Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров

Среда динамического моделирования технических систем SimInTech

Практикум по моделированию систем автоматического регулирования

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 27.00.00 «Управление в технических системах» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным профессиональным образовательным программам высшего образования по всем укрупненным группам специальностей и направлений подготовки 27.00.00 «Управление в технических системах»

Учебное пособие содержит сведения, необходимые для формирования профессиональных компетенций при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия», и рекомендуется Научно-методическим советом по технологиям, средствам механизации и энергетическому оборудованию в сельском хозяйстве для использования в учебном процессе

ДМК ПРЕСС
издательство

Москва, 2017

УДК 681.515:004.9SimInTech(075.8)
ББК 32.965.8ся73
С75

Рецензенты:
профессор кафедры систем и технологий управления ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
доктор технических наук, профессор **Ю. М. Смирнов**

заведующий лабораторией ИПМаш РАН,
доктор технических наук, профессор **А. Е. Городецкий**

профессор кафедры автоматизации и роботизации
технологических процессов имени академика И. Ф. Бородина ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева», доктор технических наук, профессор **Ю. А. Судник**

заведующий кафедрой электрических машин и электропривода
факультета энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ»,
доктор технических наук, профессор **С. В. Оськин**

Карташов Б. А., Шабаев Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М.
С75 Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.

ISBN 978-5-97060-482-3

Книга содержит основные сведения по компьютерному моделированию автоматических систем, краткое описание среды динамического моделирования технических систем SimInTech, методические указания к лабораторным работам и курсовому проектированию, целевое назначение которых – изучить и освоить методы компьютерного проектирования автоматических систем.

Издание предназначено для студентов технических вузов и факультетов, а также может быть рекомендовано аспирантам, научно-техническим работникам и конструкторам при создании и эксплуатации автоматических систем.

УДК 681.515:004.9SimInTech(075.8)
ББК 32.965.8ся73

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© Карташов Б. А., Шабаев Е. А.,
Козлов О. С., Щекатуров А. М., 2017
ISBN 978-5-97060-482-3
© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2017

Содержание

Предисловие 10

Введение 13

▼ Глава 1

Суть и цели математического моделирования систем автоматического регулирования 15

1.1. Формы представления математических моделей 15
1.1.1. Основные математические модели 15
1.1.2. Математические модели САР в пространстве состояний 24
1.2. Математические модели внешних воздействий 31
1.2.1. Детерминированные воздействия 32
1.2.2. Случайные воздействия 35
1.3. Компьютерное моделирование САР 38
1.3.1. Цели моделирования САР 38
1.3.2. Анализ устойчивости и качества САР 39
1.3.3. Коррекция САР 43
1.3.4. Оптимизация САР 53
1.3.5. Упрощение математических моделей САР с учетом малых параметров 55
1.3.6. Характеристики, режимы работы и цели моделирования релейных САР 57
1.3.7. Моделирование САР с микроЭВМ 63
Контрольные вопросы и задания 70

▼ Глава 2

Основные сведения о программном обеспечении SimInTech и рекомендации по его использованию 72

2.1. Принципы и методика моделирования САР 72
2.2. Запуск программного обеспечения SimInTech 78
2.3. Командное меню главного окна 79
2.4. Панели инструментов главного окна и схемных окон 82
2.5. Палитра компонентов 86
2.6. Краткое описание процедур и этапов работы в среде SimInTech 88
Контрольные вопросы и задания 89

▼ Глава 3

Лабораторные работы 90

Работа 1. Изучение ПО SimInTech на примерах моделирования отдельных элементов САР 90
Контрольные вопросы и задания 101
Работа 2. Изучение программного обеспечения SimInTech на примерах моделирования линейных САР 107
Контрольные вопросы и задания 124
Работа 3. Исследование корректирующих элементов САР 125
Контрольные вопросы и задания 134
Работа 4. Параметрическая оптимизация САР 134
Контрольные вопросы и задания 149
Работа 5. Моделирование релейных САР 149
Контрольные вопросы и задания 153
Работа 6. Моделирование нелинейных САР с помощью блока Язык программирования 153
Варианты индивидуальных заданий 173
Контрольные вопросы и задания 175
Работа 7. Моделирование САР с помощью блока Переменные состояния 175
Демонстрационный пример 176
Варианты индивидуальных заданий 186
Контрольные вопросы и задания 186
Работа 8. Моделирование цифровых САР 187
Демонстрационный пример 187
Контрольные вопросы и задания 200

