

Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд

**Искусство схемотехники. Том
1**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
Х80

Х80 **Хоровиц Пауль**
Искусство схемотехники. Том 1 / Хоровиц Пауль, Хилл Уинфилд – М.: Книга по Требованию, 2024. – 600 с.

ISBN 978-5-458-28717-3

Эта книга представляет собой учебник по разработке электронных схем и одновременно справочное пособие для инженеров; уровень изложения в ней постепенно повышается от простейшего, рассчитанного на новичков, к сложному, требующему глубоких знаний в электронике. Мы строго подошли к выбору круга рассматриваемых проблем и постарались просто и доходчиво изложить основные вопросы, с которыми сталкивается разработчик, стараясь совместить прагматический подход физика-практика и точку зрения инженера, стремящегося к точности и обоснованности в разработке электронной схемы.

ISBN 978-5-458-28717-3

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Любая область человеческих знаний, основанная на синтезе, на изобретении, неразрывно связана с понятием искусства. Именно этим определяется появление и большой успех таких книг, как «Искусство программирования» Кнута, «Как решать математическую задачу?» Пойя, «Имитационное моделирование: искусство и наука» Шеннона. Книга Хоровица и Хилла достойно продолжает эту традицию в области электроники. Ее характеризуют очень широкий и вместе с тем отнюдь не поверхностный охват проблемы, умение сосредоточить внимание читателя на важных тонкостях, дать ясное представление о методах и принципах синтеза самых разнообразных элементов и узлов аппаратуры. В книге рассмотрены наиболее современные области электроники: мини- и микро-ЭВМ, ИМС преобразователей информации, линейные ИМС высокого уровня интеграции. Ее достоинство заключается не только в освещении наиболее ценных технических решений, но и в анализе типовых ошибок разработчиков аппаратуры, в пристальном внимании к часто опускаемым важным проблемам влияния конструктивных решений на эффективность схем и к трудностям, возникающим на самых разных этапах разработки.

Энциклопедический характер материала, рассмотрение многих аспектов проектирования, обычно отсутствующих в других изданиях, доступность и ясность изложения делают книгу «Искусство схемотехники» ценным пособием для разработчиков, потребителей аппаратуры, эксплуатационников, учащихся и преподавателей.

При чтении книги неизбежно возникают вопросы о практическом применении приводимых в ней схемных решений и, следовательно, о замене используемых в них комплектующих изделий на отечественные. Рекомендуем читателю обратиться к соответствующей справочной литературе [1—4] (см. прилагаемый ниже перечень изданий на русском языке), причем решение указанной задачи само по себе может явиться очень полезным упражнением по проектированию электронных схем. Для более подробного изучения вопросов, затронутых в книге, можно рекомендовать следующую литературу: гл. 2 и 6 — [5], гл. 3 и 7 — [6—8], гл. 4 — [9] и другие многочисленные пособия, гл. 5 — [6], гл. 8 — [11], гл. 9 — [10], гл. 10, 11 — [12], гл. 13 — [6], гл. 14 — [9].

Перевод книги выполнили: И. И. Короткевич (гл. 12, 13, разд. 14.01—14.05), М. Б. Левин (гл. 4—7 и курс лабораторных работ),

В. Г. Микуцкий (гл. 8—10), Л. М. Наймарк (гл. 11 и курс лабораторных работ), О. А. Соболева (гл. 1—3, разд. 14.06—14.19 и приложения).

