

To Vida and Ava

In Memoriam: Jim Williams, 1948–2011

www.book-med.ru

THE ART OF ELECTRONICS

Third Edition

Paul Horowitz HARVARD UNIVERSITY

Winfield Hill ROWLAND INSTITUTE AT HARVARD

П. Хоровиц, У. Хилл

Искусство схемотехники

Часть вторая

Цифровая

3-е издание

Перевод с английского



Москва
Издательство БИНОМ
2025

УДК 681.3—621.375

БК 32.85

X80

Хоровиц П., Хилл У.

X80 **Искусство схемотехники, 3-е издание.** Часть вторая. Оцифровая: Перевод с англ. — М.: Издательство БИНОМ. — 2025. — 384 с., ил.

ISBN 978-5-6050725-6-0

Читатель держит в руках долгожданное, полностью пересмотренное, видоизмененное и обогащенное новыми знаниями третье (и последнее, учитывая возраст авторов) издание невероятно успешного и авторитетного «Искусства схемотехники». Это учебник, справочник и руководство («в одном флаконе») по разработке электронных схем, проданное повсеместно на восьми языках тиражом более миллиона экземпляров. Искусство схемотехники растолковывается авторами как сплав законов, эмпирических правил и далекого от математики интуитивного представления о силах, движущих собранную электрическую схему.

Предназначено всем, равнодушным к электротехнике во всех смыслах ее бытия.

Пол Хоровиц (Paul Horowitz), профессор Гарвардского университета, в далеком 1974 г. принял участие в создании *Laboratory Electronics* и соответствующего учебного курса, что способствовало и появлению первого издания «Искусства схемотехники». Его исследовательский интерес связан с астрофизикой, рентгеноскопией, микроскопией, оптической интерферометрией. Он автор более 200 научных работ, эксперт и консультант промышленных и правительственных структур, разработчик несчетного количества исследовательских методик и обслуживающих их электронных приборов. Причастен к вызывающей полемику программе поиска внеземного разума.

Уинфилд Хилл (Winfield Hill) — воплощенный гуру схемотехники. Прошел сквозь выпускную программу по физической химии Гарварда, обрел диплом инженера-электрика, начал свой карьерный рост в *Harvard's Electronics Design Center*. После 7 лет освоения электроники устроился на работу в *Sea Data Corporation* и 16 лет создавал инструментарий для физической океанографии. В 1988 г. рекрутировался в *Rowland Institute for Science* (впоследствии подразделение Гарварда). В должности руководителя *Electronics Engineering Laboratory* разработал свыше 500 образцов электронного оборудования. Интересуется высоковольтным (до 15 кВ) радиочастотным оборудованием, сильноточной (до 1200 А) импульсной электроникой, маломушящей (до нВ и пА) усилительной техникой, импульсными МОП-генераторами.

Перевод с английского выполнен силами

* Издательства МИР

* Издательства БИНОМ

* Пожелавших остаться неназванными представителей
экспертного сообщества схемотехников (глава 8, фрагменты разных глав)

Оформление обложки М. В. Пясецкой

ISBN 978-0-521-80926-9 (англ.)

ISBN 978-5-6050725-6-0 (русск.)

© Cambridge University Press. The Art of Electronics, Ed. 3, 2015

© Издательство БИНОМ, 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

«Искусство схемотехники» Хоровица и Хилла — книга легендарная. Скорость развития технологий сильно опережает скорость обновления книжного фонда, но фундаментальные основы схемотехники неизменны. В новом издании часть книги значительно переработана с учетом колоссальных успехов индустрии за время, прошедшее с прошлой публикации. Книга подойдет тем, кто только входит в специальность, а также действующим специалистам, углубляющим знания и навыки. Переводчики максимально емко и эффективно передали содержание работы, стараясь сохранить дух и подачу автора.