▼ Глава 4

Курсовое проектирование 201

4.1. Основные рекомендации для выполнения курсовой работы 201
4.1.1. Тема работы и задание 201
4.1.2. Содержание работы 202
4.1.3. Методические рекомендации по выполнению работы 202
4.1.4. Рекомендации по оформлению работы 203
4.2. Пример выполнения курсовой работы на тему «Определение параметров типового закона регулирования САР давления в ресивере» 205
4.2.1. Исходные данные 205
4.2.2. Определение параметров заданного типового закона регулирования 209
4.2.3. Выводы по работе 218
4.3. Рекомендации к курсовому проектированию применительно к цифровым САР 219
4.3.1. Разработка упрощенной принципиальной и составление функциональной схем САР 220
4.3.2. Составление структурной схемы САР 223
4.3.3. Обоснование типа структурной модели 225

▼ Приложение А

К построению структурных схем систем автоматического регулирования 231

А.1. Функциональные элементы и схемы 231
А.2. Передаточные функции и структурные схемы 233

▼ Приложение Б

Задания по линейным системам автоматического регулирования 241

Б.1. Система автоматического регулирования температуры в помещении 241
Б.2. Система автоматического регулирования температуры в печи 243
Б.3. Система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки 245
Б.4. Система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока 246

Б.5. Система автоматического регулирования частоты синхронного генератора..... 248
Б.6. Система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы..... 250
Б.7. Система автоматического регулирования давления в ресивере..... 252
Б.8. Астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины..... 253
Б.9. Статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины..... 255
Б.10. Система автоматического регулирования перемещения рабочего органа робота-манипулятора..... 257
Б.11. Следящая система..... 259
Б.12. Гидравлическая система автоматического регулирования скорости вращения паровой турбины..... 260
Б.13. Система автоматического регулирования угла крена самолета..... 263
Б.14. Система автоматического регулирования скорости стола обрабатывающего станка..... 264
Б.15. Система автоматического регулирования скорости самолета..... 265
Б.16. Вариантные задания..... 265

▼ Приложение В

Задания по нелинейным и дискретным системам автоматического регулирования..... 269

В.1. Релейная система автоматического регулирования температуры в помещении..... 269
В.2. Релейная система автоматического регулирования температуры в печи..... 270
В.3. Релейная система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки..... 271
В.4. Релейная система автоматического регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока..... 271
В.5. Нелинейная система автоматического регулирования частоты синхронного генератора..... 272
В.6. Релейная система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы..... 272
В.7. Релейная система автоматического регулирования давления в ресивере..... 273
В.8. Нелинейная астатическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины..... 274
В.9. Релейная статическая система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины..... 274
В.10. Дискретная система автоматического регулирования температуры в помещении..... 275

В.11. Дискретная система автоматического регулирования температуры в печи 276
В.12. Дискретная система автоматического регулирования температуры теплоносителя зерносушилки 276
В.13. Дискретная система автоматического регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока 277
В.14. Дискретная система автоматического регулирования частоты синхронного генератора 278
В.15. Дискретная система автоматического регулирования температуры в атмосфере теплицы 280
В.16. Дискретная система автоматического регулирования давления в ресивере 281
В.17. Дискретная система автоматического регулирования угловой скорости гидротурбины 282
В.18. Вариантные задания 283

▼ Приложение Г

Описание объектов регулирования 286

Г.1. Производственное помещение как объект автоматического регулирования 286
Г.2. Обогреваемый пол как объект автоматического регулирования 288
Г.3. Звено робота с электрическим приводом как объект автоматического регулирования 289
Г.4. Шахтная зерносушилка как объект автоматического регулирования 291
Г.5. Поворотное устройство солнечной батареи как объект автоматического регулирования 295
Г.6. Силовой трансформатор как объект автоматического регулирования 299
Г.7. Электрический привод патрона токарного станка как объект автоматического регулирования 300
Г.8. Подогреватель мазута как объект автоматического регулирования 302
Г.9. Мармитная плита как объект автоматического регулирования 303
Г.10. Электрический вулканизатор как объект автоматического регулирования 304