М. Гальперин

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов А. В., Гордеева В. И. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги.— М.: Энергия, 1978.— 208 с.
2. Справочник по интегральным микросхемам / Под ред. Б. В. Тарабрина.— 2-е изд.— М.: Энергия, 1980.— 816 с. (В 1983 г. в изд-ве «Радио и связь» выходит 3-е издание).
3. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник / Под ред. Б. Л. Перельмана.— М.: Радио и связь, 1981.— 656 с.
4. Аналоговые и цифровые интегральные схемы / Под ред. С. В. Якубовского.— М.: Сов. радио, 1979.— 336 с.
5. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.— 3-е изд. (1973) и последующие.— М.: Энергия.— 608 с.
6. Современные линейные интегральные микросхемы и их применение.— М.: Энергия, 1980.— 272 с.
7. Рутковский Дж. Интегральные операционные усилители.— М.: Мир, 1978.— 328 с.
8. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах.— М.: Мир, 1979.— 318 с.
9. Гарет П. Аналоговые устройства для микропроцессоров и мини-ЭВМ.— М.: Мир, 1981.— 272 с.
10. Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П. Аналого-цифровые преобразователи.— М.: Советское радио, 1980.— 280 с.
11. Мейзда Ф. Интегральные схемы. Технология и применение.— М.: Мир, 1981.— 280 с.
12. Соучек Б. Микропроцессоры и микро-ЭВМ.— М.: Сов. радио, 1980.— 520 с.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга представляет собой учебник по разработке электронных схем и одновременно справочное пособие для инженеров; уровень изложения в ней постепенно повышается от простейшего, рассчитанного на новичков, к сложному, требующему глубоких знаний в электронике. Мы строго подошли к выбору круга рассматриваемых проблем и постарались просто и доходчиво изложить основные вопросы, с которыми сталкивается разработчик, стараясь совместить прагматический подход физика-практика и точку зрения инженера, стремящегося к точности и обоснованности в разработке электронной схемы.

Основой для этой книги послужили конспекты курса электроники, которые читаются в Гарварде в течение одного семестра. Аудитория у этого курса довольно неоднородна — это специалисты, закончившие университет и повышающие квалификацию в соответствии со спецификой своей работы в промышленности, студенты-выпускники, стремящиеся к научной работе, и соискатели ученой степени, которые неожиданно обнаружили свою неосведомленность в электронике.

Как показала практика, существующие учебники не подходят для такого курса. Очень хорошие книги написаны по отдельным разделам электроники, но все они предназначены для четырехгодичных курсов обучения или для инженеров, имеющих опыт практической работы; те учебники, в которых сделана попытка рассмотреть предмет электроники в целом, либо перегружены подробностями (и склоняются по стилю к уровню пособий), либо излагают материал очень поверхностно (и больше напоминают советы домохозяйке, чем рекомендации инженерам), либо собраны из неравномерно проработанных частей. Большая часть материала, излагаемого в учебниках по основам электроники, на практике никогда не применяется и чаще всего для того, чтобы найти какую-нибудь нужную схему или посмотреть, как проводить анализ ее работы, инженеру приходится отыскивать фирменные руководства по применению схем, просматривать технические журналы, доставать дефицитные справочники. Коротче говоря, авторы

учебников, как правило, излагают теорию и никак не учат искусству схемотехники или проектирования электронных схем.

Мы поставили перед собой задачу написать такую книгу по электронике, которая была бы полезна и инженеру-разработчику, и физику-практику, и преподавателю электроники. Мы придерживаемся мнения, и это находит свое отражение в книге, что электроника — это искусство, которое основано на нескольких основных законах и включает в себя большое количество практических правил и приемов. По этой причине мы сочли возможным полностью опустить проблемы физики твердого тела, модель транзистора с использованием \hbar -параметров, сложную для понимания теорию цепей и свели к минимуму рассмотрение нагрузочных характеристик и использование комплексной s -плоскости. Математических выкладок вы встретите очень мало, зато приводятся разнообразные примеры схем и всячески пропагандируется быстрая прикидочная оценка параметров и характеристик (которую желательнее уметь производить «в уме»).

Помимо тех проблем, которые обычно рассматривают в учебниках по электронике, наша книга включает следующие вопросы: рассмотрение удобной для использования модели транзистора; построение таких практически полезных схем, как источники тока и токовые зеркала; разработки на базе операционного усилителя с одним источником питания; ряд практических вопросов, по которым часто трудно найти информацию (методы частотной коррекции операционных усилителей, схемы с низким уровнем шумов, схемы ФАПЧ и прецизионные линейные цепи); упрощенный метод разработки активных фильтров с использованием таблиц и графиков; проблемы шумов, экранирования и заземления; оригинальный графический метод анализа усилителя с низким уровнем шумов; источники эталонного напряжения и стабилизаторы напряжения, включая источники питания постоянного тока; мультивибраторы и их разновидности; недостатки цифровых логических схем и пути их устранения; сопряжение с логическими схемами, включая новые типы больших интегральных схем на μ МОП- и ν МОП-структурах; методы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования; генерация шумов в цифровых схемах; микропроцессоры и практические примеры их использования; конструирование, печатный монтаж, печатные платы, примеры готовых конструкций; упрощенные способы оценки быстродействия переключаемых схем; измерение и обработка данных; описывается, что можно измерить и с какой точностью, как обработать данные; методы

сужения полосы пропускания (усреднение сигналов, уплотнение каналов, использование усилителей с защелкой и весовых импульсов); представлена обширная коллекция негодных схем и удачных схем.

