

Гаврилов С. А.

# СХЕМОТЕХНИКА МАСТЕР-КЛАСС



---

Наука и Техника, Санкт-Петербург  
2016

Гаврилов С. А.

**СХЕМОТЕХНИКА. Мастер-класс.** — СПб.: Наука и Техника, 2016. — 384 с.: ил.

**ISBN 978-5-94387-869-5**

Книга написана автором-практиком. Она посвящена искусству схемотехники, представляя собой путеводитель по миру создания электронных схем на различной элементной базе. Глубина рассмотрения сочетается с предельной доступностью, использованием наиболее простых и «прозрачных» методов синтеза схем и их анализа. Выдержан принцип пошагового рассмотрения — от простого к сложному, что удобно для радиолюбителей и начинающих разработчиков. При этом изложение ведется на достаточно серьезном уровне.

Сначала излагаются базовые сведения. Вопросы количественного анализа схем, а также дополнительные, необязательные материалы вынесены в отдельные разделы. Те, для кого эти разделы поначалу трудны или неинтересны, могут их пропустить.

Разработчикам-профи книга призвана помочь в решении неизменно волнующих проблем: повторяемость при серийном производстве, взаимозаменяемость элементов, технологичность, надежность.

В ходе диалога Радиолюбителя с автором читатель перейдет от слепого копирования схем к созданию собственных конструкций на различной элементной базе. Содержится интересный разбор частых заблуждений и ошибок, раскрывается много секретов из практики разработчика электронных схем.

Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей, а также студентов радиотехнических специальностей, начинающих и профессиональных разработчиков.



**ISBN 978-5-94387-869-5**

Автор и издательство не несут ответственности за возможный ущерб, причиненный в ходе использования материалов данной книги.

Контактные телефоны издательства  
(812) 412-70-25, 412-70-26

Официальные сайты: [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru),  
[www.nit-kiev.com](http://www.nit-kiev.com)

© Гаврилов С. А.

© Наука и Техника (оригинал-макет), 2016

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.  
198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать . . . . . Формат 70×100 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная. Объем 24 п. л.

Тираж 1000 экз. Заказ № . . . . .

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	<b>6</b>
<b>Предисловие для профессионалов</b> .....	<b>8</b>
<b>Шаг 1. Транзисторы биполярные и полевые</b> .....	<b>11</b>
1.1. Транзисторы и их модели .....	11
1.2. Стабилизация режима .....	18
1.3. Режимы полевых транзисторов .....	22
1.4. Вопросы из практики .....	24
1.5. Анализ. Что влияет на стабильность .....	26
<b>Шаг 2. Линейные каскады для слабых сигналов</b> .....	<b>33</b>
2.1. Обратная связь в линейных каскадах .....	33
2.2. Анализ эмиттерного повторителя .....	40
2.3. «Обычные» линейные каскады .....	42
2.4. Дифференциальные схемы .....	45
2.5. Вопросы из практики .....	49
2.6. Дополнение для любознательных .....	51
<b>Шаг 3. Линейные каскады на высоких частотах</b> .....	<b>54</b>
3.1. Необычные свойства обычных схем .....	54
3.2. Схемотехника широкополосных каскадов .....	59
3.3. Схемотехника резонансных каскадов .....	64
3.4. Вопросы из практики .....	68
3.5. Дополнение для любознательных .....	70
<b>Шаг 4. Линейные каскады при больших сигналах</b> .....	<b>73</b>
4.1. Уровни напряжений .....	73
4.2. Схемы с внешней нагрузкой .....	78
4.3. Дополнение для любознательных .....	82
4.4. Электронная регулировка уровня .....	85
4.5. Вопросы из практики .....	93
<b>Шаг 5. Полупроводниковые ключи</b> .....	<b>97</b>
5.1. Ключ напряжения .....	97
5.2. Ключ тока .....	105
5.3. Дополнение для любознательных .....	106
5.4. Вопросы из практики .....	111
5.5. Анализ. Точность и быстродействие .....	112
<b>Шаг 6. Нелинейные каскады</b> .....	<b>123</b>
6.1. Амплитудное детектирование .....	123
6.2. Анализ: мнимо-простой диодный детектор .....	127
6.3. Перемножение колебаний .....	133
6.4. Анализ. Амплитудное ограничение .....	141
6.5. LC-генераторы .....	144
6.6. Кварцевая стабилизация частоты .....	148