Существует достаточно большой разрыв сложности между любительским уровнем проектирования схемотехнических решений и профессиональным. Хоровиц и Хилл помогают разрыв преодолеть. Для эффективного изучения материала книги стоит следовать следующим правилам: изучать материал небольшими порциями, сразу закреплять изученный материал практикой в системах проектирования и моделирования в SPICE-системах и других продуктах, а также изготавливать тестовые устройства и приборы с помощью макетных и печатных плат, исследуя уже существующие электрические схемы. При проектировании рекомендую следовать правилу золотого стандарта: при развитии системы менять только один компонент. Такой подход позволит отследить ошибки наиболее эффективным способом. Подобным образом я учу своих студентов. Для облегчения расчетной части важно иметь хорошую подготовку в математике и физике. При разработке и эксплуатации электрических схем необходимо понимать, что вы имеете дело с реальными объектами и помимо схемотехники важно изучать особенности технологии и производства, что впоследствии поможет обнаружить причины неочевидных дефектов и неисправности; таким образом мой научный руководитель нашел причину брака в партии

печатных плат. Как оказалось, партия была неисправна, потому что на одном из этапов производства не была смыта кислота, замыкавшая контакты.

При изучении книги необходимо помнить, что предлагаемая авторами компонентная база является зарубежной; используя знания в области отечественной компонентной базы, необходимо приложить дополнительные усилия по адаптации и учету характеристик, а также стандартов в области разработки и эксплуатации. При заказе компонентов помните, что доставку часто задерживают, переносят, а порой и вовсе отменяют поставщики. Поэтому наберитесь терпения и обязательно резервируйте ваши закупки.

Необходимо быть готовым к тому, что «успешный успех» придет не сразу, но как результат поступательного и непростого пути разработчика. Если ваша разработка уперлась в тупик, необходимо обратиться к преподавателям, коллегам, экспертному сообществу и не бояться задавать глупые вопросы и даже просто обсуждать и искать бытовые аналогии. Одной из наиболее распространенных причин неполадок является отсоединившийся контакт, и поиск неисправностей необходимо начинать именно с отсутствующего или закороченного контакта.

Напоследок невысказанная мысль от Х. и Х. Необходимым качеством инженера-разработчика является чувство юмора. Именно оно способствует принятию наилучших решений, позволяя раз за разом переделывать и улучшать ваше устройство, разряжать атмосферу в коллективе, а при необходимости и заряд статического электричества.

*Ю. Р. Шалтаева, старший преподаватель кафедры
N27 (Микро- и нанoeлектроника) НИЯУ МИФИ*

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЧАСТИ 1 (АНАЛОГОВОЙ)

Глава 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Глава 2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Глава 3. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Глава 4. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Глава 5. ПРЕЦИЗИОННЫЕ СХЕМЫ

