

№ 1932

МИСиС

Р.Р. Васильев
Н.А. Захаров
Ю.Д. Миткевич

Электронные устройства автоматики

Основы цифровой электроники

Курс лекций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1932

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра компьютерных информационных и управляющих систем автоматике

Р.Р. Васильев

Н.А. Захаров

Ю.Д. Миткевич

Электронные устройства автоматики

Основы цифровой электроники

Курс лекций

Издание второе, переработанное и дополненное

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета

Москва Издательский Дом МИСиС 2009

УДК 681.511.2
В19

Рецензент

канд. техн. наук *В.И. Клепиков* (ИТМиВТ им. С.А. Лебедева РАН)

Васильев Р.Р., Захаров Н.А., Миткевич Ю.Д.

В19 Электронные устройства автоматики: Основы цифровой электроники: Курс лекций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 122 с.
ISBN 978-5-87623-228-8

В курсе лекций изложены основы булевой алгебры, синтеза комбинационных и временных логических схем, рассмотрены типовые комбинационные и временные схемы для автоматики и вычислительной техники, а также применение этих средств в микропроцессорных системах управления.

Соответствует программе курса «Электронные устройства автоматики».

Предназначен для студентов специальности 220301, но может быть полезен и студентам других специальностей.

УДК 681.511.2

ISBN 978-5-87623-228-8

© Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС), 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные понятия	5
1.1. Системы и автоматы	5
1.2. Коды и кодирование информации	11
1.3. Системы счисления	13
2. Краткие сведения из алгебры логики	18
2.1. Логические функции и способы их задания	18
2.2. Элементарные логические функции	20
2.3. Основные законы алгебры логики	24
2.4. Нормальные формы булевых функций	27
2.5. Минимизация булевых функций	28
Контрольные вопросы	35
3. Комбинационные логические схемы и устройства	36
3.1. Последовательность действий при синтезе комбинационных схем	36
3.2. Повторители, инверторы, шинные формирователи	39
3.3. Устройство одноразрядного сложения по модулю 2	41
3.4. Сумматоры	43
3.4.1. Одноразрядный сумматор на два входа	43
3.4.2. Одноразрядный сумматор на три входа	43
3.5. Шифраторы и дешифраторы	45
3.6. Мультиплексоры и демультиплексоры	49
3.7. Схемы сравнения двух чисел	50
3.8. Схемы контроля на четность	54
3.9. «Состязание сигналов» в комбинационных логических устройствах	56
Контрольные вопросы	58
4. Временные логические функции и устройства	59
4.1. Описание временных логических функций и устройств	59
4.2. Свойства схем с элементами задержки	62
4.3. Синтез временных логических схем с элементами задержки	64
4.4. Синтез временных логических схем с элементами памяти	68
4.5. «Состязание сигналов» и ложные состояния во временных логических схемах	72
Контрольные вопросы	76
5. Типовые временные логические схемы и устройства	77
5.1. Триггерные схемы	77
5.1.1. Классификация триггерных схем	77
5.1.2. Асинхронный RS-триггер	78
5.1.3. Синхронный RS-триггер	80

5.1.4. D- и DV-триггеры.....	81
5.1.5. Двухступенчатый RS-триггер	82
5.1.6. Двухступенчатый D-триггер	84
5.1.7. Двухступенчатый T-триггер.....	84
5.1.8. JK-триггерные схемы.....	85
5.1.9. Триггерные схемы со сложной входной логикой и установочными входами.....	87
5.1.10. Динамическое управление синхронными триггерами.....	88
5.1.11. Триггер Шмитта	91
5.2. Регистры. Регистры сдвига	92
5.3. Делители частоты.....	95
5.4. Полупроводниковые запоминающие устройства	101
5.4.1. Классификация запоминающих устройств	101
5.4.2. Схемотехника полупроводниковых запоминающих устройств.....	102
5.5. Реализация на ПЗУ комбинационных логических устройств	105
5.6. Программируемые логические матрицы	106
6. Электронные схемы, реализующие логические функции	108
6.1. Классификация логических ИМС	108
6.2. Основные параметры логических ИМС	109
7. Микропроцессорные системы и программируемые логические интегральные схемы.....	114
7.1. Структурная схема микропроцессора.....	114
7.2. Микропроцессорная система	116
7.3. Программируемые логические интегральные схемы.....	118
Библиографический список.....	121

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. Системы и автоматы

В науке и технике сегодняшнего дня широко применяется понятие *система*, относимое к любому физическому или абстрактному явлению, будь то живой организм, ЭВМ, промышленное предприятие, САУ, игра, математический алгоритм и т.д. Система может быть представлена «черным ящиком» (рис. 1.1) и тремя абстрактными множествами переменных, ее характеризующих:

1. Входные переменные (входные воздействия, входные состояния) – $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)\}$. Они воздействуют на исследуемую систему извне и влияют на ее поведение, тогда как поведение системы на входные воздействия влияния не оказывает.