6.7. Вопросы из практики . . . . .	152
6.8. Дополнение для любознательных . . . . .	153
<b>Шаг 7. Операционные усилители и многотранзисторные схемные структуры. . . . .</b>	<b>158</b>
7.1. Самостабилизирующиеся схемы . . . . .	158
7.2. Стабилизация сигнальных параметров . . . . .	163
7.3. Измерительные схемы. . . . .	168
7.4. Диапазон уровней . . . . .	171
7.5. Вопросы из практики. . . . .	175
7.6. Дополнение для любознательных. . . . .	178
<b>Шаг 8. Анализ многотранзисторных схем с ООС . . . . .</b>	<b>181</b>
8.1. Точность измерительных схем . . . . .	181
8.2. Устойчивость схем с ООС . . . . .	187
8.3. Частотные свойства схем . . . . .	193
8.4. Динамические свойства схем . . . . .	198
8.5. Аналоговая стабилизация напряжения . . . . .	203
8.6. Вопросы из практики. . . . .	212
<b>Шаг 9. Многокаскадные аналоговые схемы. . . . .</b>	<b>215</b>
9.1. Совместимость по информации . . . . .	215
9.2. Неконтролируемые связи в схемах . . . . .	223
9.3. Вопросы из практики. . . . .	233
9.4. Дополнение для любознательных . . . . .	235
<b>Шаг 10. Надежность полупроводниковых схем . . . . .</b>	<b>238</b>
10.1. Надежность электрического режима . . . . .	238
10.2. Тепловая устойчивость аналоговых схем . . . . .	245
10.3. Разбор ошибок . . . . .	247
<b>ШАГ 11. Интересны ли нам радиолампы? . . . . .</b>	<b>254</b>
11.1. Немного истории . . . . .	254
11.2. Музыка из ящика . . . . .	259
11.3. Мои триоды. . . . .	264
<b>ШАГ 12. Приемно-усилительные лампы. . . . .</b>	<b>266</b>
12.1. Ламповый триод и его свойства . . . . .	266
12.2. Сеток становится больше . . . . .	271
12.3. Режимы, и как их устанавливать . . . . .	276
12.4. Мои пентоды. . . . .	283
<b>ШАГ 13. Работаем с малыми сигналами . . . . .</b>	<b>285</b>
13.1. Строим усилительные каскады . . . . .	285
13.2. Выше частота – сложнее проблемы. . . . .	295
13.3. Помехи, и как с ними бороться . . . . .	301
13.4. Мои многоэлектродные лампы . . . . .	306
<b>ШАГ 14. Создаем аудиоусилитель . . . . .</b>	<b>308</b>
14.1. Предварительное аудиоусиление. . . . .	308
14.2. Классика тетродных усилителей мощности . . . . .	318
14.3. Проблемы триодных оконечных каскадов. . . . .	324
14.4. Двухтактное усиление на перекрестке мнений. . . . .	330

14.5. Транзисторный звук в ламповых схемах.....	333
14.6. Мои оконечные лампы .....	337
<b>ШАГ 15. Поговорим о радиоприемниках .....</b>	<b>339</b>
15.1. Избирательные системы.....	339
15.2. Прием нормальный и паразитный.....	346
15.3. Автоматическая регулировка усиления.....	354
15.4. Вспомним о диодах.....	359
15.5. Мои оконечные триоды .....	367
<b>Приложение .....</b>	<b>368</b>
Структура обозначений элементов в схемах.....	368
Однобуквенные коды видов элементов.....	368
Двухбуквенные коды .....	369
Буквенные коды функций элементов .....	371
Перечень условных обозначений элементов в схемах.....	371

## ВВЕДЕНИЕ

Эта книга посвящена схемотехнике. В ней рассказывается о том, что такое электронные схемы, как они действуют, и как их придумывают.

