

Адаменко М. В.

**Шпионские штучки**  
**или**  
**секреты тайной**  
**радиосвязи**



Москва, 2010

**УДК 004.438**  
**ББК 32.973.26-018.2**  
**Б 28**

**Адаменко М. В.**

Шпионские штучки или секреты тайной радиосвязи. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 155 с.

**ISBN 978-5-94074-601-0**

В предлагаемой книге рассматриваются особенности схемотехнических решений, применяемых при создании миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств. В соответствующих главах приводится информация о принципах действия и особенностях функционирования отдельных узлов и каскадов, принципиальные схемы, а также другие сведения, необходимые при самостоятельном конструировании простых радиопередатчиков и радиомикрофонов. Отдельная глава посвящена рассмотрению практических конструкций транзисторных микропередатчиков для систем связи малого радиуса действия.

Книга предназначена для начинающих радиолюбителей, интересующихся особенностями схемотехнических решений узлов и каскадов миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств.

**УДК 004.438**  
**ББК 32.973.26-018.2**

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

© Адаменко М. В., 2010

ISBN 978-5-94074-601-0

© Оформление, ДМК Пресс, 2010

# СОДЕРЖАНИЕ

---

От автора .....	5
Предисловие .....	6
Список сокращений и обозначений .....	8
<b>1 Микрофоны .....</b>	<b>9</b>
1.1. Общие сведения .....	10
Назначение, принцип действия и составные части .....	10
Классификация микрофонов .....	12
Основные технические характеристики .....	15
1.2. Особенности применения микрофонов .....	18
Подключение и согласование .....	18
Цепи формирования напряжения питания .....	22
<b>2 Микрофонные усилители .....</b>	<b>24</b>
2.1. Назначение и основные характеристики микрофонного усилителя .....	25
2.2. Усилительный каскад на транзисторе .....	27
Принцип действия .....	27
Стабилизация положения рабочей точки транзистора .....	32
Микрофонный усилитель на полевом транзисторе .....	39
2.3. Двухкаскадные микрофонные усилители .....	42
Усилители с непосредственной связью .....	42
Микрофонные усилители с согласующим каскадом .....	51
<b>3 Генераторы сигнала высокой частоты .....</b>	<b>54</b>
3.1. Общие сведения .....	55
Назначение и принцип действия .....	56
Состав и классификация .....	58
Основные характеристики .....	62
Обеспечение стабильности частоты ВЧ-генератора .....	64
3.2. Генераторы с резонансными LC-контурами .....	66
LC-генераторы с индуктивной связью .....	66
LC-генераторы с емкостной связью .....	71
Трехточечные LC-генераторы .....	73
LC-генераторы на полевых транзисторах .....	83
3.3. Генераторы с кварцевой стабилизацией частоты .....	87
Кварцевый резонатор в ВЧ-генераторе .....	87
Трехточечные кварцевые генераторы .....	90
Генераторы последовательного резонанса .....	99

<b>4</b>	<b>Модуляторы высокочастотного сигнала .....</b>	105
4.1.	Общие сведения .....	106
	Основные понятия и определения .....	107
	Виды модуляции .....	108
	Основные способы модуляции .....	110
4.2.	Модуляция с помощью варикапа .....	112
	Принцип действия и основные параметры варикапа .....	113
	Основные схемы включения варикапа .....	114
4.3.	Модуляция сигнала LC-генераторов .....	117
	Модуляция сигнала LC-генераторов с индуктивной	
	и емкостной связью .....	118
	Модуляция сигнала трехточечных LC-генераторов .....	120
	Варикапы в модуляторах LC-генераторов .....	122
4.4.	Модуляция сигнала ВЧ-генераторов	
	с кварцевой стабилизацией частоты .....	124
	Амплитудная модуляция .....	125
	Частотная модуляция .....	127
<b>5</b>	<b>Простые транзисторные радиопередающие устройства .....</b>	131
5.1.	Радиопередатчики на одном транзисторе .....	132
	Радиопередатчики на биполярном транзисторе .....	133
	Радиопередатчики на полевом транзисторе .....	139
5.2.	Простые радиомикрофоны .....	142
	Радиомикрофоны на двух биполярных транзисторах .....	142
	Радиомикрофоны с модулятором на варикапе .....	148

---

# ОТ АВТОРА

---

Уважаемые читатели!

Прежде чем вы начнете читать данную книгу, считаю необходимым ознакомить вас со следующей информацией.

Любые оценки, мнения, рекомендации, высказанные в этой книге, являются личными оценками, мнениями автора и не могут рассматриваться как реклама или антиреклама.

Автор старался предоставлять точную и проверенную информацию, однако не может гарантировать полную достоверность изложенных в книге материалов, схем и рисунков. Предлагаемые описания физических процессов и принципов функционирования, определения и разъяснения не претендуют на академическую точность, поскольку данная книга представляет собой не учебник, а популярное издание, предназначенное для широкого круга читателей, часто не обладающих достаточно глубокими знаниями рассматриваемой тематики.

Ссылки, а также иные сведения даются исключительно в информационных целях.

Вся информация, изложенная в данной книге, приводится «как есть» (*as is*) с возможными ошибками, без гарантий любого вида, прямо выраженных или подразумеваемых. Поэтому ни автор, ни издательство не несут ответственность за возможные последствия, вызванные использованием приведенных в данной книге материалов, рисунков, схем и иной информации, в том числе за любые прямые или косвенные убытки, возникшие в результате практического или теоретического применения сведений, изложенных в этой книге.

Использование рисунков и схем, приводимых в этой книге, а также иной изложенной в ней информации осуществляется читателем на собственный страх и риск с возложением на него ответственности за все возможные последствия, в том числе за возникшие у него или у третьих лиц прямые или косвенные убытки.

С уважением и наилучшими пожеланиями,  
**М.В. Адаменко**

# ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Одним из самых перспективных направлений современной радиоэлектроники, без сомнения, является разработка и создание высокочастотной аппаратуры радиосвязи, бурному развитию которого не смогло воспрепятствовать даже появление систем мобильной телефонии и спутниковой связи. Естественно, особый интерес к высокочастотной технике проявляют и радиолюбители. В настоящее время в специализированной литературе, реагирующей на повышенный спрос к данной теме, постоянно публикуются описания различных конструкций, начиная от простейших радиомикрофонов (так называемых «жучков») и заканчивая сравнительно сложными системами радиосвязи.