▼ Приложение Д

К моделированию САР с микроЭВМ 305

Д.1. Принципы построения и работы САР с микроЭВМ 305
Д.2. Математическое описание дискретных систем автоматического регулирования 310
Д.2.1. Понятие импульсной и цифровой систем 310
Д.2.2. Математическое описание импульсных систем 312

Д.2.3. Математическое описание цифровых систем ... 319
Д.2.4. Определение периода квантования непрерывных сигналов в цифровых системах ... 325
Д.3. Математическое описание систем автоматического регулирования с микропроцессорными регуляторами ... 329
Д.3.1. Общие сведения ... 329
Д.3.2. Алгоритмы функционирования регуляторов ТРМ ... 335
Д.3.3. Математическое описание САР с регуляторами ТРМ ... 337
Д.4. Регулирующие микропроцессорные контроллеры ... 340
Д.4.1. Контроллеры Ремиконт Р-130 ... 340
Д.4.2. Контроллеры Ремиконт Р-130ISa ... 342

▼ Приложение Е

Задания для самоконтроля и тестирования ... 343

Е.1. Линейная САР с единичной ОС ... 343
Е.2. Скорректированная линейная САР с единичной ОС ... 343
Е.3. Линейная САР температуры в атмосфере теплицы ... 345
Е.4. Нелинейная САР с единичной ОС ... 346
Е.5. Релейная САР температуры проточного водонагревателя ... 347
Е.6. Оптимизация нелинейной САР с несколькими ОС ... 348
Е.7. Линейная САР (вариант 1) ... 349
Е.8. Линейная САР (вариант 2) ... 351
Е.9. Линейная САР (вариант 3) ... 352
Е.10. Линейная САР (вариант 4) ... 353
Е.11. Линейная САР (вариант 5) ... 354
Е.12. Линейная САР (вариант 6) ... 355
Е.13. Линейная САР (вариант 7) ... 357
Е.14. Линейная САР (вариант 8) ... 358
Е.15. Линейная САР (вариант 9) ... 359
Е.16. Линейная САР (вариант 10) ... 360
Е.17. Линейная САР (вариант 11) ... 362
Е.18. Линейная САР (вариант 12) ... 363
Е.19. Линейная САР (вариант 13) ... 364
Е.20. Линейная САР (вариант 14) ... 365
Е.21. Линейная САР (вариант 15) ... 366
Е.22. Линейная САР (вариант 16) ... 368
Е.23. Линейная САР (вариант 17) ... 369
Е.24. Линейная САР (вариант 18) ... 370
Е.25. Линейная САР (вариант 19) ... 372
Е.26. Линейная САР (вариант 20) ... 373

▼ Приложение Ж

Фрагменты библиотек SimInTech 375

Ж.1. Библиотека «Источники» 375
Ж.2. Библиотека «Операторы» 378
Ж.3. Библиотека «Динамические» 381
Ж.4. Библиотека «Нелинейные» 389
Ж.5. Библиотека «Субструктуры» 396
Ж.6. Библиотека «Данные» 400
Ж.7. Библиотека «Дискретные» 405

▼ Приложение З

Дополнения к лабораторным работам 408

3.1. Дополнение к лабораторной работе 6. Блок Язык программирования как алгоритмическое средство программирования 408
Пример 1. Моделирование поступательного движения тела с учетом силы сухого трения 409
Пример 2. Моделирование процесса одномерной теплопроводности 412
3.2. Дополнение к лабораторной работе 8. Моделирование цифровых САР с учетом дискретизации сигналов в АЦП 416

Литература 422

Предисловие

Учебными программами по дисциплинам, изучающим автоматику, теорию автоматического управления и регулирования, наряду с теоретическим обучением предусматривается практическое изучение автоматических систем на реальных образцах и макетах, а также на основе математических моделей, реализуемых с помощью современных компьютерных прикладных программ. Такие программные средства способствуют оптимизации образовательного процесса как с целью непосредственного освоения методов теории автоматических систем, так и с целью приобретения практических навыков автоматизированного проектирования автоматических устройств и систем на их основе. К их числу относятся высокоэффективные как зарубежные (Simulink, Skilab, MATRIXX, VisSim, LabVIEW и др.), так и отечественные (МИК, ПА 9, CLASSIC, МВТУ, SimInTech и др.) системы автоматизации динамических расчетов (САДР).