Книга адресована разным категориям читателей: от радиолюбителей до студентов и профессионалов. Любителям она должна помочь перейти от копирования готовых (и часто непонятно, как работающих) схем к разработке собственных конструкций, к тому же не требующих кропотливого «налаживания». Разработчикам-профи — помочь в решении неизменно волнующих проблем: повторяемость при серийном производстве, взаимозаменяемость элементов, технологичность, надежность.

Автор будет удовлетворен, если его труд пригодится студентам радиотехнических специальностей, которые испытывают потребность в пособиях по схемотехнике полупроводников.

По указанной причине книга многослойна, и прежде излагаются базовые сведения. Вопросы количественного анализа схем, а также дополнительные, необязательные материалы вынесены в отдельные «Шаги». Чтобы те, для кого они поначалу трудны или неинтересны, могли их пропустить.

«Шаги» сопровождаются разбором практических вопросов. Сюжеты вопросов ни в коей мере не надуманные: отбирались типичные ошибки (а иногда, наоборот, остроумные решения), взятые из популярных книг, журналов, брошюр, технической документации, наконец, из опыта. Впрочем, и вся книга базируется на разборе характерных ошибок и заблуждений.

Не стоит рассчитывать найти здесь подобие рецептурного справочника с набором «типовых схем». Между прочим, не одно стандартное блюдо бывало безнадежно испорчено из-за опечатки в кулинарной книге... Разработчики-профессионалы никогда не пользуются готовыми методиками расчетов, если не убеждены в адекватности исходной модели. А такое убеждение всегда основывается на глубоком понимании процессов, происходящих в схеме. В этом духе и написана книга.

Неплохо, если читатель имеет определенный опыт практической работы: эта книга поможет по-новому взглянуть на известное.

Кстати, чтобы не было скучно, в повествование вкраплены диалоги с воображаемым радиолюбителем.

Предполагаю, что вам знакомы основы электро- и радиотехники, теории полупроводников.

***Радиолюбитель:** Да, я изучал эти вещи. Конечно, подзабылось кое-что...*

Потому-то я привожу некоторые минимально необходимые сведения из числа тех, что трудно усваиваются, но легко забываются.

**Радиолюбитель:** *Но уж зато закон Ома я знаю твердо!*

И это самое главное.

Вы заметите, что различного рода выкладки кое-где сокращены в тексте до минимума, порой не даны итоговые формулы или результаты. Это значит, что приведенного материала достаточно для их получения.

**Радиолюбитель:** *Что же выходит: читать придется с карандашом в руках?*

Вообще-то крайне желательно.

Автор не считал нужным предварять текст изложением системы обозначений. Всякий легко поймет, что, например,  $U_{БЭ}$  — это напряжение между базой и эмиттером, а под  $I_{БЭ}$  подразумевается ток коллектора транзистора, второго по схеме. Подобные обозначения общеприняты и в целом соответствуют стандартам.

Тот, кто имеет опыт работы с электронными схемами, привыкает отсчитывать напряжения в различных точках от нулевой шины. Это и понятно: вольтметр и осциллограф на его рабочем столе одним полюсом постоянно заземлены. Здесь при анализе схем мы тоже, как правило, будем пользоваться потенциалами относительно «земли», то есть одной из общих шин, условно принятой за нулевую для всех напряжений и (для упрощения) обозначаемой соответствующим знаком. Никакого другого смысла «земляная шина» в себе не заключает, и вообще-то назначается достаточно произвольно. Все, что еще можно добавить по этому поводу (а добавить можно немало), содержит Шаг 9.

