается замкнутый контур или замкнутая система без участия человека. Управление в замкнутом контуре называют *регулированием*, а систему с таким управлением называют *системой автоматического регулирования* (САР). Она состоит из автоматического регулятора (поплавок, система рычагов и задвижка) и регулируемого объекта (резервуара). Регулятор системы называют *регулятором прямого действия*, так как управление уровнем жидкости происходит за счет энергии управляемого объекта. Здесь чувствительный элемент — датчик уровня — без дополнительного источника энергии непосредственно воздействует на регулирующий орган — задвижку.

Процесс регулирования в САР характеризуется передачей воздействия от одного элемента к другому по замкнутому контуру. Все физические величины H , h , Q_{Π} на рис. 1.4, участвующие в этом процессе, зависят друг от друга и влияют друг на друга. Поэтому здесь в общем случае существует не сумма процессов в отдельных элементах системы, а единый круговой замкнутый процесс. Чтобы определить в процессе регулирования состояние какого-либо отдельного элемента, необходимо знать состояние в данный момент всех остальных элементов, включая и объект регулирования. Действительно, чтобы знать уровень жидкости H , необходимо знать подачу, так как уровень $H = H(Q_{\Pi})$ является функцией подачи или расхода. В свою очередь, подача $Q_{\Pi} = Q_{\Pi}(H)$ зависит от уровня жидкости. Получается замкнутый круг.

Все воздействия элементов друг на друга называют *внутренними воздействиями*. Если выходную величину каждого элемента системы можно считать прямо пропорциональной входной величине, то всю систему называют линейной.

Замечание 1.2

Линейной САР можно считать лишь в первом приближении, и то не во всех случаях. На практике имеется широкий класс регуляторов с нелинейными характеристиками. Расчет нелинейных систем гораздо сложнее, чем расчет линейных систем. Поэтому мы в первую очередь будем рассматривать линейные системы, а влияние нелинейности будем оценивать в основном с качественной стороны.

Кроме внутренних воздействий, образующих замкнутый контур, система имеет связь с внешним миром, из которого осуществляются внешние воздействия на систему, т.е. *возмущающие воздействия*. В данном случае возмущающим воздействием будет изменение расхода жидкости Q_r . Задача САР — как можно полнее ликвидировать влияние всех возмущающих воздействий и как можно точнее отработать заданную входную величину.

Из этого примера с очевидностью следует, что для полной автоматизации процесса регулирования нужно вместо разомкнутой системы (см. рис. 1.1 и 1.2) создать замкнутую систему (рис. 1.4), осуществляющую заданный закон регулирования автоматически, без помощи человека. Схема, представленная на рис. 1.4, содержит один контур регулирования и поэтому называется *одноконтурной*.

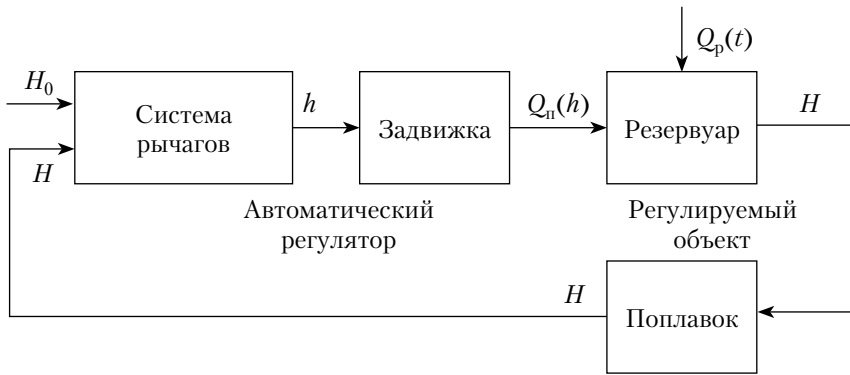


Рис. 1.4. Функциональная схема системы управления уровнем жидкости с регулятором прямого действия со статической характеристикой