Некоторые полезные вопросы вынесены в приложения, из которых вы можете узнать, как чертить принципиальные схемы, какие существуют типы интегральных схем, как проектировать LC-фильтры. В них приведены сопротивления некоторых типов резисторов, рассмотрены осциллографы, сюда же включены некоторые полезные математические выкладки. В книге приведены таблицы с характеристиками распространенных типов диодов, транзисторов, полевых транзисторов, операционных усилителей, компараторов, стабилизаторов, источников эталонных напряжений, микропроцессоров и других устройств.

Мы стремились к конкретности в изложении всех вопросов и поэтому очень часто при рассмотрении той или иной схемы сравнивали между собой характеристики элементов, которые можно использовать в схеме, обсуждали достоинства других вариантов построения схем. В приводимых примерах схем использованы настоящие элементы, а не «черные ящики». Главная задача состояла в том, чтобы с помощью нашей книги читатель понял, как разрабатывается электронная схема, как выбирается ее конфигурация, типы элементов и их параметры. Отказ от математических выкладок вовсе не означает, что мы хотим научить читателя строить схемы «на глазок», не очень-то заботясь об их характеристиках и надежности. Наоборот, излагаемый подход к разработке электронных схем максимально приближен к реальной жизни, он показывает, как принимаются решения при создании схем в инженерной практике.

Эту книгу можно использовать в качестве учебника для годичного курса по проектированию электронных схем, читаемого в колледжах. Требования к предварительному изучению математики невелики, однако читатель должен иметь представление о тригонометрических и экспоненциальных функциях и дифференциальном исчислении. (В приложение вынесен небольшой обзор по теории функций комплексного переменного и ее основным для электроники результатам.) Если опустить некоторые разделы, то книгу можно использовать для курса, рассчитанного на один семестр (как в Гарварде). Те разделы, которые можно опустить при изучении материала, даны мелким шрифтом, это должно облегчить чтение книги ускоренным методом. Кроме того,

если книга должна быть изучена в течение одного семестра, можно пропустить первую половину гл. 4, а также гл. 7, 12—14; это отмечено во вводных параграфах к перечисленным главам.

Нам бы хотелось поблагодарить наших коллег за ценные замечания и помощь, которую они оказали при подготовке рукописи, особенно М. Аронсона, Г. Берга, Д. Крауза, К. Девиса, Д. Грайсинджера, Дж. Хагена, Т. Хейеса, П. Хоровица, Б. Клайна, К. Папалиолиса, Дж. Сейджа и Б. Ваттерлинга. Мы выражаем признательность Э. Хайзберу, Дж. Мобли, Р. Джонсон и К. Вернеру из отдела прессы Кембриджского университета за работу, которую они выполнили с большим вкусом, на высоком профессиональном уровне.

*Пауль Хоровиц
Уинфилд Хилл*

Май 1980 г.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Электроника имеет короткую, но богатую событиями историю. Первый ее период связан с простейшими передатчиками ключевого действия и способными воспринимать их сигналы приемниками, которые появились в начале нашего века. Затем наступила эпоха вакуумных ламп, которая ознаменовала собой возможность претворения в жизнь самых смелых идей. Сейчас мы являемся свидетелями нового этапа развития электроники, связанного с появлением элементов на твердом теле и характеризующегося неиссякаемым потоком новых ошеломляющих достижений. Технология изготовления больших интегральных схем (БИС) дает возможность производить такие кристаллы кремния, на основе которых создают калькуляторы, вычислительные машины и даже «говорящие машины» со словарным запасом в несколько сотен слов. Развитие технологии сверхбольших интегральных схем открывает возможность создания еще более замечательных устройств.

Наверное, стоит сказать и о том, что в истории развития электроники наблюдается тенденция уменьшения стоимости устройств при увеличении объема их производства. Стоимость электронной микросхемы, например, постоянно уменьшается по отношению к единице ее первоначальной стоимости по мере совершенствования процесса производства (см. рис. 11.18). На самом деле зачастую панель управления и корпус прибора стоят дороже, чем его электронная часть.