К сожалению, весьма существенным недостатком большинства предлагаемых вниманию заинтересованных читателей публикаций является практически полное отсутствие описания не только теоретических основ протекающих при работе таких устройств физических процессов, но и основополагающих принципов функционирования отдельных узлов и каскадов. В то же время стиль изложения соответствующей информации в пособиях, предназначенных для студентов средних и высших специальных учебных заведений, не всегда понятен и доступен в первую очередь начинающим радиолюбителям, часто не имеющим достаточной специальной теоретической подготовки.

В результате многие радиолюбители не имеют возможность получить интересующую их информацию по вопросам, касающимся особенностей схемотехнических решений, применяемых в современных средствах радиосвязи, в том числе и в транзисторных радиопередающих устройствах, принципов их работы, основных технических параметров и возможностей. Отсутствие необходимой информации препятствует радиолюбителям получить соответствующие теоретические знания и практические навыки, необходимые не только для повторения описываемых в специализированной литературе устройств, но и для разработки собственных конструкций.

В предлагаемой вниманию читателей книге автор постарался собрать и обобщить основополагающие сведения, касающиеся особенностей схемотехнических решений, наиболее часто применяемых при разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств. В соответствующих разделах отдельных глав приводится информация о принципах действия и особенностях функциониро-

вания отдельных узлов и каскадов, принципиальные схемы, а также другие сведения, необходимые при самостоятельном конструировании простых радиопередатчиков и радиомикрофонов. Отдельная глава посвящена рассмотрению практических конструкций простых транзисторных микропередатчиков для систем связи малого радиуса действия.

Необходимо отметить, что миниатюрные радиопередающие устройства, конструкции которых рассмотрены в данной книге, могут использоваться на вполне законных основаниях в составе домашних систем связи, предназначенных для прослушивания помещений в доме или квартире. Такие микропередатчики могут применяться, например, для прослушивания детской комнаты или в составе системы сигнализации для получения звукового сигнала из охраняемого помещения. Миниатюрные радиопередающие устройства могут использоваться в домах и на дачных участках в составе беспроводного звонка или интеркома. Помимо этого радиомикрофоны, отличающиеся от простых микропередатчиков более качественной передачей звукового сигнала, применяются, например, при озвучивании презентаций, дискотек и других массовых мероприятий.

Конечно же, недобросовестные граждане могут попытаться применить описанные далее радиопередатчики для несанкционированного прослушивания. Однако таким «радиолюбителям» автор рекомендует помнить о возможных весьма неблагоприятных последствиях.

**Внимание!** Применение любой из описываемых далее конструкций в качестве специального технического средства для негласного получения информации или несанкционированного прослушивания, а также ее производство, сбыт и/или приобретение (в том числе и в целях сбыта), ввоз и вывоз для осуществления указанных деяний преследуется в соответствии с действующим административным и уголовным законодательством Российской Федерации.

# **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

---

АМ	амплитудная модуляция
АМ-диапазон	диапазон длинных и средних волн
АПЧ	автоматическая подстройка частоты
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
ВЧ	высокая частота
ВЧ-генератор	генератор колебаний высокой частоты
ВЧ-сигнал	сигнал высокой частоты
ВЧ-усилитель	усилитель сигналов высокой частоты
ДВ	длинные волны
ДН	диаграмма направленности
КПД	коэффициент полезного действия
МУ	микрофонный усилитель
НЧ	низкая частота
НЧ-сигнал	сигнал низкой частоты
НЧ-усилитель	усилитель сигналов низкой частоты
ООС	отрицательная обратная связь
ОС	обратная связь
ПОС	положительная обратная связь
СВ	средние волны
УВЧ	усилитель сигналов высокой частоты
УКВ	ультракороткие волны
УКВ-диапазон	диапазон 64,0–74,0 МГц
УНЧ	усилитель сигналов низкой частоты
ЧМ	частотная модуляция
FM	частотная модуляция
FM-диапазон	диапазон 88,0–108 МГц
GND	шина корпуса (общий провод)
IN	вход
LW	длинные волны
MW	средние волны
OUT	выход
SA	выключатель
WA	антенна

**1****МИКРОФОНЫ**

<b>2</b>	Микрофонные усилители	24
<b>3</b>	Генераторы сигнала высокой частоты	54
<b>4</b>	Модуляторы высокочастотного сигнала	105
<b>5</b>	Простые транзисторные радиопередающие устройства	131

В малогабаритных радиопередатчиках непосредственное преобразование звуковых колебаний или акустических сигналов в электрический сигнал осуществляется с помощью специальных акусто-электрических преобразователей. Чаще всего в роли таких преобразователей выступают хорошо известные микрофоны различных типов, обеспечивающие преобразование энергии акустических колебаний окружающей среды в переменный электрический ток звуковой частоты. В данной главе рассматриваются особенности применения некоторых типов микрофонов в миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах.

В специализированной литературе и в сети Интернет можно найти немало описаний конструкций радиопередатчиков, в которых в качестве подобных преобразователей используются и другие устройства, например, динамические головки громкоговорителей. Однако рассмотрение основных принципов их функционирования выходит за рамки данной книги.

## **1.1. Общие сведения**

---

Правильный выбор и корректная эксплуатация микрофона для радиопередающего устройства невозможны без знания некоторых основополагающих сведений о нем. Поэтому в данном разделе изложены основные критерии классификации микрофонов, а также рассмотрены конструктивные особенности некоторых типов миниатюрных микрофонов, применяемых в транзисторных микропередатчиках. Особое вниманиеделено основным параметрам и характеристикам, которые имеют решающее значение при выборе микрофона для создаваемой в радиолюбительских условиях конструкции. Необходимо отметить, что подробное описание теоретических основ функционирования микрофонов различных типов, к сожалению, выходит за рамки предлагаемого издания в связи с его ограниченным объемом. Поэтому принципы работы таких устройств будут рассмотрены весьма упрощенно, не претендуя на академическую точность.

### **Назначение, принцип действия и составные части**

Микрофон, используемый в миниатюрном радиопередающем устройстве, а также в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, имеет определенные назначение, принцип действия и составные части.

паратуре, предназначен для преобразования акустического сигнала в электрический низкочастотный сигнал. В процессе реализации такого преобразования на вход микрофона поступает акустический сигнал, а на его выходе формируется электрический сигнал соответствующей частоты. Иными словами, микрофон представляет собой специальное устройство, с помощью которого осуществляется преобразование энергии акустических колебаний воздушной или иной окружающей среды в электрическую энергию сигналов звуковой частоты.