В силу сложившихся обстоятельств в отечественной высшей школе в настоящее время доминируют преимущественно зарубежные программы. Они успешно используются многими российскими вузами в учебном процессе и активно продвигаются на отечественный рынок программных средств (так, например, торговая сеть технической литературы буквально «наводнена» различными учебными изданиями по пакету Simulink; подобная ситуация имеет место и по многим другим зарубежным программам). Применение зарубежных программных средств, при наличии отечественных альтернативных программ, противоречит наметившейся в последнее время тенденции импортозамещения в различных отраслях народно-хозяйственной деятельности РФ, в том числе и в области информационных технологий в части программного обеспечения (ПО). В этой связи следует особо отметить, что многие ведущие отечественные университеты, можно сказать, предвосхитили возникшую в настоящее время проблему импортозамещения в области ПО. Ими к концу прошлого века были созданы программы визуального программирования с русскоязычной справочной системой и удобным для отечественных пользователей интерфейсом, не уступающие по своим функциональным возможностям и характеристикам зарубежным аналогам. К числу таких программ относятся перечисленные выше отечественные программы. Из них особого внимания заслуживает программное обеспечение «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» (называемого далее по тексту учебного пособия как ПО SimInTech, среда SimInTech или SimInTech), разработанное коллективом

ученых и выпускников Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н. Э. Баумана и ООО «3В Сервис» (www.3v-services.com). По своей идеологии построения и основной сущности среда SimInTech является программным средством, создание которого и его широкое внедрение в отечественную высшую школу и научно-техническую сферу под названием программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» (ПК МВТУ) были начаты в начале 90-х годов прошлого столетия. Название SimInTech является сокращением от перевода на английский язык оригинального названия ПК МВТУ (Моделирование В Технических Устройствах, Simulation In Technic).

Являясь альтернативой зарубежным аналогам, ПО SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные технические устройства (механические, гидравлические, теплотехнические, электротехнические и др., в том числе средства и системы автоматики). Вся необходимая сопроводительная документация, методическое обеспечение и исчерпывающая справочная контекстная система SimInTech выполнена на русском языке, что для многих российских пользователей снимает языковый барьер, который имеет место при освоении и использовании таких программ, как Simulink и др., с англоязычным методическим и справочным сопровождением.

Визуальные, интерактивные средства программирования, используемые в среде SimInTech, сопроводительная документация и методическое обеспечение, отличающиеся «прозрачностью» и доступностью для понимания, позволяют пользователю, при наличии элементарных навыков работы в среде операционной системы Windows, за кратчайший срок изучить его и успешно работать в его среде. Программное обеспечение SimInTech совместимо с ОС «Гослинукс», являющейся дистрибутивом сертифицированной в России свободно и открыто распространяемой операционной системы Linux, что немаловажно при необходимости перехода с ОС Windows на ОС Linux.

На основе изложенного выше, учитывая многолетний позитивный опыт применения различных версий ПК МВТУ (в учебном процессе и научных исследованиях многих вузов России и стран СНГ), а также положительные результаты проектных работ, выполненных ООО «3В Сервис», ОАО «Гипротрубопровод» и др. на основе SimInTech [1–3], авторский коллектив посчитал целесообразным его применение в качестве программного обеспечения для учебного пособия. Использована версия 1.6.0.1 ПО SimInTech, подробная информация о котором размещена на официальном сайте simintech.ru.

Для изучения методов математического моделирования автоматических систем, предусмотренных рамками учебного пособия, достаточно знать принципы работы и основные положения теории систем автоматического регулирования, а также, как отмечалось ранее, иметь навыки работы в среде ОС Windows.

Глава 1 содержит последовательное взаимосвязанное описание форм представления математических моделей САР в виде систем дифференциальных и алгебраических уравнений, передаточных функций, структурных схем и в пространстве состояний на конкретных примерах автоматических систем. Рассмотрены цели

и суть компьютерного моделирования САР. Кратко изложены методики анализа устойчивости, качества, коррекции и параметрической оптимизации систем регулирования применительно к их компьютерному моделированию.

В главе 2 приводятся основные сведения о SimInTech, принципы и методика моделирования САР в этой среде, а также практические рекомендации по использованию данного программного обеспечения.

В главе 3 представлено методическое обеспечение цикла лабораторных работ применительно к системам автоматического регулирования (линейным, нелинейным импульсным и цифровым). В результате выполнения этого цикла приобретаются навыки работы в среде SimInTech и закрепляются знания основных положений теории автоматического регулирования.