Глава 6. ФИЛЬТРЫ

Глава 7. ГЕНЕРАТОРЫ И ТАЙМЕРЫ

Глава 8. МАЛОШУМЯЩАЯ АППАРАТУРА

**Глава 9. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ,
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ**

ПРИЛОЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

10. ЦИФРОВАЯ ЛОГИКА

10.1. Основы цифровой логики	1
10.1.1. Цифровой сигнал против аналогового	1
10.1.2. Логические состояния	2
10.1.3. Числовые коды	3
10.1.4. Вентили и таблицы истинности	6
10.1.5. Вентили на дискретных элементах	9
10.1.6. Пример схемы с вентилем	9
10.1.7. Логические обозначения при заданных уровнях	10
10.2. Цифровые ИС: ТТЛ и КМОП	11
10.2.1. Каталог идентичных вентилях	12
10.2.2. Принципиальные схемы вентилях на ИС	14
10.2.3. Характеристики ТТЛ и КМОП	14
10.2.4. Элементы с тремя состояниями и с открытым коллектором	17
10.2.4. Элементы с тремя состояниями	17
10.3. Комбинационная логика	19
10.3.1. Логические тождества	19
10.3.2. Минимизация и карты Карно	20
10.3.3. Комбинационные функциональные схемы на ИС	17
10.4. Последовательная логика	25
10.4.1. Устройства с памятью: триггеры	25
10.4.2. Тактируемые триггеры	27
10.4.3. Последовательная логика: объединение памяти и вентилях	30
10.4.4. Синхронизатор	33
10.4.5. Моностабильные мультивибраторы	34
10.4.6. Один импульс на триггерах и счетчиках	35
10.5. Последовательные функции, реализуемые на ИС	36
10.5.1. Схемы-защелки и регистры	36
10.5.2. Счетчики	37
10.5.3. Регистры сдвига	39
10.5.4. Программируемые логические устройства	41
10.5.5. Разнообразные последовательные функции	42
10.6. Некоторые типовые цифровые схемы	43
10.6.1. Счетчик по модулю n : схема и синхронизация	43
10.6.2. Мультиплексируемый цифровой индикатор на светодиодах	46
10.6.3. Генератор последовательности из n импульсов	47
10.7. Микромощные цифровые схемы	48
10.7.1. Как сохранить малую мощность КМОП-схем	49
10.8. Патология в логических схемах	50

10.8.1. Проблемы статических режимов	50
10.8.2. Проблемы при переключениях	51
10.8.3. Прирожденные недостатки ТТЛ и КМОП	53
Дополнительные упражнения к главе 10	55
Заключительный обзор главы 10	56
11. ПРОГРАММИРУЕМАЯ ЛОГИКА	63
11.1. Краткая история	59
11.2. Аппаратное обеспечение	60
11.2.1. Самые простые ПЛУ	60
11.2.2. ПЛМ — следующий шаг	61
11.2.3. ППВМ	63
11.2.4. Конфигурационная память	64
11.2.5. Прочие ПЛУ	64
11.2.6. Программное обеспечение	64
11.3. Пример. Генератор псевдослучайной последовательности	65
11.3.1. Как получить псевдослучайные данные	65
11.3.2. Реализация на жесткой логике	66
11.3.3. Реализация на программируемой логике	66
11.3.4. Программируемая логика. Ввод средствами языка описания аппаратуры	68
11.3.5. Реализация на микроконтроллере	72
11.4. Советы	77
11.4.1. Используемые технологии	77
11.4.2. Интересы сообщества пользователей	78
Заключительный обзор главы 11	79
12. СОПРЯЖЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	82
12.1. Сопряжение ТТЛ и КМОП	82
12.1.1. Логические семейства. Краткая хронология	82
12.1.2. Входные и выходные характеристики	86
12.1.3. Сопряжение цифровых семейств	89
12.1.4. Управление цифровыми входами	92
12.1.5. Защита входа	94
12.1.6. Некоторые замечания, касающиеся логических входов	96
12.1.7. Компараторы и ОУ на входе цифровой логики	96
12.2. Шаг в сторону. Цифровые сигналы на осциллографе	98
12.3. Компараторы	99
12.3.1. Выходы	99
12.3.2. Входы	103
12.3.3. Прочие параметры	105
12.4. Управление внешней цифровой нагрузкой логическими входами	106
12.4.1. Нагрузка на положительном источнике питания. Прямое управление	106