Принцип действия обычного микрофона весьма прост и заключается в том, что акустический сигнал, проявляющийся в виде соответствующего изменения акустического давления, воздействует на чувствительный механический элемент специального акустико-электрического или механико-электрического преобразователя, являющегося основным элементом любого микрофона. В качестве такого элемента может выступать, например, мембрана с диафрагмой. Перемещение механического элемента в пространстве регистрируется электрической частью преобразователя, где происходит непосредственное формирование электрического сигнала звуковой частоты. Помимо акустико-электрического преобразователя в состав конструкции микрофона входят и другие функциональные узлы, обеспечивающие его работу с требуемыми параметрами и характеристиками.

Таким образом, конструктивно практически любой микрофон можно представить как устройство, которое состоит из акустико-электрического преобразователя с чувствительным элементом (например, мембрана с диафрагмой), арматуры (корпус и другие элементы механической конструкции), согласующего устройства и вспомогательных узлов (например, кабели и разъемы). Помимо этого, в состав, например, конденсаторных микрофонов входит специальный источник питания. Соответствующие цепи питания и усиливательные каскады являются неотъемлемой частью микрофонов со встроенным усилителем.

В процессе преобразования акустического сигнала в электрический сигнал в отдельных функциональных узлах микрофона происходят определенные физические процессы, в соответствии с которыми практически любой современный микрофон можно представить как совокупность функциональных каскадов или звеньев. Первым из них является приемник звуковых или акустических колебаний, обеспечивающий прохождение звуковых волн, поступающих с определенного

направления, на последующие узлы микрофона. Этот узел определяет характеристику направленности микрофона. Далее звуковые волны проходят на специальный каскад, часто называемый акустико-механическим звеном, от параметров которого в значительной степени зависит частотная характеристика чувствительности микрофона. Непосредственное преобразование механических колебаний в электрические волны происходит в так называемом электромеханическом преобразователе, от параметров которого зависит чувствительность микрофона. Согласование выходных характеристик этого преобразователя с входными характеристиками последующего усилительного каскада обеспечивает специальный выходной электрический каскад, который в некоторых моделях микрофонов может использоваться для корректировки амплитудно-частотной характеристики.

## **Классификация микрофонов**

В специализированной радиотехнической литературе можно найти различные критерии и, соответственно, системы классификации микрофонов. Однако ограниченный объем данной книги не позволяет подробно рассмотреть даже некоторые из них. Поэтому далее остановимся лишь на важнейших критериях и признаках, чаще всего используемых в качестве основы для классификации микрофонов, применяемых в миниатюрных радиопередатчиках.

Одним из основных критериев, применяемых при классификации микрофонов, является способ воздействия звуковых колебаний на чувствительный элемент акусто-электрического преобразователя. Часто классификацию по такому принципу называют классификацией по типу приемника. В соответствии с этим критерием микрофоны делятся на приемники давления, приемники градиента давления, комбинированные приемники и приемники с изменяемой диаграммой направленности.

В приемниках давления воздействие акустического сигнала и, соответственно, акустического давления на чувствительный элемент может осуществляться только с одного направления, а именно со стороны источника звукового сигнала или с фронтальной стороны. В таких микрофонах амплитуда перемещения чувствительного элемента не зависит от направления и удаленности источника сигнала, а только от величины акустического давления. Приемники давления обычно имеют круговую или вытянутую диаграмму направленности и часто называются ненаправленными микрофонами.

Использование специальных конструктивных решений в приемниках градиента давления обеспечивает возможность воздействия акустического сигнала на чувствительный элемент не только с фронтальной, но и с тыльной стороны. При этом амплитуда перемещения чувствительного элемента не зависит от величины акустического давления, а определяется лишь разницей величин давлений перед чувствительным элементом и за ним. Чем больше эта разница (перепад давления или градиент), тем больше переместится, например, мембрана. Таким образом, у приемников градиента давления, часто называемых градиентными микрофонами, отклонение положения чувствительного элемента и, соответственно, величина выходного напряжения в определенной степени зависят от направления на источник акустического сигнала. Эта зависимость определяет форму диаграммы направленности. В зависимости от конструктивных особенностей градиентные микрофоны имеют диаграмму направленности в форме так называемой «восьмерки» и часто называются микрофонами с двусторонней диаграммой направленности.

В комбинированных приемниках или комбинированных микрофонах, представляющих собой комбинацию механических конструкций чаще всего двух микрофонов, с помощью специальных конструктивных решений удается получить одностороннюю диаграмму направленности. Так, например, совместное использование в одном корпусе приемника давления и приемника градиента давления позволяет сложением их диаграмм направленности круговой формы и «восьмерки» сформировать диаграмму в форме кардиоиды, то есть диаграмму с односторонней направленностью.

В отдельную группу, по мнению автора, следует выделить микрофоны с переменной диаграммой направленности. Необходимо отметить, что некоторые специалисты считают микрофоны с переменной ДН лишь разновидностью комбинированных микрофонов, поскольку и в том, и в другом случае конструктивная или механическая часть таких устройств представляет собой комбинацию двух микрофонов. Однако подобное объединение в одну группу комбинированных микрофонов и микрофонов с переменной диаграммой направленности можно считать достаточно спорным. Дело в том, что в комбинированных микрофонах жестко связаны между собой не только механические элементы, но и «жестко» объединены и неизменны электрические схемы включения электромеханических преобразователей. В микрофонах с переменной диаграммой направленности, конструктивно также состоящих обычно из двух микро-

фонов, изменение формы диаграммы направленности достигается комбинированием и/или коррекцией электрических цепей их включения. Иными словами, при эксплуатации микрофона с переменной диаграммой направленности пользователь имеет возможность самостоятельно выбрать форму диаграммы направленности имеющегося в его распоряжении микрофона. При работе с комбинированным микрофоном такая возможность у пользователя отсутствует.

Микрофоны делятся на определенные группы и в зависимости от формы диаграммы направленности, которая представляет собой зависимость чувствительности микрофона от угла, образованного акустической осью микрофона и осью источника акустического сигнала. Иными словами, диаграмму или характеристику направленности можно определить как зависимость чувствительности микрофона на заданной частоте от угла падения звуковой волны. По этому критерию микрофоны подразделяются на ненаправленные (с круговой или вытянутой диаграммой направленности), с двусторонней направленностью (диаграмма в форме «восьмерки»), с кардиоидной направленностью (с диаграммой направленности в форме кардиоиды), а также остронаправленные микрофоны. В остронаправленных микрофонах соответствующая форма диаграммы направленности достигается различными способами, рассмотрение которых выходит за рамки данной книги.