Шаги от 11 до 15 посвящены схемотехнике на электронных лампах. Интерес к радиолампам и схемам на них за последние годы вырос, но литературы, детально освещающей тему, не хватает. Автор попытался объединить широту охвата тем, конкретность, практическую направленность, и в то же время — предельную простоту и доступность. Здесь не найти привычной по книгам архаики, изложение ведется под современным углом зрения.

Особо разбираются вопросы, не освещавшиеся в прежней, устаревшей литературе. Акцент делается на новые сведения — «секреты разработчиков», и, как всюду, на типичные ошибки и заблуждения. Не забыты интересы нынешних аудиофилов и конструкторов аудиоаппаратуры на лампах, а также коллекционеров ретро-техники: все они найдут в книге немало полезного.

## ПРЕДИСЛОВИЕ ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ

Вы взялись за разработку полупроводниковых схемных структур. Любое проектирование это выбор оптимального варианта достижения цели (из многих возможных). Между прочим, осознание этого явилось огромным шагом от начальных лет развития радио, когда построение работоспособного устройства казалось уже успехом.

Впрочем, понятие об оптимальном варианте кажется очевидным, куда не взялся за дело. Всегда важные для заказчика **показатели качества** (к примеру, чувствительность, точность, быстродействие, стоимость, надежность, масса, технологичность) — чаще всего противоречат друг другу. Оптимизация означает не только нахождение технических решений, кардинально улучшающих все или большинство показателей, но еще и неизбежный компромисс. Основанием для такого компромисса является если не четкое выдвижение, то, по крайней мере, интуитивное осознание некоторого обобщенного критерия оптимальности, включающего частные показатели качества с определенными «весами» (или **коэффициентами значимости**), с учетом ряда ограничений (скажем, заданное напряжение питания; электронные компоненты, разрешенные к применению в отрасли, и т. д.).

Разработка схемы предполагает, следовательно, умение выдвинуть различные варианты, а также умение произвести отбор, в этом состоит техника дела. Разработчик должен знать основные конфигурации электронных каскадов, принципы **синтеза** таких конфигураций — во-первых. Во-вторых, он должен владеть методами **анализа**, дающими возможность рассчитать электрические параметры схемных структур за разумное время. Во всем этом, возможно, и поможет читателю книга.

Речь в ней пойдет о методах, позволяющих, избегая применения многоэтажных формул и головолomных графических построений, произвести легкий анализ полупроводниковых схем с обоснованной точностью. Такой анализ должен быть в максимальной степени «прозрачным»: требуется не только убедиться, что конкретная конфигурация выполняет заданные функции, но также и увидеть, какие имеются запасы, какие параметры схемы наиболее критичны.

Кстати, о точности. Нелепо всерьез учитывать при расчете факторы, дающие, скажем, 1-процентную поправку к вычислениям, в то время как даже пассивные элементы схемы будут иметь разброс действительных значений величин до 20% относительно номиналов. Еще хуже, если разработчик выписывает полученный результат с четырьмя-пятью значащими цифрами: этим он вводит в заблуждение других.



Расчет вообще не исчерпывается получением некоторых численных результатов: необходима еще и их **интерпретация**. Достаточно напомнить, что расчеты могут предназначаться:

- ♦ во-первых, для оценки порядка величин. Это — грубые расчеты, итогам которых нельзя доверять ни в одной значащей цифре, и, тем не менее, без них не обойтись: они нужны при ориентировочной прикидке пригодности предлагаемых решений;
- ♦ во-вторых, для получения более или менее достоверных значений искомых электрических величин. Такой расчет обязательно должен сопровождаться оценкой точности получаемого результата (на худой конец — прикидочной, «на глаз»). И уж, во всяком случае, необходимо помнить, что его точность не может быть выше точности исходных данных;
- ♦ в-третьих, для нахождения гарантированных верхних или нижних границ величин. Расчеты такого рода очень распространены. Ведь относительно многих исходных данных (скажем, параметров полупроводниковых элементов) мы имеем информацию лишь об их предельных значениях. Да и технические требования на проектируемую аппаратуру тоже бывают заданы по типу «не более ...» или «не менее ...».