12.4.2. Нагрузка на положительном источнике питания. Транзисторные ключи	109	13.3.1. Лабораторный источник питания общего назначения	172
12.4.3. Нагрузка на отрицательном источнике питания и с переменным током	110	13.3.2. Восьмиканальный источник	173
12.4.4. Защита силовых ключей	112	13.3.3. Наноамперный источник тока с широким рабочим диапазоном	174
12.4.5. Сопряжение n -МОП БИС	114	13.3.4. Схема формирования точного тока через катушку магнита	177
12.5. Оптоэлектроника. Излучатели	116	13.4. Пристальный взгляд на линейность ЦАП	178
12.5.1. Индикаторы и светодиоды	117	13.5. Аналогово-цифровые преобразователи	179
12.5.2. Лазерные диоды	122	13.5.1. Оцифровка: наложения, частота выборки и глубина выборки	180
12.5.3. Дисплеи	124	13.5.2. Технологии аналогово-цифрового преобразования	181
12.6. Оптоэлектроника. Детекторы	127	13.6. АЦП-I. Параллельные	182
12.6.1. Фотодиоды и фототранзисторы	127	13.6.1. Модифицированная параллельная схема	182
12.6.2. Фотоумножители	128	13.6.2. Входные схемы для параллельных и радиочастотных АЦП	183
12.7. Оптроны и реле	129	13.6.3. Пример. Параллельный преобразователь с субдискретизацией	186
12.7.1. Фототранзистор на выходе оптрона	130	13.7. АЦП-II. Последовательного приближения	187
12.7.2. Оптроны с логическим выходом	130	13.7.1. Простой АЦП последовательного приближения	189
12.7.3. Драйверы затвора с оптоизоляцией	131	13.7.2. Варианты схемы последовательного приближения	190
12.7.4. Оптроны для аналоговых сигналов	133	13.7.3. Пример АЦП последовательного приближения	190
12.7.5. Твердотельные реле с транзисторным выходом	134	13.8. АЦП-III. Интегрирующие	192
12.7.6. Твердотельные реле с тиристорным/ симисторным выходом	135	13.8.1. Преобразователи напряжение-частота	192
12.7.7. Оптроны со входом переменного тока	136	13.8.2. Однократное интегрирование	193
12.7.8. Прерыватели	137	13.8.3. Интегрирующие преобразователи	193
12.8. Оптоэлектроника. Системы оптоволоконной связи	137	13.8.4. Двойное интегрирование	194
12.8.1. TOSLINK	137	13.8.5. Аналоговые ключи в измерительных устройствах. Краткий обзор	194
12.8.2. Versatile Link	139	13.8.6. Дизайн от Мастера. АЦП многостадийного преобразования компании Agilent	196
12.8.3. ST/SC модули для стеклянного волокна	139	13.9. АЦП-IV. Дельта-сигма	199
12.8.4. Законченные модули волоконных приемопередатчиков	140	13.9.1. Простой сигма-дельта-преобразователь системы подсчета солнечного загара	199
12.9. Цифровые сигналы и длинные линии	140	13.9.2. Дельта-сигма преобразование без мистики	201
12.9.1. Внутриплатаые соединения	140	13.9.3. $\Sigma\Delta$ АЦП и ЦАП	201
12.9.2. Межплатаые соединения	142	13.9.4. Процесс $\Sigma\Delta$ -преобразования как таковой	201
12.10. Кабельные связи	142	13.9.5. Взгляд со стороны. Распределение шума	204
12.10.1. Коаксиальные кабели	143	13.9.6. Итоги	205
12.10.2. Правильный путь. I. Согласование на приемной стороне	144	13.9.7. Моделирование	206
12.10.3. Витые пары	148	13.9.8. А что насчет ЦАП?	207
12.10.4. Стандарт RS-232	154	13.9.9. Плюсы и минусы $\Delta\Sigma$ -конверторов	208
12.10.5. Эпилог	156	13.9.10. Музыка паузы	208
Заключительный обзор главы 12	157	13.9.11. Примеры дельта-сигма схем	209
13. ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ ВСТРЕЧАЕТ АНАЛОГОВЫЙ	161	13.10. Компромиссы при выборе АЦП	214
13.1. Предварительные сведения	161	13.10.1. $\Delta\Sigma$ и конкурирующие параметры	214
13.1.1. Основные характеристики	161	13.10.2. Выборки против усреднения: шум в АЦП	216
13.1.2. Коды	162	13.10.3. АЦП с микропотреблением	216
13.1.3. Ошибки преобразователей	162	13.11. Необычные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи	217
13.1.4. ЦАП: интегрированные или отдельные микросхемы	163	13.11.1. ADE7753: многофункциональная схема измерения мощности переменного тока	218
13.2. Цифро-аналоговые преобразователи	163	13.11.2. AD7873: интерфейс сенсорного экрана	219
13.2.1. ЦАП на цепочке резисторов	163	13.11.3. AD7927: АЦП с программируемой последовательностью измерения	220
13.2.2. ЦАП на резистивной сетке $R-2R$	164	13.11.4. AD7730: прецизионная измерительная система для мостовых датчиков	220
13.2.3. ЦАП с переключением токов	164	13.12. Примеры измерительных систем	221
13.2.4. Умножающие ЦАП	165	13.12.1. Мультиплексированная 16-канальная система сбора данных	221
13.2.5. Формирование выходного напряжения	166		
13.2.6. Шесть ЦАП для примера	167		
13.2.7. ЦАП на дельта-сигма преобразовании	168		
13.2.8. ШИМ в качестве цифро-аналогового преобразователя	169		
13.2.9. Преобразователи частоты в напряжение	171		
13.2.10. Умножитель частоты	171		
13.2.11. Выбор ЦАП	171		
13.3. Некоторые примеры использования	171		