В зависимости от типа электромеханического преобразователя микрофоны подразделяются на электромагнитные, угольные, пьезоэлектрические, конденсаторные и электродинамические. В миниатюрных передатчиках чаще всего применяются электродинамические (динамические) и конденсаторные (электростатические) микрофоны.

Электродинамические микрофоны, часто называемые динамическими, в зависимости от конструктивных особенностей применяемого в них электромеханического преобразователя, делятся на катушечные и ленточные. В катушечных микрофонах бескаркасная цилиндрическая катушка, прикрепленная к диафрагме, помещена в магнитное поле постоянного магнита. При ее перемещении вследствие воздействия акустических колебаний в катушке индуцируется электродвижущая сила соответствующей величины и направленности. В ленточных микрофонах в качестве подвижного элемента применяется гофрированная металлическая ленточка, установленная между полюсными наконечниками постоянного магнита. Эта ленточка одновременно является проводником тока и подвижной системой преобразователя.

Основу электромеханического преобразователя конденсаторных (электростатические) микрофонов составляют подвижный и неподвижный электроды, которые образуют обкладки конденсатора. Подвижный электрод конструктивно выполняется в виде мембраны из металлической фольги или металлизированной полимерной пленки. Эта мембрана колеблется под действием акустических колебаний, что приводит к соответствующему изменению емкости электромеханического преобразователя по отношению к состоянию покоя.

Особого внимания заслуживают получившие широкое распространение так называемые электретные конденсаторные микрофоны. В них мембрана выполнена из металлизированной с внешней стороны полимерной электретной пленки, которая поляризуется и сохраняет поверхностный заряд сравнительно долгое время. Выходное сопротивление электростатических микрофонов имеет значительную величину, поэтому в их состав включается специальный согласующий каскад, который также обеспечивает и усиление сигнала. Питание этого каскада осуществляется от внешнего источника постоянного напряжения, поэтому схемы включения таких микрофонов имеют определенные особенности.

Среди радиолюбителей весьма популярны часто используемые и в радиолюбительских конструкциях транзисторных микропередатчиков так называемые капсульные электретные микрофоны отечественного производства типов МКЭ-332 и МКЭ-333 различных модификаций, а также электретные микрофоны зарубежного производства, например, типов MCE100, MCE101 и SZN-15E.

Более подробную информацию о принципе работы и конструктивных особенностях электродинамических и электростатических микрофонов заинтересованный читатель может найти в специализированной литературе.

## **Основные технические характеристики**

При выборе микрофона для миниатюрного радиопередающего устройства помимо указанных выше конструктивных особенностей электромеханических преобразователей следует учитывать и другие характеристики микрофона. Среди них особое место занимают чувствительность, частотная характеристика и номинальный диапазон частот, а также модуль полного электрического сопротивления и уже упоминавшаяся форма диаграммы направленности.

Под чувствительностью микрофона понимается соотношение его выходного напряжения и акустического давления, которое явилось инициатором появления этого напряжения. Обычно чувствительность выражается в В/Па или в мВ/Па. В специализированной литературе нередко можно встретить выражение измеренной чувствительности в дБ по отношению к базовому уровню 1 В/Па.

Чувствительность микрофона является характеристикой, зависящей от частоты, и обычно нормируется на частоте 1000 Гц. Например, у электретных микрофонов отечественного производства типов МКЭ-332 и МКЭ-333 чувствительность, в зависимости от модификации, составляет от 3 мВ/Па до 24 мВ/Па. У импортного электретного микрофона типа МСЕ100 чувствительность не хуже 5 мВ/Па, а у микрофона SZN-15E эта характеристика не хуже 58 мВ/Па.

Частотная характеристика микрофона представляет собой зависимость его выходного напряжения от частоты акустического сигнала при постоянной величине акустического давления. Обычно частотная характеристика измеряется на рабочей оси микрофона, то есть по направлению его максимальной чувствительности. Поэтому такая характеристика нередко называется осевой или фронтальной. Частотная характеристика микрофона обычно указывается в его паспортных данных. При необходимости ее можно найти в справочной литературе или в сети Интернет.

Немалое значение имеют и такие параметры микрофона, как неравномерность его частотной характеристики, измеряемая в дБ, а также номинальный диапазон частот. У отечественных электретных микрофонов типов МКЭ-332 и МКЭ-333 нижняя граница номинального диапазона частот, в зависимости от модификации, находится в пределах от 50 Гц до 100 Гц, а верхняя граница – в пределах от 12 кГц до 15 кГц. Импортный электретный микрофон типа МСЕ100 имеет номинальный диапазон частот от 50 Гц до 12000 Гц, а у микрофона типа SZN-15E номинальный диапазон частот составляет от 80 Гц до 15000 Гц. Неравномерность частотной характеристики электретных микрофонов обычно находится в пределах от 1 дБ до 3 дБ.

Модуль полного электрического сопротивления или импеданса микрофона представляет собой величину сопротивления на его выходных контактах. Знание этой величины позволяет определить необходимое входное сопротивление каскада, к входу которого пред-

полагается подключить микрофон, например, микрофонного усилителя, обеспечив оптимальное согласование. Модуль полного электрического сопротивления микрофона является характеристикой, зависящей от частоты, и обычно нормируется на частоте 1000 Гц. Например, у электретных микрофонов отечественного производства типа МКЭ-332 и МКЭ-333, как и у импортного микрофона типа МСЕ100 модуль полного электрического сопротивления составляет около 600 Ом.

При разработке низкочастотного тракта миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов входное сопротивление следующего каскада (микрофонного усилителя) выбирается в 5–10 раз большим, чем импеданс микрофона. Использование в качестве нагрузки микрофона каскада со слишком малым входным сопротивлением приводит к искажению частотной характеристики, увеличению искажений, а также к снижению соотношения сигнал/шум.

