

**ИНТЕРНАУКА**  
*internauka.org*

Касаткина Татьяна Игоревна

# УСТРОЙСТВА ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Учебное пособие

Москва  
2020

УДК 621.396

ББК 32.84

К280

Рецензенты:

*Москаленко А.Г.* – канд. физ.–мат. наук, доцент, руководитель учебно-лабораторного центра физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»;

*Кузьменко Р.В.* – д-р физ.–мат. наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

ISBN 978-5-6043132-8-2

**Касаткина Т.И.**

**К280 «Устройства генерирования и формирования сигналов»:**

учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей / сост.

Т.И. Касаткина. – Москва, Изд. «Интернаука», 2020. – 248 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы теории и техники устройств генерирования, формирования и передачи, применяемых в телекоммуникационных системах; общие принципы построения радиопередатчиков, схемы, электрические режимы генераторов, методы их расчетов, и повышения эффективности. Излагаются особенности радиопередатчиков с амплитудной, угловой, однополосной и импульсной модуляцией.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по радиотехническим специальностям и направлениям подготовки. Настоящее учебное пособие также будет полезно инженерам, занимающимся разработкой и эксплуатацией радиотехнических устройств.

ББК 32.84

ISBN 978-5-6043132-8-2

© Касаткина Т.И., 2020  
© ООО «Интернаука», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ:

<b>Введение .....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. Параметры и характеристики высокочастотных активных элементов</b>	<b>14</b>
1.1. Статические характеристики транзисторов и генераторных ламп .....	14
1.2. Аппроксимирование статических характеристик транзисторов и генераторных ламп .....	19
1.3. Параметры высокочастотных генераторных ламп и транзисторов .....	20
Контрольные вопросы к главе 1 .....	25
<b>Глава 2. Рабочие режимы активных элементов .....</b>	<b>27</b>
2.1. Классификация режимов по напряженности .....	27
2.2. Нагрузочные характеристики для генераторов с внешним возбуждением .....	29
2.3. Гармонический анализ косинусоидальных импульсов ..	30
Контрольные вопросы к главе 2 .....	31
<b>Глава 3. Электрические цепи высокочастотных генераторов</b>	<b>33</b>
3.1. Связанные колебательные контуры .....	33
3.2. Основные параметры колебательных контуров .....	35
3.3. Последовательный колебательный контур .....	36
3.4. Параллельный колебательный контур .....	38
3.5. Входные цепи генераторов .....	43

3.6. Выходные цепи генераторов .....	48
3.7. Схемы генераторов .....	51
3.8. Фильтрация высших гармоник .....	53
3.9. Разделительные и блокировочные элементы .....	56
Контрольные вопросы к главе 3 .....	59
<b>Глава 4. Энергетические соотношения в генераторах .....</b>	<b>61</b>
4.1. Основные соотношения для расчета выходных цепей генераторов .....	61
4.2. Соотношения для входных цепей генераторов .....	64
4.3. Режимы работы генераторов .....	65
Контрольные вопросы к главе 4 .....	65
<b>Глава 5. Ключевые усилители .....</b>	<b>67</b>
5.1. Основные формулы для расчета ключевых усилителей	67
5.2. Широкополосные усилители мощности с ключевым режимом работы .....	71
5.3. Усилители мощности, с подключенным в цепь нагрузки последовательным колебательным контуром .....	75
5.4. Усилители мощности с подключенным в цепь нагрузки параллельным колебательным контуром .....	77
5.5. Ключевые усилители мощности, работающие в ключевом режиме класса E .....	79
Контрольные вопросы к главе 5 .....	79

