

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Ю. Г. Древс

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ



УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Ю. Г. Древс

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Допущено

Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 230100
«Информатика и вычислительная техника»



Москва
Лаборатория знаний

УДК 004.3
ББК 32.973-02
Д73

Серия основана в 2009 г.

Древс Ю. Г.

Д73 Технические и программные средства систем реального времени : учебник / Ю. Г. Древс. — М. : Лаборатория знаний, 2015. — 334 с. : ил. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-9963-1724-0

Изложены принципы построения аппаратуры, особенности операционных систем, программирование, отладка и испытания, а также вопросы эксплуатации систем управления физическими объектами. При рассмотрении операционных систем внимание обращено на элементы, имеющие особое значение для систем реального времени: диспетчеризацию и синхронизацию задач, организацию прерываний и счет времени. Кратко рассмотрено программирование задач управления реального времени. Приводятся сведения по методике отладки и характеристикам эксплуатации подобных систем.

Для подготовки бакалавров по информатике и вычислительной технике, будет полезен магистрам, а также специалистам по автоматизированным системам управления и обработке информации.

УДК 004.3
ББК 32.973-02

Учебное издание

Серия: «Учебник для высшей школы»

Древс Юрий Георгиевич

**ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Учебник

Редактор *Т. Г. Хохлова*

Художник *В. Е. Шкерин*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*

Корректор *Д. И. Мурадян*

Компьютерная верстка: *В. А. Носенко*

Подписано в печать 26.05.15. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 21,00. Тираж 500 экз. Заказ

Издательство «Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru,

<http://www.Lbz.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Глава 1. Введение	5
1.1. Управление как процесс принятия и реализации решений.....	5
1.2. Классификация систем управления	7
1.3. Структура систем реального времени.....	11
Контрольные вопросы и упражнения.....	14
Глава 2. Элементы измерительного канала.....	15
2.1. Структура измерительного канала	15
2.2. Датчики	18
2.3. Операционные усилители	38
2.4. Аналого-цифровые преобразователи	44
2.5. Контроль источников информации	55
Контрольные вопросы и упражнения.....	56
Глава 3. Средства переработки информации	57
3.1. Типы средств переработки информации.....	57
3.2. Микроконтроллеры	59
3.3. Многопроцессорные вычислительные системы ..	73
3.4. Схемный (аппаратный) контроль средств переработки информации.....	83
3.5. Основные характеристики средств переработки информации.....	87
Контрольные вопросы и упражнения	92
Глава 4. Средства отображения информации и управления	93
4.1. Средства отображения информации.....	93
4.2. Средства управления системой	108

4.3. Пульты управления	111
4.4. Деятельность оператора	
в системах управления	117
Контрольные вопросы и упражнения	125
Глава 5. Исполнительные устройства	126
5.1. Типы исполнительных устройств	126
5.2. Привод	134
Контрольные вопросы и упражнения	137
Глава 6. Источники электроснабжения	138
6.1. Общая организация системы	
электроснабжения	138
6.2. Вторичные источники электроснабжения	139
6.3. Защита от возмущений	
в системе электроснабжения	143
Контрольные вопросы и упражнения	146
Глава 7. Устройства связи с объектом управления	147
7.1. Архитектура доступа с процессорами	
ввода/вывода	147
7.2. Шинная архитектура доступа	155
Контрольные вопросы и упражнения	163
Глава 8. Передача сигналов по линиям связи	164
8.1. Физические среды передачи информации	164
8.2. Передача непрерывных сигналов	169
8.3. Передача дискретных сигналов	172
8.4. Модуляция и детектирование	174
8.5. Принципы многоканальной передачи	178
8.6. Локальные сети	180
Контрольные вопросы и упражнения	184
Глава 9. Операционные системы реального времени	185
9.1. Основные понятия и определения	185
9.2. Структуры операционных систем	192
9.3. Особенности задач и алгоритмов	
систем реального времени	197

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многолетний опыт чтения лекций по основам построения автоматизированных систем управления реального времени и практическое отсутствие учебников и учебных пособий по этой тематике привели к мысли о целесообразности систематизированного изложения материала, имеющего отношение к этой проблеме.

Автоматизация является важнейшей технологией, обеспечивающей эффективность производства, а автоматизированные системы управления реального времени — важнейшая составная часть автоматизации. Ее будущее не ограничено производством: ей отведена решающая роль в эффективном использовании природных ресурсов, в защите окружающей среды от быстрого и неконтролируемого промышленного развития, в обороне и в научных исследованиях. Автор глубоко убежден в том, что элементарные знания о системах реального времени должны быть частью общего информационного багажа специалиста по автоматизированным системам обработки информации и управления.