13.12.2. Многоканальная система сбора данных на параллельно включенных АЦП последовательного приближения	224	14.3.12. PC104 в качестве одноплатной встроенной системы	281
13.12.3. Многоканальная система сбора данных на параллельно включенных $\Delta\Sigma$ -АЦП	226	14.4. Типы памяти	281
13.13. Фазовая автоподстройка частоты	229	14.4.1. Постоянная и оперативная память	281
13.13.1. Мультиплексированная 16-канальная система сбора данных	229	14.4.2. Статическая <i>versus</i> динамическая память	282
13.13.2. Компоненты схемы фазовой автоподстройки	230	14.4.3. Статическая память	282
13.13.3. Конструкции ФАЧ	233	14.4.4. Динамическая память	285
13.13.4. Многоканальная система сбора данных на параллельно включенных $\Delta\Sigma$ -АЦП	233	14.4.5. Постоянная память	287
13.13.5. Захват и синхронизация в ФАЧ	235	14.4.6. Итоговый обзор	291
13.13.6. Применение схем с ФАЧ	236	14.5. Прочие шины и линии связи. Обзор	292
13.13.7. Напоследок: борьба с флуктуацией и шумом в схемах с ФАЧ	246	14.6. Параллельные шины и линии связи. Обзор	293
13.14. Псевдослучайные битовые последовательности и генерация шума	246	14.6.1. Пример. Внутриплатная параллельная линия связи	293
13.14.1. Цифровая генерация шума	246	14.6.2. Два примера. Внутриплатная быстрая параллельная шина	295
13.14.2. Битовые последовательности на сдвиговых регистрах с обратными связями	247	14.6.3. Прочие параллельные шины	295
13.14.3. Генерация аналогового шума с помощью последовательностей максимальной длины	248	14.6.4. Параллельные шины для связи с периферией	296
13.14.4. Спектр мощности последовательностей на сдвиговых регистрах	248	14.7. Последовательные шины и линии связи	297
13.14.5. Фильтрация на низких частотах	250	14.7.1. SPI	297
13.14.6. Напутствие напоследок	252	14.7.2. I ² C. Двухпроводной интерфейс (TWI)	298
13.14.7. Генератор «настоящего» случайного шума	253	14.7.3. Протокол «1-wire» фирмы Dallas-Maxim	300
13.14.8. «Гибридный цифровой фильтр»	254	14.7.4. JTAG	300
Дополнительные упражнения к главе 13	255	14.7.5. Отказ от линии синхронизации: восстановление тактового сигнала	301
Заключительный обзор главы 13	255	14.7.6. SATA, eSATA и SAS	301
14. КОМПЬЮТЕРЫ, КОНТРОЛЛЕРЫ, ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ	259	14.7.7. PCI Express	301
14.1. Архитектура компьютера: центральный процессор и шина данных	260	14.7.8. Асинхронная передача (RS-232, RS-485)	302
14.1.1. Центральное процессорное устройство	260	14.7.9. Кодировка Манчестер	303
14.1.2. Память	261	14.7.10. Двухфазное кодирование	305
14.1.3. Память большой емкости	261	14.7.11. RLL-кодирование. Положительное выравнивание	305
14.1.4. Графика, сеть, параллельные и последовательные порты	261	14.7.12. RLL-кодирование: 8b/10b и прочее	305
14.1.5. Ввод-вывод в реальном времени	262	14.7.13. USB	306
14.1.6. Шины данных	262	14.7.14. FireWire	306