Диаграмма направленности микрофона представляет собой зависимость его чувствительности от угла, образованного акустической осью микрофона и осью источника акустического сигнала. Таким образом, диаграмму или характеристику направленности можно представить как зависимость чувствительности микрофона на заданной частоте от угла падения звуковой волны. Форма диаграммы направленности может быть различной, например, круговая или вытянутая у ненаправленных микрофонов, в форме «восьмерки» у микрофонов с двусторонней направленностью, в форме кардиоиды и т.п. Уже упоминавшийся микрофон типа МКЭ-332 имеет диаграмму с односторонней направленностью, а микрофон типа МКЭ-333 является ненаправленным, форма его диаграммы направленности близка к круговой.

При выборе микрофона для низкочастотного тракта миниатюрных радиопередающих устройств особое внимание следует обратить, помимо рассмотренных выше параметров, на его массу и габаритные размеры, а также на определенные конструктивные особенности. Не следует забывать и о том, что конструктивно микрофоны могут отличаться друг от друга количеством и конструкцией выводов. Необходимо отметить, что динамические микрофоны, по сравнению с конденсаторными микрофонами, более чувствительны к воздействию вибраций, как и направленные микрофоны по сравнению с приемниками давления.

## 1.2. Особенности применения микрофонов

---

В процессе разработки малогабаритных радиопередающих устройств, в которых преобразование акустического сигнала в низкочастотный электрический сигнал осуществляется с помощью миниатюрных микрофонов, следует учитывать характерные особенности применяемых микрофонов. Эти особенности заключаются, в первую очередь, в необходимости использования соответствующих цепей подключения и согласования с последующими каскадами. Помимо этого, при применении электростатического микрофона в состав конструкции следует ввести каскад, обеспечивающий формирование напряжения питания этого микрофона.

### **Подключение и согласование**

В настоящее время в малогабаритных транзисторных радиопередающих устройствах применяются микрофоны различных типов, но чаще всего разработчики отдают предпочтение динамическим, конденсаторным и электретным микрофонам. При этом выбор микрофона осуществляется с учетом его технических характеристик и параметров, основными из которых являются чувствительность, номинальный диапазон частот, характеристика направленности, модуль полного электрического сопротивления, а также масса, габаритные размеры и т.п. Для конденсаторных микрофонов не менее важной характеристикой является уровень эквивалентного звукового давления.

При подключении микрофона к входу следующего каскада, например, к входу микрофонного усилителя, помимо определенных электрических параметров самого микрофона (импеданс и напряжение) следует учитывать входные характеристики нагрузки (входное сопротивление и чувствительность, например, микрофонного усилителя). Поскольку в паспортных данных чувствительность микрофона указывается для так называемого режима холостого хода (без нагрузки), то входное сопротивление следующего каскада должно быть в 5–10 раз больше, чем модуль полного электрического сопротивления микрофона.

Так называемые низкоомные катушечные динамические микрофоны, чувствительность которых составляет обычно от 1 мВ/Па до

3 мВ/Па, чаще всего имеют выходное сопротивление в пределах от 50 Ом до 200 Ом и обеспечивают формирование выходного напряжения величиной от нескольких милливольт до 25 мВ. Поэтому при использовании такого микрофона следующий каскад должен иметь соответствующую чувствительность (не хуже 0,5 мВ) и сравнительно высокое входное сопротивление (не менее 1 кОм). Если же чувствительность, например, микрофонного усилителя будет хуже, то для согласования можно использовать микрофонный трансформатор.

Высокоомные катушечные динамические микрофоны, имеющие чувствительность до 10 мВ/Па при выходном сопротивлении около 47 кОм, обеспечивают формирование выходного напряжения величиной до нескольких десятков милливольт. Подключаемый к выходу таких микрофонов каскад должен иметь чувствительность не хуже 5 мВ и входное сопротивление не менее 100 кОм. Некоторые типы высокоомных катушечных динамических микрофонов имеют встроенный согласующий трансформатор, а соответствующий переключатель позволяет пользователю выбрать величину выходного сопротивления (низкоомный или высокоомный выход).

Необходимо отметить, что существуют катушечные динамические микрофоны, в которых можно выбрать и так называемое среднее значение выходного сопротивления (от 400 Ом до 5000 Ом). Чувствительность таких микрофонов обычно составляет от 3 мВ/Па до 5 мВ/Па при максимальном выходном напряжении до 50 мВ. Совместно со среднеомными динамическими микрофонами следует использовать микрофонный усилитель с чувствительностью не хуже 3 мВ и входным сопротивлением от 4 кОм до 25 кОм.

Ленточные электродинамические микрофоны, чувствительность которых составляет 0,1 мВ/Па, имеют выходное сопротивление около 200 Ом и обеспечивают формирование выходного напряжения величиной от нескольких милливольт до 10 мВ. Подключаемый к выходу таких микрофонов каскад должен иметь чувствительность не хуже 0,3 мВ и входное сопротивление не менее 1 кОм.

Широко применяемые в транзисторных микропередатчиках электретные конденсаторные микрофоны, имеющие чувствительность от 1 мВ/Па до 10 мВ/Па при выходном сопротивлении от 600 Ом до 3 кОм, обеспечивают формирование выходного напряжения величиной до 100 мВ. Поэтому следующий каскад должен иметь чувствительность от 0,5 мВ до 5 мВ при входном сопротивлении от 4,7 кОм до 15 кОм.

Особого внимания заслуживают схемотехнические решения, используемые при разработке цепей подключения электродинамического или электростатического микрофона к входному каскаду микрофонного усилителя.

Схемы подключения динамического микрофона не отличаются особой сложностью и в самом простом варианте выглядят так, как показано на рис. 1.1. Параллельно выводам динамического микрофона ВМ1 может быть подключен конденсатор С1 емкостью около 100 пФ, обеспечивающий подавление высокочастотных сигналов (рис. 1.1б).

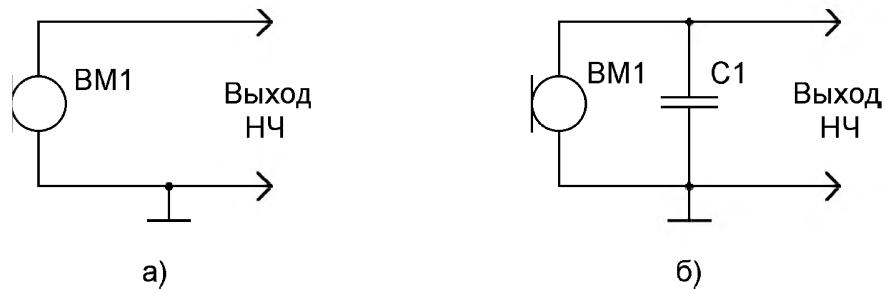


Рис. 1.1. Принципиальные схемы подключения  
электродинамического микрофона к входному каскаду  
микрофонного усилителя

Для согласования выходного сопротивления динамического микрофона с входным сопротивлением микрофонного усилителя в состав схемы иногда включается специальный согласующий резистор R1 так, как показано на рис. 1.2.