Если вас заинтересовали успехи электроники и если у вас есть желание самостоятельно конструировать всевозможные хитроумные вещи, которые были бы надежны, недороги, просты и красивы, то эта книга — для вас. В ней мы попытались раскрыть предмет электроники, показать, как он интересен и в чем состоят его секреты.

Первую главу мы посвящаем изучению законов, практических правил и хитростей, составляющих в нашем понимании основу искусства электроники. Начинать всегда следует с самого начала, поэтому мы выясним, что такое напряжение, ток, мощность и из каких компонентов состоит электронная схема. На первых порах, пока вы не научитесь видеть, слышать, осязать и ощущать электричество, вам придется столкнуться с определенными абстрактными понятиями (их особенно много в гл. 1), а также увязать свои представления о них с показаниями таких визуальных приборов, как осциллографы и вольтметры. Первая глава содержит в себе много математики, больше, чем другие главы, несмотря на то что мы старались свести математические выклад-

ки к минимуму и хотели бы способствовать развитию интуитивного понимания построения и работы электронных схем.

Раз уж мы занялись основами электроники, нам следует прежде всего начать с так называемых активных схем (усилителей, генераторов, логических схем и т. п.), благодаря которым электроника и вызывает к себе такой интерес. Читатель, у которого уже есть некоторые знания по электротехнике, может эту главу пропустить. Она предназначена для тех, кто прежде электротехникой никогда не занимался. Итак, приступим к делу.

НАПРЯЖЕНИЕ, ТОК И СОПРОТИВЛЕНИЕ

1.01. Напряжение и ток

Напряжение и ток — это количественные понятия, о которых следует помнить всегда, когда дело касается электронной схемы. Обычно они изменяются во времени, в противном случае работа схемы не представляет интереса.

Напряжение (условное обозначение: U , иногда E). Напряжение между двумя точками — это энергия (или работа), которая затрачивается на перемещение единичного положительного заряда из точки с низким потенциалом в точку с высоким потенциалом (т. е. первая точка имеет более отрицательный потенциал по сравнению со второй). Иначе говоря, это энергия, которая высвобождается, когда единичный заряд «сползает» от высокого потенциала к низкому. Напряжение называют также *разностью потенциалов или электродвижущей силой* (э. д. с.). Единицей измерения напряжения служит вольт. Обычно напряжение измеряют в вольтах (В), киловольтах ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$), милливольтмах ($1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$) или микровольтах ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$) (см. раздел «Приставки для образования кратных и дольных единиц измерения», мелким шрифтом). Для того чтобы переместить заряд величиной 1 кулон между точками, имеющими разность потенциалов величиной 1 вольт, необходимо совершить работу в 1 джоуль. (Кулон служит единицей измерения электрического заряда и равен заряду приблизительно $6 \cdot 10^{18}$ электронов.) Напряжение, измеряемое в нановольтах ($1 \text{ нВ} = 10^{-9} \text{ В}$) или в мегавольтах ($1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}$) встречается редко; вы убедитесь в этом, прочитав всю книгу.

Ток (условное обозначение: I). Ток — это скорость перемещения электрического заряда в точке. Единицей измерения тока служит ампер. Обычно ток измеряют в амперах (А), миллиамперах ($1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$), микроамперах ($1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$), наноамперах ($1 \text{ нА} = 10^{-9} \text{ А}$) и иногда в пикоамперах ($1 \text{ пкА} = 10^{-12} \text{ А}$). Ток величиной 1 ампер создается перемещением заряда величиной 1 кулон за время, равное 1 с. Условились считать, что ток в цепи протекает от точки с более положительным потенциалом к точке с более отрицательным потенциалом, хотя электрон перемещается в противоположном направлении.

Запомните: напряжение всегда измеряется *между* двумя точками схемы, ток всегда протекает *через* точку в схеме или через какой-либо элемент схемы.

Говорить «напряжение в резисторе» нельзя — это неграмотно. Однако часто говорят о напряжении в какой-либо точке схемы. При этом всегда подразумевают напряжение между этой точкой и «землей», то есть такой точкой схемы, потенциал которой всем известен. Скоро вы привыкнете к такому способу измерения напряжения.

Напряжение создается путем воздействия на электрические заряды в таких устройствах, как батареи (электрохимические реакции), генераторы (взаимодействие магнитных сил), солнечные батареи (фотогальванический эффект энергии фотонов) и т. п. Ток мы *получаем*, прикладывая напряжение между точками схемы.