Если за выходной параметр рассматриваемой системы принять расход Q_p жидкости, то данную систему можно рассматривать как *следящую систему*, в которой отслеживается расход воды и обеспечивается подача Q_n , точно равная расходу Q_p . Таким образом, к какому виду отнести рассматриваемую систему, зависит от того, какой параметр принять за управляемый. В данном случае мы будем пользоваться сложившейся традицией принимать за управляемый параметр для рассматриваемой системы уровень жидкости H и называть эту систему системой регулирования уровня жидкости в резервуаре или, точнее, системой стабилизации уровня жидкости в установившемся (стационарном) режиме. При заданном значении Q_p уровень будет стабильным, т.е. он не будет понижаться и повышаться, если количество подаваемой жидкости Q_n в единицу времени будет равно количеству потребляемой жидкости Q_p за эту же единицу времени.

Поскольку в системе меняется расход Q_p , то должна автоматически меняться и подача Q_n . Поскольку Q_n зависит от уровня H , то неизбежно будет в какой-то мере меняться и уровень жидкости H , причем чем больше будет расход Q_p и соответственно Q_n , тем меньше будет уровень жидкости H для того, чтобы больше открыть задвижку 4.

Таким образом, в данной системе значение уровня жидкости H *принципиально не может быть строго постоянным*. Оно остается постоянным лишь приблизительно, несколько уменьшаясь с ростом Q_p (рис. 1.5). Такие системы регулирования называются *системами со статической характеристикой*. Значение отклонения h называют *статической ошибкой системы*. При увеличении возмущающего действия (расхода Q_p), или нагрузки, значение статической ошибки h растет, и пропорционально ему увеличивается регулирующее воздействие, направленное на компенсацию возмущения.

При расходе жидкости $Q_p = 0$ уровень жидкости в системе равен максимальному значению H_0 . Задвижка 4 полностью перекрывает трубопровод, и приток жидкости в емкость отсутствует, т.е. $Q_p = Q_n = 0$. При увеличении расхода жидкости Q_p уровень H снижается, статическая ошибка h растет, что ведет к увеличению открытия задвижки 4 и подачи жидкости Q_n . При номинальном, т.е. заданном, расходе $Q_{p,n}$ уровень жидкости становится равным H_n , а статическая ошибка становится равной h_n .

При дальнейшем увеличении расхода Q_p статическая ошибка h возрастает еще больше. Небольшое уменьшение уровня жидкости не является недостатком системы, обеспечивающей автоматическую подачу жидкости Q_{Π} в соответствии с требуемым ее расходом Q_p .

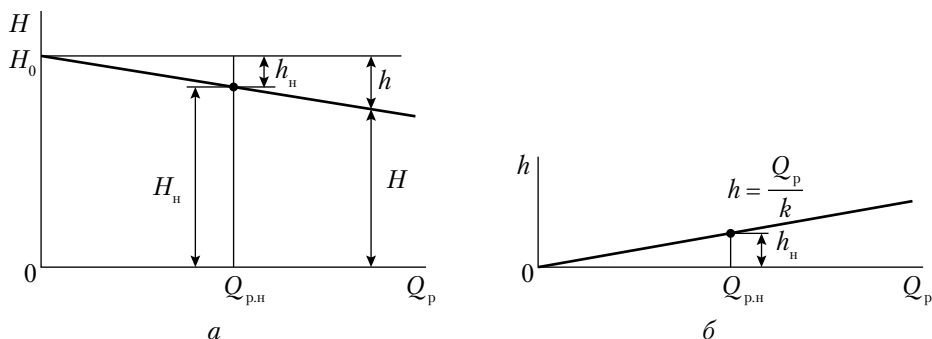


Рис. 1.5. Статическая характеристика САР

Отметим различие роли измерительного прибора в обеих рассмотренных системах. В разомкнутой системе ручного регулирования (см. рис. 1.1 и 1.2) измерительный прибор с датчиком-поплавком служит только для показания значения уровня жидкости. Он дает человеку информацию. В принципе, человек может обойтись и без поплавка, если имеет возможность наблюдать через специальное окно уровень жидкости в резервуаре и получать информацию другим способом.