Конечно, молодому специалисту не поручат сразу проектировать всю систему управления. Скорее всего, он получит для разработки лишь небольшой ее фрагмент. Однако практика показала, что без знания структуры всей системы, не имея представления о взаимодействии всех ее элементов, ему вряд ли удастся найти оптимальный вариант построения своего небольшого элемента.

Из данного учебника нельзя извлечь сведений о том, как нужно проектировать систему управления реального времени, но можно и нужно представить, какие средства

должны быть в ее составе и как они могут быть объединены для совместной работы.

Автор выражает глубокую признательность коллектиvu кафедры «Управляющие интеллектуальные системы» национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» за постоянное внимание к данной дисциплине и коллегам: доктору технических наук профессору Я. А. Хетагурову, кандидату технических наук доценту Е. Ф. Березкину и кандидату технических наук доценту В. Б. Шувалову за отдельные замечания по тексту, которые помогли избежать некоторых неточностей изложения.

Особую благодарность автор приносит строгим, но доброжелательным рецензентам доктору технических наук профессору Л. И. Григорьеву, доктору технических наук профессору В. А. Острейковскому и начальнику научно-исследовательского отделения НТЦ «НИЭМИ» ОАО ГСКБ «Алмаз–Антей» кандидату технических наук В. Ф. Церце-ку, которые взяли на себя нелегкий труд анализа рукописи и чьими советами автор воспользовался.

Не могу также не поблагодарить моих студентов, общение с которыми помогло выстроить концепцию этого учебника и определить должный уровень изложения материала.

1

ГЛАВА

ВВЕДЕНИЕ

1.1. УПРАВЛЕНИЕ КАК ПРОЦЕСС ПРИНЯТИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ

В повседневной деятельности мы часто сталкиваемся с терминами «управлять», «регулировать» и понимаем под этими терминами задачу воздействия на параметры объекта для достижения определенных целей. Естественно называть управлением целенаправленное изменение параметров объекта управления.

Совокупность наиболее важных параметров, от которых зависит функционирование объекта управления, описывает его состояние. Знание состояния объекта управления — важнейший фактор, определяющий принятие решения по управлению. Другой важный фактор — возмущения, которым подвергается объект управления со стороны других объектов, состоянием которых мы не можем управлять. Множество таких объектов объединяется понятием «внешняя среда». На основе оценок состояния объекта управления и внешней среды принимается решение по управлению; конечно, при этом учитывается цель функционирования и ресурсы, которыми мы располагаем. После того как решение принято, оно реализуется с потреблением ресурсов. Так мы приходим к структурной схеме процесса управления, показанной на рис. 1.1.

Управление осуществляется путем выдачи на объект управляющих воздействий

$$X(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n; t).$$



Рис. 1.1. Структурная схема процесса управления

Кроме них объект управления подвергается воздействию возмущений со стороны внешней среды; часть из них

$$Z(t) = (z_1, z_2, \dots, z_m; t)$$

измеряется, другая часть

$$F(t) = (f_1, f_2, \dots, f_s; t)$$

неизвестна (часто неизвестно также значение s).

Контролируемые параметры, по которым ведется управление,

$$Y(t) = (y_1, y_2, \dots, y_r; t), \quad -$$

это управляемые параметры. Они дают обобщенную информацию о состоянии объекта управления

$$S(t) = (s_1, s_2, \dots, s_k; t).$$

Смена состояний объекта управления определяет процесс его функционирования:

$$S(t) = \phi[X(t), Z(t), F(t), Y(t), S(t-1)].$$

Задача управления состоит в том, чтобы найти такую функцию $X(t)$, которая обеспечила бы перевод объекта в заданное конечное состояние S^* , соответствующее цели его функционирования. Этот перевод должен закончиться за конечное число шагов и требовать минимальных затрат ресурсов R .

Для управления объектом создается система управления. Под *системой* принято понимать совокупность связанных между собой элементов. Система характеризуется *структурой* $R = \langle E, C, \lambda \rangle$, где E — множество элементов; C — множество связей между элементами; λ — соответствие между элементами.

При этом *элементом* называется часть системы, не подлежащая дальнейшему делению на части при данном уровне рассмотрения. Элементы могут представлять собой понятия, и тогда мы будем иметь дело с понятийной системой; если элементами системы являются физические объекты, то налицо техническая система. Заметим, что в определении отмечается некоторая совокупность, т. е. некоторая целостность. Нас интересуют не отдельные элементы, а все вместе, взятые в некотором единстве. Принципиальным является необходимость учета взаимодействия элементов, так как именно оно придает совокупности элементов новое качество.