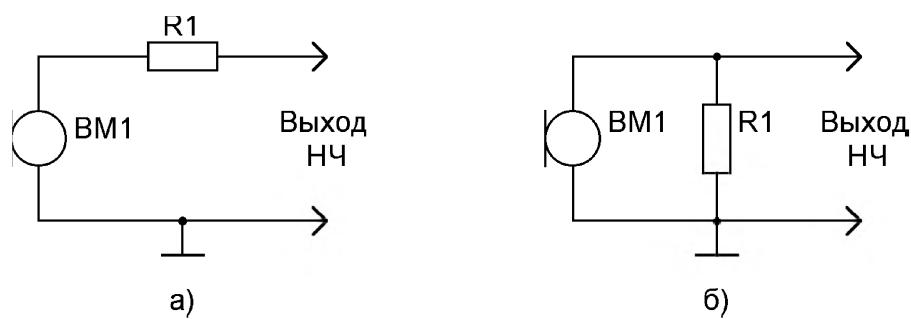


Рис. 1.2. Принципиальные схемы подключения  
электродинамического микрофона и согласующего резистора  
к входному каскаду микрофонного усилителя

Резистор R1 может включаться последовательно (рис. 1.2а) или параллельно (рис. 1.2б) микрофону ВМ1. Величина сопротивления этого резистора и вариант его включения выбираются в зависимо-

сти от параметров примененного динамического микрофона и входных характеристик микрофонного усилителя, и может составлять от десятков ом до десятков килоом. Необходимо отметить, что при параллельном включении резистор R1 препятствует возможному самовозбуждению микрофонного усилителя при отключении микрофона от входного каскада.

Одной из особенностей электростатических (конденсаторных) микрофонов является сравнительно большое выходное сопротивление, поэтому в их состав включается специальный согласующий каскад, который также обеспечивает и усиление сигнала. Питание этого каскада осуществляется от внешнего источника постоянного напряжения, поэтому схемы включения таких микрофонов имеют определенные особенности. В транзисторных микропередатчиках для подключения электростатического (конденсаторного) микрофона к входному каскаду микрофонного усилителя чаще всего используются схемотехнические решения, изображенные на рис. 1.3.

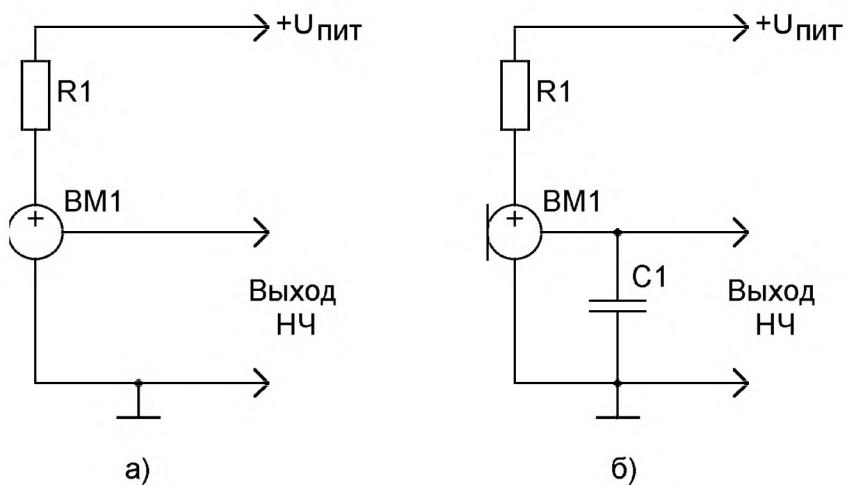


Рис. 1.3. Принципиальные схемы подключения электростатического (конденсаторного) микрофона к входному каскаду микрофонного усилителя

При использовании электретных микрофонов отечественного производства с тремя гибкими выводами (проводами) синий провод подключается к положительной шине цепи питания, красный провод – к шине корпуса («минус» цепи питания), а белый провод должен быть подключен к входу микрофонного усилителя.

Конструктивной особенностью многих типов электретных микрофонов является наличие не трех, а всего лишь двух выводов или контактных площадок. При использовании таких микрофонов схемы его подключения будут выглядеть так, как изображено на рис. 1.4.

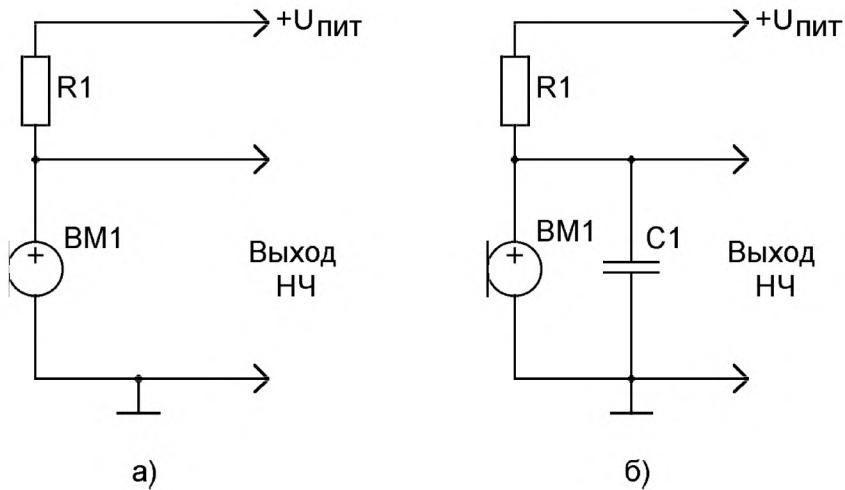


Рис. 1.4. Принципиальные схемы подключения электретного микрофона с двумя выводами к входному каскаду микрофонного усилителя

## Цепи формирования напряжения питания

В процессе разработки, создания и проведения экспериментов с электростатическими микрофонами, входящими в состав низкочастотного тракта микромощных радиопередающих устройств, особое внимание следует уделить цепям питания таких микрофонов. Питание транзисторных микропредатчиков чаще всего осуществляется постоянным напряжением, в качестве источника которого используются обычные батарейки напряжением от 1,5 В до 12 В. Поэтому в рассматриваемых схемах отсутствуют цепи стабилизации. В то же время напряжение питания непосредственно самого микрофона может быть значительно ниже. Например, у электретных микрофонов отечественного производства типа МКЭ-332 и МКЭ-333 напряжение питания может составлять от 1,5 В до 9 В, у импортного микрофона типа МСЕ100 – от 1,5 В до 10 В, а у микрофона типа SZN-15E эта характеристика находится в пределах от 3 В до 10 В. Поэтому напряжение питания на электростатический (конденсаторный) микрофон подается от цепи питания всего устройства через понижающий резистор R1. Величина сопротивления этого резистора зависит как от значения номинального напряжения питания самого конденсаторного (электретного) микрофона, так и от величины напряжения источника питания всей конструкции.