Глава 4 содержит методическое обеспечение курсового проектирования на основе ПО SimInTech.

Пособие дополняют 9 приложений (одно из них в электронном виде), включающих в себя необходимый справочный материал, варианты индивидуальных заданий для лабораторных работ и курсового проектирования, тестирующие задания и др. Многовариантность заданий этих приложений позволяет повысить эффективность учебного процесса посредством обязательного выполнения индивидуальных заданий каждым обучающимся.

Отдельное электронное приложение «Интерактивные структурные модели» с разработанными моделями в среде SimInTech, которые использованы в учебном пособии, размещено на официальных сайтах издательства «ДМК Пресс» (http://dl.dmkpress.com/978-5-97060-482-3.zip) и ООО «ЗВ Сервис» (http://simintech.ru/books/978-5-97060-482-3.zip).

Учебное пособие является результатом коллективного труда сотрудников ООО «ЗВ Сервис» (А. М. Щекатуров), МГТУ им. Н. Э. Баумана (О. С. Козлов), АЧИИ (Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев).

Успешная реализация проекта разработки данного учебного пособия не была бы возможна без помощи, поддержки и одобрения специалистов в области автоматического управления и информационных технологий. В связи с этим авторы считают своим долгом выразить признательность коллективу ООО «ЗВ Сервис», предложившему идею проекта, за поддержку на всех этапах его выполнения и в частности его куратору А. Н. Петухову за организационно-методологическую помощь и содействие в издании книги. Авторы благодарны профессорам: А. Е. Городецкому, С. В. Оськину, Ю. М. Смирнову, Ю. А. Суднику за рецензирование учебного пособия, полезные замечания и рекомендации которых были учтены при его окончательном редактировании, а также генеральному директору ПО «ОВЕН» Д. В. Крашенинникову за предоставленную возможность использования материалов официального сайта www.owen.ru.

Введение

Одно из центральных мест в автоматике, наряду с системами логического управления (СЛУ), занимают замкнутые системы управления с обратными связями, называемые системами автоматического регулирования (САР). Им присущи два режима работы – динамический (переходный) и статический (установившийся), которые могут иметь устойчивые или неустойчивые (не пригодные для работы системы) переходные процессы. В связи с этим одной из задач, решаемой при проектировании новых и эксплуатации действующих САР, является их исследование на устойчивость. Помимо требования устойчивости, любая САР должна обладать определенными показателями качества процесса регулирования, удовлетворяющими требованиям технологического процесса. Поэтому исследование качества САР является следующей задачей при их создании и эксплуатации. Если в процессе решения этих задач, относящихся в теории автоматического регулирования к так называемому разделу «Анализ САР», получены неудовлетворительные результаты (система оказалась неустойчивой или имеет неудовлетворительные показатели качества), то приходится решать еще третью задачу – задачу из раздела «Синтез САР». При решении задачи синтеза систему дополняют корректирующими элементами с определенной структурой и посредством их параметрической оптимизации достигают выполнения условия устойчивости САР и желаемых показателей качества процессов регулирования. Для решения задач анализа и синтеза систем классическая теория автоматического управления и регулирования располагает достаточно обширным арсеналом эффективных аналитических и графоаналитических методов и подходов [4–6]. В последние десятилетия для решения этих задач широко применяют технологии, ориентированные на использование методов компьютерного моделирования. Их использование позволяет автоматизировать проектирование САР, упростить наладку систем в эксплуатационных условиях, существенно сократив при этом временные и интеллектуальные затраты. В основу таких компьютерных технологий положены высокоэффективные прикладные программы, о которых говорилось в предисловии. Эти программы удобны, просты в использовании и не требуют от пользователя специальной подготовки программиста. Для практического решения задач анализа и синтеза САР на их основе достаточно определенного минимума знаний по теории систем автоматического регулирования в объеме главы 1 и приложений А и Д учебного пособия.

Обобщенная сущность компьютерного моделирования САР с учетом методологии учебного пособия заключается в следующем:

- на первом этапе составляют математическую модель системы (математическое описание) в виде одной из форм, рассмотренных в п. 1.1;
- на втором этапе, руководствуясь целями решаемой задачи, реализуют эту модель посредством компьютера в среде SimInTech.