<b>Глава 6. Сложение мощностей генераторов .....</b>	<b>81</b>
6.1. Активные элементы с параллельным включением .....	81
6.2. Двухтактное подключение активных элементов .....	82
6.3. Сложение мощностей по мостовым схемам .....	84
Контрольные вопросы к главе 6 .....	89
<b>Глава 7. Широкополосные усилители .....</b>	<b>90</b>
7.1. Абсолютная частотная полоса усилителя. Условие согласования импедансов .....	90
7.2. Усилители с переключаемыми фильтрами .....	99
7.3. Усилители с отдельными полосами усиления .....	100
7.4. Усилители с распределенным усилением .....	102
7.5. Двухтактные усилители .....	103
7.6. Трансформаторы на линиях .....	106
Контрольные вопросы к главе 7 .....	107
<b>Глава 8. Умножители частоты .....</b>	<b>109</b>
8.1. Классификация умножителей частоты .....	109
8.2. Параметры умножителей частоты .....	110
8.3. Умножители частоты с активной нелинейностью .....	110
8.4. Умножители частоты с нелинейной реактивностью .....	112
Контрольные вопросы к главе 8 .....	113

<b>Глава 9. Автогенераторы гармонических колебаний и синтезаторы частот .....</b>	<b>115</b>
9.1. Основные типы автогенераторов .....	115
9.2. Автогенераторы с цепью внешней обратной связи .....	117
9.3. Автогенераторы с отрицательным дифференциальным сопротивлением, выполненные на основе двухполюсников	121
9.4. Схемы автогенераторов .....	125
9.5. Принцип расчета автогенератора в электронном режиме работы .....	135
9.6. Основные принципы расчета колебательной системы ...	142
9.7. Кварцевые автогенераторы .....	146
9.8. Автогенераторы на поверхностных акустических волнах	156
9.9. Синхронизация частоты и явление затягивания частоты автогенераторов .....	161
9.10. Стабильность частоты автогенераторов .....	166
9.11. Нелинейное уравнение автогенератора .....	172
9.12. Метод медленно меняющихся амплитуд. Квазилинейный метод .....	175
9.13. Процесс установления амплитуды автоколебаний .....	180
9.14. Шумы в автогенераторах .....	182
9.15. Флуктуации частоты и фазы автоколебаний .....	186
9.16. Паразитная автогенерация .....	187
9.17. Синтезатор стабильных частот .....	191

Контрольные вопросы к главе 9 .....	202
<b>Глава 10. Передатчики с амплитудной и однополосной модуляцией .....</b>	<b>205</b>
10.1. Амплитудная модуляция .....	205
10.2. Однополосная модуляция .....	207
Контрольные вопросы к главе 10 .....	209
<b>Глава 11. Передатчики с импульсной модуляцией .....</b>	<b>211</b>
11.1. Общие соотношения при осуществлении импульсной модуляции .....	211
11.2. Модуляторы с частичным разрядом накопительной емкости .....	212
11.3. Модуляторы формирующей линии с полным разрядом ..	218
11.4. Коммутаторные приборы .....	223
Контрольные вопросы к главе 11 .....	227
<b>Глава 12. Умножители частоты .....</b>	<b>229</b>
12.1. Основные общие соотношения при угловой модуляции	229
12.2. Параметры варикапов .....	233
12.3. Общие расчетные соотношения для модуляторов на емкостях $p$ - $n$ -переходов .....	238
12.4. Автотрансформаторная связь модулятора с контуром автогенератора .....	240
12.5. Емкостная связь модулятора и контура автогенератора ..	242
Контрольные вопросы к главе 12 .....	244

<b>Заключение. ....</b>	<b>246</b>
<b>Список использованной литературы .....</b>	<b>247</b>



## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие науки и совершенствование техники требует от современного человека, занимающегося умственным трудом и интеллектуальным творчеством постоянного получения новых знаний и практических навыков, а также глубокого совершенствования уже имеющихся умений и приемов, изучения технических новшеств, новых веяний и перспективных разработок. Предмет «Устройства генерирования и формирования сигналов» находится на передовой в области телекоммуникационных технологий, электронной и радиотехники. По своей сути, он является своеобразным синтезом, базирующимся на итоговых накопленных знаниях, навыков и умений с предыдущих курсов и дисциплин. Предмет базируется на знаниях, полученных в таких курсах, как «Физические основы электроники и радиоматериалы», «Электроника», «Цепи и сигналы», «Схемотехника телекоммуникационных устройств» и «Теория электрических цепей». Данный курс является одним из ключевых звеньев в цепи обучения и подготовки высококвалифицированных специалистов и бакалавров по радиотехническим специальностям. Специалисту и бакалавру в этой области важно и просто необходимо идти в ногу со временем, изучая как сведения о последних современных разработках и изобретениях в области телекоммуникационных систем, так и не забывать при этом классических основ, на которых базируются физические принципы построения приборов и устройств данной области знаний. Сам предмет «Устройства генерирования и формирования сигналов» находится на стыке разных наук, в нем происходит интеграция нескольких областей знаний. И он ожидает от постигающих его, гибкости мышления, способности объединять разработки из разных областей науки в одно целое, видеть техническое будущее и реализацию зарождающихся перспективных технологий, и уметь отметать лишние, отсеивать вторичные направления. Предмет, несмотря на все разнообразности его аспектов, учит делать правильный выбор. Поэтому, в силу постоянного обновления и развития технологий и техники, повышению уровней требования к ее качеству и производительности, современная литература по данной дисциплине должна непрестанно обновляться и быть актуальной.

В настоящем пособии рассмотрено состояние в предметной области на текущий момент. Проведен анализ и исследования каждой из современных группы приборов, с целью показать достоинства и недостатки, а также обозначить направления их лучшего применения. В пособии рассказывается, в каких направлениях разработки радиотехнических и телекоммуникационных систем, электронных схем и модулей лучше

применять то или иное устройство, с объяснением физических основ их работы и аспектов выбора в зависимости от поставленной задачи.

Данное учебное пособие стремится построить обучение студентов на принципе научить сравнивать и выбирать лучшее, оптимальное, развить умение находить точный баланс между требуемыми свойствами прибора, определяющимися его предназначением, и его собственными возможностями и характеристиками работы при различных физических условиях. Конечная цель, в итоге, научить выбирать, за счет каких именно характеристик и параметров можно получить нужный качественный результат, а также требуемый, в целях экономии средств, экономический эффект, где допускается пожертвовать одной из характеристик, а в каких случаях параметр является основополагающим. В пособие рассмотрены каждый тип из многообразия типов основных, используемых в устройствах генерирования и формирования сигналов для телекоммуникационных систем, классов приборов. В каждой главе приведены основные расчетные соотношения, рекомендуемые к использованию на практике.

В учебном пособии собран необходимый материал, позволяющий осуществить подбор, расчет и проектирование требуемой телекоммуникационной системы. В каждой из глав представлено описание физического принципа работы приборов и устройств, соответствующих данной тематике, проведен анализ их работы и сравнение с существующими аналогами. Также приведены основные схемы, с пояснениями реализующихся в них процессов и описанием их предназначения. Настоящее учебное пособие призвано ознакомить читателя с современным состоянием предметной области, а также с фундаментальными закономерностями и основами, знание которых необходимо для завтрашнего дня. В книге рассмотрены свойства перспективных приборов: MOSFET-транзисторов, IGBT-транзисторов, реверсивно-включаемых диодов и др. Значительное внимание уделено перспективным схемам ключевых и широкополосных усилителей, высокостабильным автогенераторам, в том числе работающих на поверхностных акустических волнах, цифровым синтезаторам частот. Рассмотрены актуальные вопросы согласования импедансов, анализа переходных процессов в автогенераторах и влияния шумов на частоту и фазу автоколебаний. Необходимость написания данного пособия возникла по результатам анализа существующей современной литературы в данной отрасли. Курс О.В. Головина [Головин О.В., 2014] является единственным современным учебным пособием, полностью посвященным всему и именно этому предмету.