Любые формулы, описывающие устройства, процессы и т. д. — относятся к принятой **математической модели**, в большей или меньшей степени отражающей реальные взаимосвязи. В частности, на таких моделях базируются и системы проектирования в виде популярных компьютерных программ. Разработчик не должен опасаться использования грубых, но простых моделей там, где это кажется допустимым. С другой стороны, следует помнить о приближенном характере даже весьма точной модели, всегда оценивая границы применимости предлагаемых формул и методов.

На пути использования моделей, шокирующих примитивностью, специалиста воодушевляет одно соображение: он вовсе не требует от расчетной модели результатов, близких к действительности. Достаточно лишь уверенности, что даваемые ей результаты наверняка не лучше действительности! Если вам показалось, что в последней фразе опечатка, — не страшно; по ходу изложения вы поймете, о чем речь. Важно, — и нам придется далее много раз в этом убеждаться, — что характер используемой модели обычно диктуется не мыслью теоретика, не произволом разработчика, а наличием **достоверных исходных данных**.

Утверждение, что разработка электронных схем не может основываться на реальных характеристиках и величинах параметров применяемых полупроводниковых приборов, покажется очередным пара-

доксом. Однако скорее следует удивляться, что находятся те, кого это может удивить. Знакомые по вузовским учебникам  $u$ - или  $h$ -параметры эквивалентного четырехполюсника, параметры физических эквивалентных схем, кривые вольтамперных характеристик — играют свою роль как удобные средства теоретического анализа, но вовсе не имеют того значения необходимых данных для разработки, какое можно из этих учебников вывести. А поскольку все же нередки жалобы на то, что в справочниках не найти нужных сведений, то не будет здесь излишним еще и разъяснение смысла числовых величин, которые фигурируют в технической документации на комплектующие изделия.

Первичный документ, откуда данные на радиокомпонент определенного типа переходят в паспорт, справочники, так называемые «даташиты», — это **технические условия**. В согласии с ними производится приемка полупроводниковых приборов на заводе-изготовителе. И значения числовых характеристик транзистора или диода (тех, которые там записаны) вовсе не являются справочными; это — **приемочные нормы**. Они играют важную роль при отбраковке дефектных приборов в испытаниях, а также при отладке технологического процесса.

Таким путем в «справочных» данных оказываются не действительные значения, а лишь гарантированные границы, да и то только некоторых «параметров» дискретного транзистора. Смысл иных нередко даже непонятен начинающему, который и остается в недоумении: что могут дать для целей расчета столь скудные, как кажется, сведения? Но проводить при выпуске с завода контроль полного набора возможных параметров, гарантировать статические характеристики изготовитель не в состоянии... Да это и не требуется. Почему?

Во-первых, параметры и характеристики полупроводниковых приборов подвержены сильному температурному дрейфу и вдобавок имеют большой разброс от экземпляра к экземпляру; о каких-либо «точных» их значениях для данного типа не может идти речи.

Во-вторых, если в работе схемы играют существенную роль нестабильные и малодостоверные параметры и характеристики, такую схему просто не следует использовать. Современные технические требования к устройствам, понятия о культуре разработки диктуют выбор эффективных и стабильных схемных конфигураций, свойства которых, конечно, не должны зависеть от разброса и дрейфа параметров полупроводников (в границах технических норм). Как правило, исключается и какой-либо отбор активных элементов. В еще большей степени это справедливо при разработке интегральных схем, когда ориентироваться приходится только на физику процессов и границы технологических допусков.

Значит, необходим особый подход к проектированию, не дублирующий методику теоретического анализа. Такой подход и будет проведен в книге.