В замкнутой же системе датчик-поплавок принципиально необходим. Он не только служит для регистрации уровня жидкости и выдачи информации, но и является *датчиком — чувствительным элементом*, который реагирует на отклонение уровня жидкости от требуемого значения и сам передает соответствующее воздействие на задвижку 4. Другими словами, измерительный прибор (чувствительный элемент) в системе автоматического регулирования осуществляет обратную связь выхода системы с входом, которая здесь принципиально необходима. Заметим, что в данном случае на вход системы с датчика передается не только сигнал-информация, но и силовое воздействие.

В данном примере мы рассмотрели пока общий принцип автоматического регулирования в простейшем виде. Отклонение регулируемой величины от требуемого значения называют *ошибкой системы автоматического регулирования*. Следовательно, характерной чертой рассмотренной системы автоматического регулирования является то, что сама ошибка системы автоматического регулирования является движущим сигналом для системы, работающей на уничтожение этой ошибки. Настройка регулятора на определенное значение H может производиться удлинением или укорочением стержня поплавка и его высоты. Стрелочный указатель уровня можно убрать или сохранить для контроля со стороны человека за правильностью работы системы автоматического регулирования.

Хотя, как мы уже говорили, процесс регулирования носит круговой замкнутый характер, в данном конкретном случае определить отклонение h

при известном значении расхода жидкости Q_p в установившемся режиме (в статике) не представляет большого труда, так как в этом режиме регулирующее воздействие равно возмущению, т.е. $Q_p = Q_{\pi}$. Следовательно, из уравнения $Q_{\pi} = kh$ легко определить значение h :

$$h = \frac{Q_{\pi}}{k} = \frac{Q_p}{k}.$$

Однако в общем случае регулирующее воздействие не равно возмущению, и определение параметров в статическом режиме происходит гораздо сложнее. Рассмотрим, как производится анализ процессов в этом случае.

1.3. Анализ процессов в САР в статическом режиме

При исследовании и расчете систем автоматического управления исходят из математического описания происходящих в них физических процессов. Обычно это описание представляют в виде системы дифференциальных уравнений, выражающих связи между переменными величинами и их производными и описывающих поведение системы в целом. Такой подход является наиболее общим. Вместе с тем для большого класса линейных систем автоматического управления широко применяется и другой способ исследования, связанный с составлением структурных схем и использованием операторного метода.

Любую систему автоматического управления (САУ) упрощенно можно представить в виде обобщенной структурной схемы, приведенной на рис. 1.6. Она состоит из объекта управления (ОУ), в котором происходит подлежащий управлению процесс, и управляющего устройства (УУ), предназначенного для управления этим процессом. Управляющее устройство (или автоматический регулятор) включает в себя устройство сравнения УС и усилитель У.

Между функциональными и структурными схемами есть определенная общность: те и другие отражают процесс передачи и переработки информации в замкнутом контуре системы управления. Однако между ними существует и четкое различие. Функциональные схемы поясняют принцип действия САУ и характеризуют систему по составу входящих в нее конструктивно обособленных элементов, рассматриваемых с точки зрения их назначения, т.е. выполняемых ими функций.

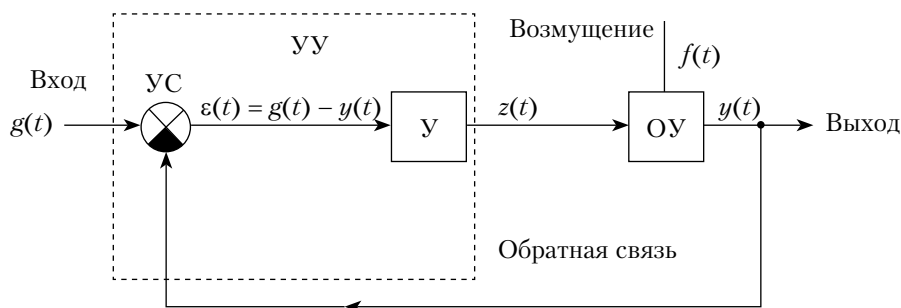


Рис. 1.6. Обобщенная структурная схема САУ