2. Выходные переменные (реакции, отклики, выходные состояния) – $Z(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t)\}$. Это количественные (или качественные) характеристики поведения системы, интересующие исследователя и каким-то образом им фиксируемые.

3. Промежуточные переменные (внутренние состояния) – $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_q(t)\}$. Это и не входные и не выходные переменные. Их можно сосредоточить внутри «ящика» и определить понятием «внутреннее состояние» системы.

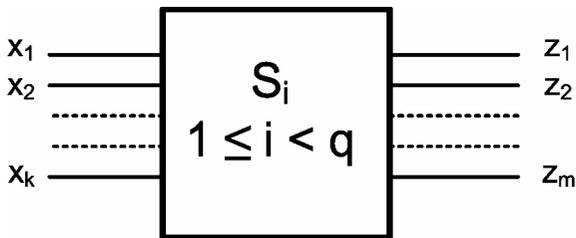


Рис. 1.1. Представление системы в виде «черного ящика»

В общем случае все переменные системы есть функции – непрерывные или дискретные, имеющие количественные и качественные характеристики, представленные в числовом или другом виде.

Для передачи или обработки информации в современной технике часто используют постоянный ток или постоянное напряжение. Эти

физические величины могут служить носителями информации. Информация наносится на переносчик, изменяя его характеристики (в нашем случае – изменяя величину тока или напряжения). В результате этого «нанесения» информации на переносчик получается сигнал, несущий информацию.

По структуре сигналы делятся на непрерывные и дискретные как по аргументу (времени), так и по множеству значений функции (величины напряжения или тока). Сигнал считается непрерывным, если величина тока или напряжения может принимать любые значения (реально – в заданных пределах). Сигнал называют дискретным, если он может принимать только ряд заранее определенных значений (в простейшем случае – два значения).

Изменение значений тока или напряжения может происходить в любые моменты времени (непрерывное время) или только в строго оговоренные моменты времени (дискретное время).

В настоящем пособии будут рассматриваться в основном только дискретные сигналы, принимающие значения (условно) 0 или 1, причем переходы $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$ могут происходить или в произвольные моменты времени (асинхронные системы), или в строго определенные моменты (синхронные системы).

Отметим также, что величина электрических сигналов (например, напряжения), отождествляемая как сигнал «0», может меняться от 0 до 0,8 В, а сигнал «1» – от 2,5 до 5 В (эти цифры указаны для определенной системы электронных элементов и могут меняться в различных системах элементов, обрабатывающих эти сигналы).

Технические устройства, все множество переменных которых представлено в дискретной форме, относятся к классу дискретных систем (например, ЭВМ).

Синхронные и асинхронные системы. Будем считать, что все переменные системы изменяются дискретно в определенные моменты времени, определяющие такты работы автомата. Реально текущее физическое время системы разбивается при этом на отдельные, конечные, не обязательно равные интервалы – такты, которые нумеруются целыми неотрицательными числами 0, 1, 2, ... Таким образом, формируется тактовое время системы t_n . Если время системы тактируется некоторым независимым синхронизирующим источником, посылающим в систему последовательность синхронизирующих (тактовых) сигналов и все переменные системы изменяются только в моменты действия этих сигналов, то система называется синхронной.

Следовательно, все переменные системы можно рассматривать как функции порядкового номера такта:

$$X(n) = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_k(n)\};$$

$$Z(n) = \{z_1(n), z_2(n), \dots, z_m(n)\};$$

$$S(n) = \{s_1(n), s_2(n), \dots, s_q(n)\}.$$

В асинхронных системах, в отличие от синхронных, синхронизация внешним источником не производится. Дискретизация времени здесь есть следствие дискретных изменений переменных систем. Длительность тактов определяется интервалом времени, в течение которого измеряемые переменные системы остаются неизменными.

Алфавит. Каждая переменная системы в каждый момент времени может принимать определенное значение из некоего множества, называемого ее *алфавитом*. Каждый элемент этого множества называется *символом алфавита*. Алфавит реальных систем содержит конечное число символов, т.е. представляет собой конечное множество.

Внутреннее состояние системы. Интуитивно мы осознаем понятие *состояние системы* и знаем, что оно оказывает влияние на ее реакцию на входные воздействия, т.е. на зависимость между входными и выходными переменными системы. С точки зрения анализа и синтеза систем важно только это свойство состояния, а не природа и характер промежуточных переменных, его обуславливающих. Их значения в эксперименте зачастую и не могут быть выявлены и опознаны. Важно также, что на состояние системы распространяются положения о дискретности времени и конечности алфавита. Таким образом, можно утверждать, что все присущие системе состояния могут быть заданы множеством $S_i \in S$.