Часть элементов системы, выделенная на основе какой-либо общности элементов, называется *подсистемой*.

Системы, создаваемые человеком, обладают целью функционирования. Именно наличие цели служит тем объединяющим фактором, на основе которого объединяются элементы. Такие системы называют *организованными* системами.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Тип системы зависит от того, как принимается решение по управлению. Если в процессе принятия решения участвует человек, то такая система называется *автоматизированной* (АСУ); если человек исключен из процесса принятия решения, то имеет место автоматическая система управления (САУ).

По физической природе объекта управления различают системы управления *технологическими процессами*, где объект управления представляет собой физический объект, и системы управления *экономико-организационного типа*, в которых объектом управления является хозяйственная деятельность. В последнее время создаются интегрирован-

ные системы управления, в которых присутствуют объекты обоих типов.

Другим признаком, по которому классифицируются системы, является время принятия решения. В системах управления оно зависит от динамики объекта, которая может быть различной: от миллисекунд до часов и дней. Условная граница лежит на уровне 100 мс: если время принятия решения не превышает этой величины, то говорят, что система функционирует в *реальном масштабе времени*; если превышает, то говорят о *произвольном масштабе*. Системы управления технологическими процессами всегда функционируют в реальном масштабе времени. Время в таких системах является одним из факторов, определяющих эффективность системы.

Хорошим примером систем реального времени является промышленный робот, который должен брать что-то с ленты конвейера. Объекты на конвейере движутся, и робот имеет некоторый интервал времени для того, чтобы схватить объект. Если робот опаздывает, объекта уже не будет на месте, и поэтому работа будет неверной. Если робот поспешил, объекта там еще не будет.

Принято различать системы «жесткого» и «мягкого» реального времени.

Системой «жесткого» реального времени называют систему, в которой неспособность обеспечить реакцию на какие-либо события в заданное время является отказом и ведет к невозможности решения поставленной задачи. В качестве условной временной границы допустимого времени реакции обычно принимают 100 мкс. В жесткой системе:

- никакое опоздание неприемлемо ни при каких обстоятельствах;
- результат, выданный с опозданием, бесполезен;
- нарушение крайнего срока времени отклика рассматривается как катастрофический отказ;
- цена превышения заданного времени отклика бесконечно велика.

Точного определения для «мягкого» реального времени не существует, но принято считать, что система иногда

может не успевать делать все, что надо, в установленные сроки. В мягкой системе:

- цена за опоздание результата возрастает с увеличением запаздывания;
- критическим фактором является низкая производительность, а не опоздания.

В терминах вероятностей эти определения могут быть записаны следующим образом:

- 1) для систем «мягкого» реального времени

$$P\{|t - t_0| > \Delta t\} > 0;$$

- 2) для систем «жесткого» реального времени

$$P\{|t - t_0| > \Delta t\} = 0,$$

где t — фактический момент выдачи управляющего воздействия; t_0 — заданный момент выдачи управляющего воздействия; Δt — допустимая погрешность.

Главное свойство систем реального времени — предсказуемость, или детерминированность. Только благодаря этому свойству разработчик может гарантировать корректность спроектированной системы. При этом собственно скорость реакции системы важна только как относительная скорость по отношению к скорости протекания внешних процессов, за которыми система реального времени (СРВ) должна следить или которыми должна управлять.

В зависимости от функций, выполняемых системой управления, различают следующие виды (формы) автоматизации: управление, регулирование, контроль, защита и блокировка.

Управление представляет собой принятие решений и выдачу на объект управления совокупности воздействий, выполняемых на основании информации о ходе технологического процесса, с целью поддержания требуемого технологического режима или улучшения его параметров. Обычно предполагается, что управление подразумевает поиск и реализацию оптимального (по определенному критерию) решения.

Регулирование представляет собой принятие решений и выдачу на объект управления совокупности воздействий,

выполняемых на основании информации о ходе технологического процесса, с целью поддержания параметров производственных процессов постоянными или изменяющимися по заданному закону.

Контроль — это наблюдение за параметрами объекта управления с целью определения его состояния. Управление и регулирование не могут реализоваться без контроля. Параметры, подлежащие контролю, в зависимости от их физической природы различны (температура, давление, расход топлива, число оборотов, сила тока и т. п.). Контроль может быть местным и дистанционным.