Остальные, приведенные в списке литературы учебные пособия, учебники и учебные материалы рассматривают только некоторые избранные главы, которые приводятся в них в качестве дополнительных или вспомогательных. Таким образом, учебное пособие О.В. Головина является лучшим на сегодняшний момент, охватывающее огромное число вопросов и детально описывает многообразные тонкости и аспекты. Курс О.В. Головина является фундаментальным, рассчитанным скорее на магистра, аспиранта и ученого, занимающихся разработкой передовых устройств генерирования и формирования сигналов. Однако, в силу своего объема в 782 страниц, к сожалению, не может быть усвоен в полной мере студентом-бакалавром за один семестр изучения данной дисциплины. Настоящее пособие старалось включить в себя главное, подвести своего рода некоторые резюме, дать те знания, которые способны будут найти применение на практике. Не стремясь объять необъятное, настоящее учебное пособие старается, в своем роде, подготовить студента к изучению учебника О.В. Головина, дать студенту все необходимые понятия физических основ и принципов. Стремится заложить навыки, необходимые для того, чтобы понять уже тонкости аспектов работы устройств и приборов, приведенных в книге О.В. Головина, не запутавшись во всем великолепии и многообразии возможных схемных реализаций.

Настоящее пособие задумывалось автором в качестве некоего фундамента базовых знаний для надежной опоры последующих углубленных знаний. Автор надеется, что любознательный студент обязательно продолжит свою работу в постижении дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов» самостоятельно именно прочтением учебного пособия О.В. Головина. А также, в целях оттачивания практического мастерства, автор надеется, что студент обратит особое внимание на фундаментальный задачник С.С. Гарматюка [Гарматюк С.С., 2015], занимающий достойное место при подготовке специалистов в области телекоммуникаций. В нем студент сможет найти огромное разнообразие практических задач и примеров, на которых сможет совершенствовать свои навыки решения задач.

Материал настоящего учебного пособия скомпонован таким образом, что каждая последующая глава является логическим продолжением предыдущих, и охватывает все основные направления дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов». Учебное пособие состоит из двенадцати глав, содержит теоретический материал и контрольные вопросы по характеристикам и параметрам активных элементов; энергетическим соотношениям в генераторах; ключевым и широкополосным усилителям; устройствам сложения

мощностей; умножителям частоты; автогенераторам и синтезаторам частот; передатчикам с амплитудной, однополосной, импульсной и угловой модуляцией.

Первая глава посвящена основным параметрам и характеристикам высокочастотных активных элементов. Знания, полученные по изучению данной главы, позволят студентам разобраться в практическом применении статических характеристики приборов, и познакомит с параметрами высокочастотных генераторных ламп и транзисторов. Вторая глава знакомит с режимами работы активных элементов. В результате изучения этой главы студенты смогут понимать принципы, лежащие в основе классификации рабочих режимов по напряженности, что в дальнейшем позволит им проводить обоснование выбора соответствующего режима работы того или иного устройства. Третья глава посвящена электрическим цепям высокочастотных генераторов. Ее изучение позволит понимать работу последовательного параллельного, а также связанных колебательных контуров, схемы генераторов, принципы фильтрации высших гармоник, различные применения разделительных и блокировочных элементов, а также входных и выходных цепей генераторов, которые заложат основу для понимания энергетических соотношений в генераторах, которым посвящена следующая – четвертая глава. В ней читатель найдет объяснения принципов работы и описание режимов работы генераторов, а также основные соотношения для расчета их входных и выходных цепей. Пятая глава посвящена ключевым усилителям их расчету и методов осуществления выбора нужного в приведенной классификации. Шестая глава посвящена описанию явлений, происходящих при сложении мощностей генераторов, а также рассмотрению активных элементов с параллельным и двухтактным подключением в электронную схему и сложение мощностей по мостовым схемам, что впоследствии, создаст основу выбора схемного решения в компонентах телекоммуникационных и электронных устройств, и радиоприборов. Седьмая глава рассматривает основы работы широкополосных усилителей, находящихся в настоящее время широкое применение в системах телекоммуникации и связи, а также автотрансформаторной технике. Восьмая глава посвящена умножителям частоты и описанию их свойств и принципов работы. Девятая глава посвящена обширному классу приборов – автогенераторам гармонических колебаний и синтезаторам частот. Ей уделено особое внимание в силу многообразия классов существующих автогенераторов, без качественного изучения которых невозможно понимание принципов работы приборов телекоммуникационных систем. В девятой главе рассмотрены все основные виды автогенераторов, проведено описание