Между множествами X , Z и S существуют следующие зависимости. Множество выходных переменных в данный момент времени t_n однозначно определяется множеством входных переменных и состоянием в данный момент времени t_n :

$$Z(t_n) = f[X(t_n), S(t_n)] \text{ или } Z(n) = f[X(n), S(n)].$$

Состояние системы в следующий момент времени t_{n+1} однозначно определяется множеством входных переменных и состоянием в настоящий момент времени t_n :

$$S(t_{n+1}) = \varphi[X(t_n), S(t_n)] \text{ или } S(n+1) = \varphi[X(n), S(n)].$$

Конечным автоматом называется синхронная система с конечным входным алфавитом X , конечным выходным алфавитом Z , с конечным множеством состояний S и двумя характеристическими функциями:

$$\text{функцией выходов} \quad Z(n) = f[X(n), S(n)];$$

$$\text{функцией переходов} \quad S(n+1) = \varphi[X(n), S(n)],$$

где $X(n)$, $Z(n)$, $S(n)$ – входной символ, выходной символ и состояние автомата в момент времени t_n ($n = 1, 2, 3 \dots$) соответственно.

Дополнительно может быть задано начальное состояние автомата S^* . Тогда понятие конечного автомата может быть определено как совокупность

$$M = \langle X, Z, S, f, \varphi, S^* \rangle.$$

Как следует из определения, конечный автомат является системой детерминированной.

Рассмотренная выше модель автомата получила название автомата Мили. Существует другая математическая модель автомата (автомат Мура), где функция выходов записывается так: $Z(n) = f[S(n)]$, выходной сигнал автомата определяется как функция только состояния системы. Соответствующими преобразованиями доказывается тождественность этих двух математических моделей. В практическом анализе и синтезе цифровых систем как автомат Мили, так и автомат Мура имеют свои достоинства и недостатки.

Множество выходных переменных исследуемого или проектируемого автомата всегда известно. Множество его состояний зависит от его внутренней структуры. В большинстве практических задач определение множества состояний выполняется по существующим методикам. Однако в общем случае это задача сложная и решение ее неоднозначно.

Для определения выходных переменных конечного автомата в данный момент времени (для предсказания реакции системы на входные воздействия) достаточно знать входное воздействие $X(n)$ и состояние в этот момент времени $S(n)$. Но состояние в этот момент времени зависит от состояния в предшествующий момент $S(n-1)$, которое, в свою очередь, как бы обобщило все, что происходило в системе ранее и определило ее выходную реакцию в момент времени t_{n-1} . Следовательно, выходная реакция на входное воздействие

в данный момент времени сформировалась в результате конечного числа входных воздействий и выходных реакций в прошлом этой системы.

Таким образом, система должна обладать свойством памяти, и при каждом новом входном воздействии память обязана сообщать системе информацию о ее состоянии одновременно с входным воздействием.

В классе дискретных систем есть устройства, для которых функция выхода записывается как $Z(n) = f[X(n)]$. Выходная реакция автомата определяется только входными воздействиями, и понятия состояния для таких систем не существует. Эти автоматы без памяти обычно называют *комбинационными* или *однотактными устройствами* (схемами). Понятие же автомат в основном употребляется применительно к автоматам с памятью; их называют *временными* схемами или *последовательностными*, или *многотактными* схемами.

Структурная схема автомата с памятью (рис. 1.2) представляет собой "черный ящик", внутри которого можно вычленить некий логический блок (ЛБ), функционирующий по принципу комбинационного устройства, и блок памяти (БП), или просто память. К моменту времени n автомат находится в состоянии $S(n)$, которое сформировалось в предшествующем такте $(n-1)$ при выходных переменных $X(n-1)$. Информация об этом состоянии хранится в блоке памяти, на входе которого соответствующие переменные приняли значения $Y(n)$. Выход БП $y(n)$ был выработан в предыдущем такте $(n-1)$, при котором выходные переменные ЛБ были $Z(n-1)$, а вход БП – $Y(n-1)$. В момент времени n логический блок считывает комбинацию переменных $\{X(n), y(n)\}$ и все переменные принимают новые значения $Z(n)$, $Y(n)$, $y(n+1)$ соответственно.