Суть и цели математического моделирования систем автоматического регулирования

ГЛАВА 1

1.1. Формы представления математических моделей

1.1.1. Основные математические модели

Математическое моделирование технических систем, в том числе САУ и САР, базируется на математических моделях. Под термином **математическая модель** понимается записанная в форме математических соотношений совокупность знаний, представлений и гипотез о технической системе.

Первичной (исходной) формой представления математической модели (математическим описанием) любой САР является система дифференциальных и алгебраических уравнений, отображающих динамические свойства объекта регулирования и элементов системы (регулятора). Эти уравнения могут быть определены *аналитически* на основе законов физики, положенных в основу работы объекта регулирования и элементов системы, или *экспериментально* с использованием методов активного или пассивного эксперимента.

Аналитический метод определения математических моделей автоматических систем рассмотрим на примере простейшей САР температуры в камере для термической обработки деталей механизмов и машин при их производстве, которая представлена на рис. 1.1, где: *1* – термическая камера; *2* – термопара; *3* – детали, подлежащие термической обработке; *4* – нагревательный элемент; *5* – исполнительный орган – тиристорный регулятор напряжения; *6* – силовой блок; *7* – блок управления тиристорами; *8* – электронный усилитель постоянного тока; *9* – задающий резистор; ОР – объект регулирования; РО – регулирующий орган; ИО – исполнительный орган; УО – усилительный орган; СО – сравнивающий орган; ЗО – задающий орган; ВО – воспринимающий орган.

Объектом регулирования в данной САР является термическая камера с размещенными в ней деталями. Регулируемая величина – температура в камере $\theta_к$ – зависит от возмущающего воздействия – температуры окружающей среды $\theta_о$. Величину $\theta_к$ можно регулировать, изменяя регулирующее воздействие – температуру нагревательного элемента $\theta_н$.

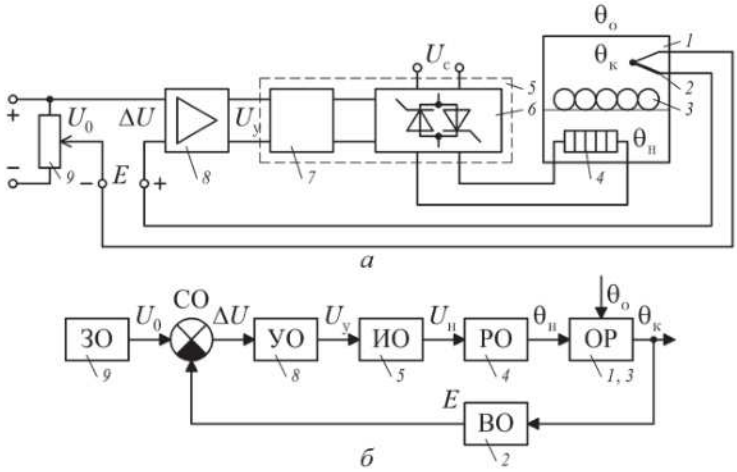


Рис. 1.1. Принципиальная (*а*) и функциональная (*б*) схемы САР температуры в термической камере

Данная САР работает следующим образом. Для измерения температуры в термической камере *1* имеется термопара *2*, сигнал которой – ЭДС E сравнивается с задающим (опорным) сигналом U_0. Изменяя опорное напряжение U_0 с помощью резистора *9*, подключенного к стабилизированному источнику постоянного тока, задают необходимую температуру в камере. При этом входные и выходные величины элементов САР ($\Delta U = U_0 - E$; $U_у$; $U_н$; $\theta_н$) будут иметь определенные значения, соответствующие заданному значению температуры.

Если, например, внешнее возмущение – температура окружающей среды $\theta_о$ уменьшилась, то снизится и температура $\theta_к$ внутри термической камеры. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению сигнала термопары E и к росту сигнала рассогласования $\Delta U = U_0 - E$, что вызовет увеличение напряжения $U_н$ на нагревательном элементе, выделяемой им мощности $P_н$ и его температуры $\theta_н$. Увеличение последней приведет к росту температуры $\theta_к$ до заданного значения. Увеличение температуры окружающей среды $\theta_о$, по аналогии с изложенным выше, вызовет обратный эффект (увеличение $\theta_к$, E и уменьшение $U_у$; $U_н$; $\theta_н$).

Задача построения математической модели данной САР состоит в определении уравнений, отображающих взаимосвязи выходных и входных величин объекта регулирования и элементов системы в динамическом режиме.