Местный контроль дает возможность наблюдать за состоянием параметра непосредственно в контролируемой точке. При *дистанционном* контроле за состоянием параметров можно следить на расстоянии от контролируемой точки.

Защита — это комплекс средств и мероприятий по предохранению агрегатов и установок при нарушениях технологических режимов.

Блокировка — это комплекс средств и мероприятий, предохраняющих участок установки или агрегат от неправильных операций вследствие невнимательности оператора или ошибочных команд. Различают две группы блокировок: запретно-разрешающую и аварийную.

Запретно-разрешающие блокировки предотвращают неправильные включения и отключения механизмов, а также нарушение установленной технологическими требованиями очередности пуска и остановки различных механизмов.

Аварийные блокировки предназначены для автоматического последовательного отключения (включения) механизмов в соответствии с режимом работы агрегата, подвергшегося аварийному отключению.

Блокировочные устройства применяют также в случаях, когда требуется исключить одновременную подачу команд противоположного знака на один и тот же регулирующий орган из разных мест или от автоматического и дистанционного управления, когда оба вида управления действуют параллельно.

1.3. СТРУКТУРА СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Основными составляющими систем реального времени являются комплекс технических средств, а также программное и информационное обеспечение.

Для принятия решения по управлению нужно знать о состоянии объекта управления и возмущениях со стороны внешней среды. Эта информация вводится в систему с помощью *измерительных средств*, которые являются источниками информации для *средств переработки информации*. Эти средства реализуют алгоритм принятия решения и формируют управляющие воздействия, которые передаются на исполнительные средства, непосредственно связанные с изменяемыми параметрами объекта управления.

Для того чтобы человек участвовал в процессе принятия решения, ему также нужно дать возможность следить за состоянием объекта и внешней среды. Для этого он снабжается *устройствами отображения информации*, которые предназначены для ее преобразования в удобную для восприятия форму (чаще всего — в визуальную). Человек может вмешиваться в управление, воздействуя на исполнительные средства и на средства переработки информации с помощью *управляющих средств*.

Части системы могут находиться на значительных расстояниях друг от друга, поэтому часть связей представляет собой *средства передачи данных* — специальные технические устройства, предназначенные для этих целей. Еще одна составляющая комплекса технических средств — *система энергоснабжения*; ее назначение — *снабжение* всех технических средств электроэнергией заданного напряжения и мощности.

Все эти составляющие комплекса технических средств показаны на рис. 1.2.

В качестве средств переработки информации обычно применяется узел на основе вычислительной машины. Тип и структура этого узла могут быть различными — от простейшего контроллера до кластера, однако в любом случае его применение связано со следующими особенностями:

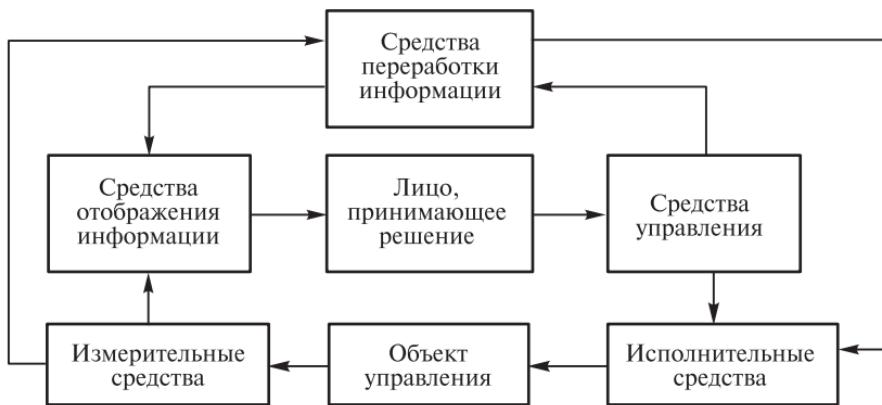


Рис. 1.2. Структурная схема комплекса технических средств

- узел должен «следить» за множеством параллельно протекающих процессов;
- узел должен обрабатывать запросы, поступающие в произвольные моменты времени;
- допустимое время принятия решения обычно соизмеримо с временем реализации алгоритма выработки такого решения;
- узел должен удовлетворять повышенным требованиям по надежности и достоверности информации;
- состав задач, которые решает этот узел, заранее известен, и программное обеспечение для их решения отлажено.