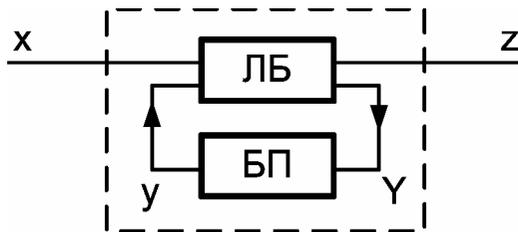


Рис. 1.2. Структурная схема автомата с памятью

Кроме рассмотренных выше автоматов, существуют другие типы автоматов. Рассмотрим некоторые из них.

1. Вероятностные автоматы, в которых функции переходов и выходов (или одна из них) являются случайными:

$$Z(t) = f_{сл}[X(t), S(t)] \text{ и } S(t_{n+1}) = \varphi_{сл}[X(t), S(t)],$$

т.е. выходной сигнал и новое состояние описывается матрицами вероятностей $\|P_{ij}\|$ перехода $S_i \rightarrow S_j$ и $\|Z_{ij}\|$ выхода.

2. Нестационарные автоматы, в которых в качестве аргументов функций выхода и перехода добавляется время:

$$Z(t) = f[X(t), S(t), t] \text{ и } S(t_{n+1}) = \varphi_{сл}[X(t), S(t), t].$$

Но, строго говоря, такой автомат из-за наличия среди аргументов времени перестает быть конечным.

Назначение дискретных автоматов в системах автоматического управления – обработка различного рода данных (сообщений), отбираемых от объектов управления, и представление результатов обработки в виде, удобном для восприятия как человеком, так и исполнительными устройствами системы.

Схемотехническая реализация структурных элементов автомата предопределена как материально-энергетической природой носителя информации, так и желаемой формой ее представления на входе и выходе реального устройства. Сообщение должно быть выражено на языке принятого алфавита, символы которого в свою очередь отождествляются с определенными характеристиками его материально-энергетического носителя – сигнала. Бесспорными достоинствами (среди многих других: механических, акустических, пневматических и т.д.) обладает электрический сигнал, а соответствующая ему элементная база электроники как нельзя лучше согласуется с двоичной формой представления информации с ее цифровыми символами 0 и 1 и математическим аппаратом бинарной алгебры (алгебры логики).

Дискретные технические устройства, реализуемые на элементной базе электроники с цифровой формой представления подлежащих обработке данных, имеют в своем названии термины электронный и цифровой, как, например, два класса устройств, составляющих неотъемлемую часть современных САУ – электронные вычислительные машины (ЭВМ) и электронные цифровые измерительные приборы. Вторые неизмеримо проще первых, так как выполняют одну раз и навсегда заданную им процедуру: преобразуют аналоговый электрический сигнал (например, ЭДС термопары) в последовательность электрических импульсов, считают их количество и представляют резуль-

тат в форме светящихся десятичных цифр. Однако как те, так и другие строятся на однотипных схемных элементах и узлах, способ функционирования которых базируется на математической логике. Таким образом, становится понятным, почему отдельные элементы и узлы цифровых электронных устройств и сами эти устройства называются логическими. Так основным функциональным узлом ЭЦВМ является АЛУ (арифметико-логическое устройство), выполняющее все вычислительные операции, как арифметические, так и логические.

1.2. Коды и кодирование информации

Понятия кода и кодирования являются фундаментальными в вычислительной технике и автоматике. Термины *код* и *кодирование* взаимосвязаны. Поясним эти термины на простом примере.

Пусть имеются два множества: предметов (понятий, действий и т.д.) и условных обозначений, состоящих из каких-то символов или их комбинаций. Можно представить себе процесс установления соответствия между каждым предметом и условным обозначением. Этот процесс и называется кодированием, а условные обозначения – кодом данного предмета (или кодовой комбинацией). Таким образом, можно дать следующее определение кода. *Код* – это набор знаков в совокупности со схемой кодирования для представления информации. Кодом являются отдельные слова языка, числа и другие условные обозначения понятий, явлений, действий и т.п. Кодом являются и китайские иероглифы, и элементы клинописи, и любой другой письменный язык.

С понятием кода связан ряд определений.

Основание кода P – это число различных элементарных символов, из которых образуются кодовые комбинации. В большинстве европейских языков таких символов – букв около 30, при написании числовой информации используются десять элементарных символов – цифр. В вычислительной технике широко используются коды с основанием два (ноль и единица).

Алфавит кода – это перечень всех элементарных символов (букв языка, цифр и т.п.).

Разрядность кода n – это длина (число символов) в кодовой комбинации, имеющей самостоятельное смысловое значение (например, число букв в слове, число цифр в многозначном числе).

По разрядности коды делят на две группы: с одинаковой длиной для всех используемых кодовых комбинаций и с различной. К первой группе относятся, например, коды букв и других символов при передаче информации по телетайпу, к второй – слова русского языка,