14.2. Система команд процессора	262	14.7.15. Controller Area Network (CAN)	307
14.2.1. Язык ассемблера и машинные коды	262	14.7.16. Ethernet	309
14.2.2. Упрощенный набор команд x86	263	14.8. Форматы чисел	310
14.2.3. Пример программирования	265	14.8.1. Целые числа	310
14.3. Сигналы на шинах. Обмен данными	266	14.8.2. Формат с плавающей запятой	310
14.3.1. Основные сигналы шины: адреса, данные, строб	266	Заключительный обзор главы 14	312
14.3.2. Программируемый ввод-вывод: вывод данных	267	15. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ	316
14.3.3. Программирование векторного дисплея	269	15.1. Введение	316
14.3.4. Программируемый ввод-вывод: чтение данных	269	15.2. Пример. Монитор загара	317
14.3.5. Программируемый ввод-вывод: регистры состояния	270	15.2.1. Реализация на микроконтроллере	317
14.3.6. Программируемый ввод-вывод: регистры команд	272	15.2.2. Код для микроконтроллера	318
14.3.7. Прерывания	272	15.3. Популярные семейства микроконтроллеров	322
14.3.8. Обработка прерываний	273	15.3.1. Внутренняя периферия на кристалле	324
14.3.9. Прерывания. Общий подход	275	15.4. Пример. Управление сетевым питанием	325
14.3.10. Прямой доступ к памяти, ПДП	278	15.4.1. Реализация на микроконтроллере	325
14.3.11. Общий обзор сигналов 8-разрядной шины PC104/ISA	279	15.4.2. Код для микроконтроллера	327
		15.5. Пример. Синтезатор частоты	328
		15.5.1. Код для микроконтроллера	329
		15.6. Пример. Управляемый термостат	331
		15.6.1. Аппаратная часть	331
		15.6.2. Контур управления	336
		15.6.3. Код для микроконтроллера	336
		15.7. Пример. Стабилизированная механическая платформа	337
		15.8. Внешняя периферия для микроконтроллеров	339
		15.8.1. Периферийные устройства с прямым подключением	340
		15.8.2. Периферия с шиной SPI	342
		15.8.3. Периферия с шиной I ² C	344

15.8.4. Некоторые важные аппаратные ограничения	346	Е.2. Трехвыводные устройства	356
15.9. Средства разработки	347	Е.3. Нелинейные устройства	357
15.9.1. Software	347	3. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ, СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСОВ	359
15.9.2. Программные ограничения в системах реального времени	348	3.1. Некоторые свойства линии передачи	359
15.9.3. Hardware	349	3.2. Согласование импедансов	364
15.9.4. Проект Arduino	351	3.3. Линии задержки с сосредоточенными элементами формирования импульсов	367
15.10. Напоследок	352	3.4. Эпилог. «Лестничный» метод вывода волнового импеданса	368
15.10.1. Стоимость инструментария	352	Л. ЛАБОРАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ	372
15.10.2. Когда используются микроконтроллеры	353	О. ЛИТЕРАТУРА	374
15.10.3. Выбор микроконтроллера	353		
15.10.4. Последний выстрел	354		
Заключительный обзор главы 15	354		
ПРИЛОЖЕНИЯ			
Е. НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	356		
Е.1. Пример	356		