Структурное построение комплекса технических средств может быть различным и в значительной степени определяется структурой объекта управления. Оно может быть *децентрализованным*, и тогда достоинства такого технического решения: удобство отладки системы (можно одновременно отлаживать все подсистемы, что сокращает время отладки системы в целом); удобство модернизации (система легко наращивается, отдельные подсистемы легко заменяются); устойчивость к воздействию неисправностей. Однако в системе с такой структурой возможно неэффективное использование ресурсов.

Структура технического комплекса может быть *централизованной*, когда все задачи решаются одним достаточно

мощным вычислительным средством. Такое построение обеспечивает более высокую эффективность использования ресурсов, но имеет меньшую живучесть и большую трудоемкость отладки и модернизации.

В реальных системах управления реализуется обычно не более трех уровней. На *нижнем* уровне решаются задачи сбора и предварительной обработки информации, а также вывода управляющих сигналов на объект. Эти функции реализуются специализированными вычислительными устройствами — контроллерами. Если контроллеры находятся в непосредственной близости от объекта управления, но далеко от систем верхнего уровня, то для связи их в единую систему используются промышленные сети.

На *среднем* уровне концентрируется управляющую программу всей системы. Кроме того, он служит сервером, через который происходит обмен информацией между нижним и верхним уровнями.

Верхний уровень обеспечивает прием и обработку информации, решение комплексных задач управления, ведение и анализ архивов и аварийных ситуаций, создание отчетных документов.

Особенности структурного построения комплекса технических средств учитываются при построении *программного обеспечения*. Оно включает в себя операционную систему, программы решения функциональных задач и программы контроля и обеспечения устойчивости вычислительного процесса. В децентрализованных и иерархических структурах блоки операционной системы могут размещаться по-разному: операционная система может быть локализована в виде единого модуля или распределена по отдельным задачам.

Главное назначение операционной системы — обеспечение параллелизма и обработка заявок, поступающих в случайные моменты времени. Программы решения функциональных задач выполняют основное целевое назначение системы — управление объектом. Их включение может осуществляться по-разному: центральным диспетчером операционной системы, местными диспетчерами или предыду-

щей задачей. Третья группа программ контролирует работу системы.

Информационное обеспечение — это совокупность информационных массивов, которые содержат данные, необходимые для управления системой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Что понимается под «внешней средой»?
2. Повторите основные понятия теории систем.
3. Чем система элементов отличается от множества элементов?
4. Повторите формализацию процесса управления.
5. Сформулируйте две постановки задачи выбора оптимального варианта построения системы.
6. Чем управление отличается от регулирования?
7. Как понимается термин «система реального времени»?
8. Приведите примеры систем «жесткого» и «мягкого» реального времени.
9. В системе принятия и реализации решения некоторые связи обозначают информацию о состоянии ресурса, а некоторые — потребление ресурса. Укажите на рис. 1.1 эту особенность.
10. Перечислите достоинства и недостатки децентрализованной и централизованной структур управления.
11. Какие особенности систем программного управления определяют требования к ним?

2

ГЛАВА

ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

2.1. СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

Формирование сигнала и преобразование его в данные — основная функция измерительного канала. Рассмотрим его типовую структуру.

Исходная измеряемая величина преобразуется в электрический сигнал *датчиком*.

Сигнал на выходе датчика — это естественный выходной сигнал. Характерная особенность АСУ РВ — многообразие типов сигналов на входах измерительных каналов. Для удобства построения систем все они приводятся к единому нормированному виду с помощью *унифицирующего (нормирующего) измерительного преобразователя* (УИП). Унифицированный сигнал — это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода и диапазона ее измерения.

Сигнал с выхода УИП передается на *аналоговый фильтр низких частот* (АФ).

Применение аналогового фильтра низких частот в измерительном канале базируется на том факте, что амплитудно-частотная характеристика такого фильтра имеет ярко выраженный нелинейный характер: $k(\omega) = 1$ при $\omega < \omega_0$ и $k(\omega) = 0$ при $\omega > \omega_0$ (для идеального фильтра). За счет этого частоты, большие частоты ω_0 , через такой фильтр не проходят, так что спектральная плотность мощности процесса, поступающего на последующие каскады преобразования, $S(\omega) \approx 0$ при $\omega > \omega_0$. Это используется для решения двух задач.

$$\begin{bmatrix} & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & \end{bmatrix}$$



Юрий Георгиевич Древс – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, ветеран атомной энергетики и промышленности, почетный профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Автор более 150 научных и учебно-методических работ в области проектирования систем реального времени, моделирования, принятия решений в системах обработки информации различного назначения и создания электронных учебников.