В динамическом режиме работы любой САР регулируемая величина, а также входные и выходные величины изменяются во времени t. Поэтому все рассмотренные ранее величины применительно к САР (см. рис. 1.1) будут переменными во времени, и их следует записывать так: $\theta_о(t)$, $\theta_н(t)$, $\theta_к(t)$, $E(t)$, $\Delta U(t)$, $U_у(t)$, $U_н(t)$. Для упрощения записи допускается изображение переменных величин без указания времени t, что и будет использовано при дальнейшем изложении.

Литература

1. *Баум Ф. И.* Программное обеспечение SimInTech для программирования приборов систем управления / Ф. И. Баум, О. С. Козлов, И. А. Паршиков, В. Н. Петухов, К. А. Тимофеев, А. М. Щекатуров // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 6. С. 354–357.
2. *Паршиков И. А.* Моделирование энергоблока с реакторной установкой с жидкометаллическим теплоносителем в программном комплексе SimInTech / И. А. Паршиков, В. Н. Петухов, К. А. Тимофеев, А. М. Щекатуров // Университетский научный журнал. 2013. № 5. С. 144–156.
3. *Щекатуров А. М.* Методика разработки функционального программного обеспечения АСУ ТП ЯЭУ с применением модельно-ориентированного подхода в SimInTech / А. М. Щекатуров, К. А. Тимофеев, О. С. Козлов // Университетский научный журнал. 2015. № 15. С. 80–87.
4. Системы автоматического регулирования: Практикум по математическому моделированию / под ред. Б. А. Карташова. Ростов-на-Дону: Феникс, 2015. 458 с.
5. Справочная система SimInTech. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://simintech.ru/help/rus/.
6. *Попов Е. П.* Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. М.: Наука, 1989. 301 с.
7. *Певзнер Л. Д.* Практикум по теории автоматического управления / Л. Д. Певзнер. М.: Высшая школа, 2006. 590 с.
8. *Ким Д. П.* Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы / Д. П. Ким. М.: Физматгиз, 2003. 287 с.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1–3 / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
10. *Топчеев Ю. И.* Атлас для проектирования систем автоматического регулирования / Ю. И. Топчеев. М.: Машиностроение, 1989. 752 с.
11. *Бородин И. Ф.* Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. М.: КолосС, 2006. 343 с.
12. *Башарин А. В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. Л.: Энергия, 1990. 512 с.

13. *Петраков Ю. В.* Теория автоматического управления технологическими системами / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев. М.: Машиностроение, 2008. 336 с.
14. *Бесекерский В. А.* Системы автоматического управления с микроЭВМ / В. А. Бесекерский, В. В. Изранцев. М.: Наука, 1987. 320 с.
15. *Иващенко Н. Н.* Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н. Иващенко. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.
16. *Карташов А. Б.* Исследование и разработка регулируемого электропривода подачи рабочего органа выгрузчика консервированных кормов: сб. трудов конкурсных работ молодых ученых Дона «Фундаментальные и прикладные проблемы современной техники» / А. Б. Карташов. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 1997. 365 с.
17. *Карташов Б. А.* Моделирование нелинейных динамических систем в среде программного комплекса «МВТУ» / Б. А. Карташов, А. Б. Карташов, М. Ю. Медведько, Е. А. Шабаев // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 8. С. 25–30.
18. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1977. 831 с.
19. *Филлипс Ч.* Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.
20. *Герман-Галкин С. Г.* Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
21. 2ТРМ1 измеритель-регулятор микропроцессорный двухканальный. Руководство по эксплуатации. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.owen.ru/uploads/re_2trm1_m_din_2371.pdf.
22. ТРМ12 измеритель ПИД-регулятор микропроцессорный одноканальный. Руководство по эксплуатации. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.owen.ru/uploads/re_trm12_m_din_2374.pdf.
23. Каталог 2016. Оборудование для автоматизации. Каталог продукции ПО «ОВЕН». 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.owen.ru/upl_files/catalog15/catalog_OWEN_2016.pdf.
24. *Козлов О. С.* Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О. С. Козлов, Д. Е. Кондаков, Л. М. Скворцов, К. А. Тимофеев, В. В. Ходаковский // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 20–25.
25. *Урмаев А. С.* Практикум по моделированию / А. С. Урмаев. М.: Наука, 1976. 192 с.