Номинальное напряжение питания большинства миниатюрных конденсаторных (электретных) микрофонов находится в пределах от 1,5 В до 3 В при потребляемом токе от 0,1 мА до 0,6 мА. Поэтому сопротивление резистора R1 может составлять от десятков ом до де-

сятков килоом. Особо необходимо отметить, что при повторении рассматриваемых далее конструкций и проведении экспериментов с ними не следует слепо руководствоваться номиналом этого резистора, указанным на принципиальной схеме. Величину сопротивления резистора R1 в каждом конкретном случае следует выбирать с учетом параметров имеющегося в распоряжении радиолюбителя микрофона.

В подавляющем большинстве моделей или типов электретных микрофонов питание подается на положительный контакт или вывод, обозначенный знаком +. При этом вывод шины корпуса соединяется с отрицательным контактом источника питания. Однако следует помнить о том, что существуют электретные микрофоны как отечественного, так и импортного производства, в которых питание подается на отрицательный контакт или вывод, а вывод шины корпуса соединяется с положительным контактом источника питания. Поэтому перед практическим использованием выбранного микрофона рекомендуется внимательно изучить особенности его питания по прилагаемому паспорту или по справочным материалам.

К сожалению, ограниченный объем предлагаемого издания не позволяет рассмотреть все конструктивные особенности, характеристики и схемы включения микрофонов, используемых при разработке миниатюрных радиопередающих устройств. Необходимую дополнительную информацию заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

**1**

Микрофоны

23

**2****МИКРОФОННЫЕ  
УСИЛИТЕЛИ****3**

Генераторы сигнала высокой частоты 23

**4**Модуляторы высокочастотного 65  
сигнала**5**Простые транзисторные  
радиопередающие устройства

В простейших малогабаритных радиопередающих устройствах, выполненных на транзисторах, формируемые на выходе микрофона низкочастотные колебания звуковой частоты обычно подаются непосредственно на модулятор. Однако в более сложных конструкциях в состав низкочастотного тракта включается дополнительный усилительный каскад. На его вход подается НЧ-сигнал, сформированный микрофоном, поэтому такие усилительные каскады часто называют микрофонными усилителями. К сожалению, подробное описание теоретических основ функционирования микрофонных усилителей, выходит за рамки предлагаемого издания в связи с его ограниченным объемом. Поэтому далее принципы работы таких устройств будут рассмотрены весьма упрощенно, не претендуя на академическую точность.

## **2.1. Назначение и основные характеристики микрофонного усилителя**

Главной задачей, решаемой микрофонными усилителями, применяемыми в миниатюрных радиопередатчиках, является обеспечение усиления низкочастотного сигнала, формируемого на выходе микрофона, до уровня, необходимого для корректной работы модулятора. Микрофонные усилители представляют собой одну из разновидностей усилителей сигналов низкой частоты, под которыми подразумеваются устройства, предназначенные для усиления электрических колебаний низкочастотного диапазона, то есть таких сигналов, частота которых находится в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

Требования, предъявляемые к микрофонным усилителям, зависят от сферы их применения. Поэтому микрофонные усилители, используемые, например, в высококачественной звукоспроизвольящей аппаратуре, имеют более качественные характеристики по сравнению с микрофонными усилителями, разрабатываемыми для малогабаритных радиопередающих устройств. Соответствующим образом отличаются и схемотехнические решения, применяемые при конструировании микрофонных усилителей.

Среди основных характеристик усилителей низкой частоты вообще и микрофонных усилителей в частности следует отметить коэффициент усиления, амплитудно-частотную характеристику и полосу пропускания. Именно эти характеристики оказывают определяю-

щие влияние на выбор необходимого схемотехнического решения для микрофонного усилителя.

Одним из важнейших показателей работы микрофонного усилителя является коэффициент усиления. При этом различают коэффициент усиления по напряжению, по току и по мощности. Коэффициент усиления по напряжению (по току или мощности) численно равен отношению напряжения (тока или мощности) на выходе усилителя к напряжению (току или мощности) на его входе. Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления входящих в его состав отдельных каскадов.

Коэффициент усиления является безразмерной величиной. Однако часто его значение представляется в логарифмических единицах – децибелах (дБ). Децибел представляет собой десятую долю бела (Б) и является десятичным логарифмом отношения напряжения (тока или мощности) сигнала на выходе усилителя к напряжению (току или мощности) на его входе. Поэтому при определении общего коэффициента усиления многокаскадного усилителя, коэффициенты усиления отдельных каскадов которого выражены в децибелах, числовые значения этих коэффициентов следует сложить.

Поступающие на вход микрофонного усилителя сигналы разных частот усиливаются с разным коэффициентом усиления, поэтому особое значение имеет амплитудно-частотная характеристика усилителя, которая представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала. Такая характеристика формируется посредством измерения напряжения на выходе усилителя при постоянной амплитуде и изменяемой частоте входного сигнала.

Анализ формы амплитудно-частотной характеристики микрофонного усилителя позволяет определить ширину полосы пропускания, под которой обычно понимается полоса частот, в пределах которой коэффициент усиления уменьшается до уровня 0,707 от своего максимального значения. Часто диапазон частот или полоса пропускания определяется как область частот, в пределах которой изменение коэффициента усиления не превышает допустимого значения, например, не более 30% (3 дБ). В малогабаритных радиопередающих устройствах для обеспечения внятности и разборчивости речевого сигнала микрофонный усилитель может иметь полосу пропускания всего от 300 Гц до 3500 Гц. Однако чаще предпочтение отдается схемотехническим решениям, с помощью которых можно получить полосу пропускания от 100 Гц до 5000 Гц.