работы, достоинств и сильных сторон, недостатков для возможности выбора, а также расчетных формул, необходимых для определения их характеристик. Десятая глава посвящена передатчикам с амплитудной и однополосной модуляцией. Одиннадцатая рассматривает передатчики с импульсной модуляцией, типы модуляторов и коммутаторные приборы. В двенадцатой главе студент найдет описание передатчиков с угловой модуляцией и варикапов, а также их параметров.

С целью развития умения применять на практике вопросы теории и для способствования лучшему усвоению и закреплению материала, изложенный теоретический материал после каждой главы сопровождается контрольными вопросами. Они ориентируют студентов на необходимость проанализировать, обдумать и сравнить, расставляя при этом акценты на вопросах, которые, по мнению автора, будут наиболее часто, с большей долей вероятности, затрагиваться выпускниками-бакалаврами в своей профессиональной деятельности, после получения диплома бакалавра.

Учебное пособие предназначено для студентов специалистов и бакалавров, обучающихся по радиотехническим специальностям и изучающих дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов» или «Устройства генерирования и формирования сигналов в телекоммуникационных системах». Однако оно без ограничений также может быть использовано студентам других специальностей, изучающих данную, а также смежные дисциплины, и инженерным работникам, специализирующимся в области радиотехнических, телекоммуникационных систем и систем связи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии были рассмотрены устройства, являющиеся общими как для радиопередатчиков, так и для радиоприемников, и используемые при проектировании, оптимизации и рассмотрении каналов связи. Данное пособие было призвано способствовать формированию навыков и умений чтения и построения схем, расчетных формул, с использованием средств вычислительной и компьютерной техники, а также развитию у студентов умения четко и лаконично формулировать мысль, правильно ставить задачу и находить пути ее решения, умению выбирать наилучший вид прибора или его схемную реализацию. Наиболее сложный, труднодоступный материал был изложен в пособии более подробно с расставленными акцентами на особо важных для понимания закономерностях. Знания, полученные при изучении дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов», позволят студентам в дальнейшем разбираться в работе телекоммуникационных, электронных, радиоэлектронных и устройств связи. Автор надеется, что изложенный в пособии материал был полезен для решения как учебных, так и многих, в будущем, возникающих профессиональных практических задач, а полученные навыки смогут быть перенесены студентами в будущую практическую деятельность. Данное пособие было написано в соответствии с программой курсов «Устройства генерирования и формирования сигналов» и «Устройства генерирования и формирования сигналов в телекоммуникационных системах» для студентов-бакалавров, и, безусловно, не ставило целью дать исчерпывающее изложение всех вопросов, которые можно отнести к области телекоммуникаций. Но, как надеется автор, вызвало интерес у читателя к данной области. Заинтересованный читатель, проработав материал настоящего пособия, сможет, используя дополнительные и приведенные в списке использованной литературы источники, а также рекомендации автора во введении к данному учебному пособию, самостоятельно продолжить работу в интересующем его направлении.

*Учебное пособие*

*Касаткина Татьяна Игоревна*

# УСТРОЙСТВА ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Подписано в печать 30.04.2020. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 15,5. Тираж 550 экз.

Издательство «Интернаука»  
125424, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 108, цокольный этаж,  
помещение VIII, комн. 4, офис 33  
E-mail: [mail@internauka.org](mailto:mail@internauka.org)

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии Allprint  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3

16+