Здесь, пожалуй, может возникнуть вопрос: а что же такое напряжение и ток на самом деле, как они выглядят? Для того чтобы ответить на этот вопрос, лучше всего воспользоваться таким электронным прибором, как осциллограф. С его помощью можно наблюдать напряжение (а иногда и ток) как функцию, изменяющуюся во времени. Мы будем прибегать к показаниям осциллографов, а также вольтметров для характеристики сигналов. Для начала советуем посмотреть приложение А, в котором идет речь об осциллографе, и раздел «Универсальные измерительные приборы», мелким шрифтом.

В реальных схемах мы соединяем элементы между собой с помощью проводов, металлических проводников, каждый из которых в каждой своей точке обладает одним и тем же напряжением (по отношению, скажем, к земле). В области высоких частот или низких полных сопротивлений это утверждение не совсем справедливо, и в свое время мы обсудим этот вопрос. Сейчас же примем это допущение на веру. Мы упомянули об этом для того, чтобы вы поняли, что реальная схема не обязательно должна выглядеть как ее схематическое изображение, так как провода можно соединять по-разному.

Запомните несколько простых правил, касающихся тока и напряжения:

1. Сумма токов, втекающих в точку, равна сумме токов, вытекающих из нее (сохранение заряда). Иногда это правило называют законом Кирхгофа для токов. Инженеры любят называть такую точку схемы

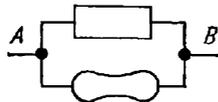


Рис. 1.1.

узлом. Из этого правила вытекает следствие: в последовательной цепи (представляющей собой группу элементов, имеющих по два конца и соединенных этими концами один с другим) ток во всех точках одинаков.

2. При параллельном соединении элементов (рис. 1.1) напряжение на каждом из элементов одинаково. Иначе говоря, сумма падений на

пряжения между точками A и B , измеренная по любой ветви схемы, соединяющей эти точки, одинакова и равна напряжению между точками A и B . Иногда это правило формулируется так: сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре схемы равна нулю. Это закон Кирхгофа для напряжений.

3. Мощность (работа, совершенная за единицу времени), потребляемая схемой, определяется следующим образом:

$$P=UI.$$

Вспомним, как мы определили напряжение и ток, и получим, что мощность равна: (работа/заряд)·(заряд/ед. времени). Если напряжение U измерено в вольтах, а ток I — в амперах, то мощность P будет выражена в ваттах. Мощность величиной 1 ватт — это работа в 1 джоуль, совершенная за 1 с ($1 \text{ Вт}=1 \text{ Дж/с}$).

Мощность рассеивается в виде тепла (как правило) или иногда затрачивается на механическую работу (моторы), переходит в энергию излучения (лампы, жердатчики) или накапливается (батареи, конденсаторы). При разработке сложной системы одним из основных является вопрос определения ее тепловой нагрузки (возьмем, например, вычислительную машину, в которой побочным продуктом нескольких страниц результатов решения задачи становятся многие киловатты электрической энергии, рассеиваемой в пространстве в виде тепла).

В дальнейшем при изучении периодически изменяющихся токов и напряжений мы обобщим простое выражение $P=UI$. В таком виде оно справедливо для определения мгновенного значения мощности.

Кстати, запомните, что не нужно называть ток силой тока — это неграмотно. Нельзя также называть резистор сопротивлением. О резисторах речь пойдет в следующем разделе.

1.02. Взаимосвязь напряжения и тока: резисторы

Тема эта очень обширна и интересна. В ней заключена суть электроники. Если попытаться изложить ее в двух словах, то она посвящена тому, как можно сделать элемент, имеющий ту или иную характеристику, выражающую определенной зависимостью между током и напряжением, и как его использовать в схеме. Примерами таких элементов служат резисторы (ток прямо пропорционален напряжению), конденсаторы (ток пропорционален скорости изменения напряжения), диоды (ток протекает только в одном направлении), термисторы (сопротивление зависит от температуры), тензорезисторы (сопротивление



Рис. 1.2.

зависит от деформации) и т. д. Постепенно мы познакомимся с некоторыми экзотическими представителями этой плеяды; а сейчас рассмотрим самый нехитрый и наиболее распространенный элемент — резистор (рис. 1.2).