Иногда для оценки качественных параметров микрофонного усилителя используется такая характеристика, как чувствительность. Под чувствительностью в данном случае понимается минимальный уровень сигнала, подаваемого на вход усилителя, при котором уровень сигнала на его выходе будет равен требуемому значению. В миниатюрных радиопередатчиках и радиомикрофонах уровень сигнала, формируемого на выходе микрофонного усилителя, должен быть таким, чтобы обеспечивалась корректная работа модулятора.

При выборе схемы микрофонного усилителя для малогабаритных радиопередающих устройств большое значение имеют и другие характеристики, например, нелинейные искажения. Однако их подробное рассмотрение выходит за рамки данной книги.

## **2.2. Усилительный каскад на транзисторе**

---

Основу простейших микрофонных усилителей, предназначенных для работы в миниатюрных радиопередатчиках и радиомикрофонах, составляют усилительные каскады, выполненные на биполярных или полевых транзисторах. Ограниченный объем данной книги не позволяет рассмотреть даже малую часть заслуживающих внимания конструкций таких усилителей, разработанных на основе самых разнообразных схемотехнических решений. Поэтому в данном разделе основное внимание уделяется так называемым классическим схемам усилительных каскадов, выполненных на одном транзисторе.

Необходимо отметить, что в рассматриваемых в данной книге малогабаритных радиопередающих устройствах усилительный каскад на транзисторе составляет основу и генератора высокочастотных колебаний. Поэтому приводимые в данном разделе описания принципов действия транзисторных усилителей необходимы для понимания основ функционирования ВЧ-генераторов, рассматриваемых в следующей главе.

### **Принцип действия**

В настоящее время в микрофонных усилителях в качестве усилительных каскадов низкочастотного сигнала широко используются обычные транзисторные усилители, в которых биполярный транзистор включен по схеме с общим эмиттером. Именно такие усили-

тельные каскады, по сравнению со схемами с общей базой и с общим коллектором, обеспечивают наибольшее усиление по мощности.

Упрощенная принципиальная схема усилительного каскада, выполненного на биполярном транзисторе п-р-п проводимости, включенном по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 2.1а.

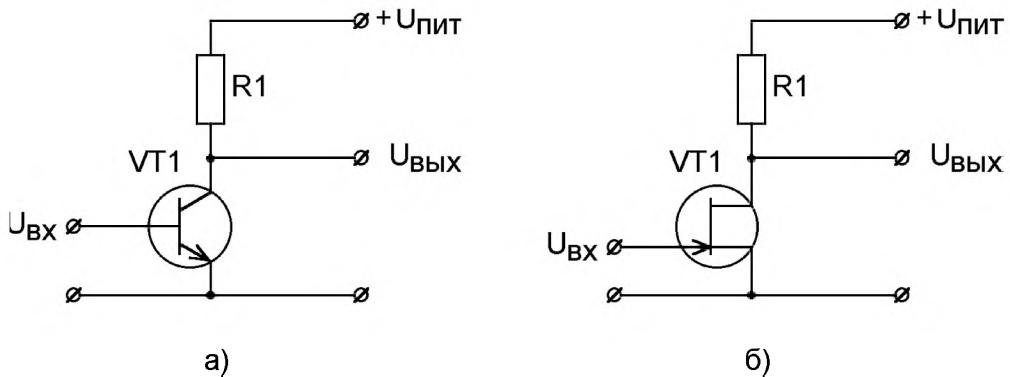


Рис. 2.1. Принципиальные схемы усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (а) и усилительного каскада на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим истоком (б)

В данной схеме коэффициент усиления по току представляет собой отношение амплитуд (действующих значений) выходного и входного переменного тока, то есть переменных составляющих тока коллектора и тока базы транзистора.

Главным параметром, характеризующим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, является статический коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока) для схемы с ОЭ, который обозначается как  $\beta$ . Этот параметр для того или иного типа биполярного транзистора при необходимости можно найти в любом справочнике.

В транзисторном усилительном каскаде, выполненном по схеме с общим эмиттером, между входным и выходным напряжениями имеется фазовый сдвиг, составляющий  $180^\circ$ . Наличие указанного фазового сдвига объясняется особенностями функционирования такого каскада. При поступлении на базу транзистора VT1 положительной полуволны входного сигнала происходит увеличение напряжения на переходе база-эмиттер. В результате возрастает ток эмиттера, и, соответственно, ток коллектора транзистора. Увеличение тока коллектора приводит к увеличению падения напряжения на резисторе R1, который является коллекторной нагрузкой. Ины-

ми словами, на нагрузочном резисторе дополнительно к уже имеющемуся постоянному напряжению добавляется переменное напряжение с той же полярностью. При этом напряжение на коллекторе транзистора VT1, соответственно, уменьшается. Таким образом, при подаче положительной полуволны переменного напряжения на вход транзисторного каскада по схеме с общим эмиттером на его выходе формируется отрицательная полуволна выходного напряжения.

Достоинством схемы с общим эмиттером, помимо наибольшего усиления по мощности, является удобство питания от одного источника, так как на базу и коллектор транзистора подаются питающие напряжения одного знака. К недостаткам данной схемы включения следует отнести сравнительно малое входное сопротивление транзистора, определяемое особенностями конструкции биполярных транзисторов. Помимо этого, схема с общим эмиттером имеет худшие, по сравнению, например, со схемой с общей базой, частотные и температурные характеристики. С повышением частоты усиление в схеме с общим эмиттером снижается в значительно большей степени, чем, в схеме с общей базой.

Усилительные каскады на биполярных транзисторах, включенных по схемам с общей базой и с общим коллектором, практически не применяются в микрофонных усилителях миниатюрных радиопередатчиков. Поэтому подробное рассмотрение особенностей функционирования таких каскадов выходит за рамки данной книги. Необходимую информацию заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе.

Тем не менее, схемы включения биполярного транзистора с общей базой и с общим коллектором широко используются в схемотехнических решениях активного элемента высокочастотных генераторов маломощных радиопередающих устройств, о которых будет рассказано в одной из следующих глав. Поэтому автор считает необходимым хотя бы весьма коротко отметить основные преимущества и недостатки таких схем включения.

Усилительный каскад, выполненный по схеме с общей базой, по сравнению со схемой с общим эмиттером, обеспечивает значительно меньшее усиление по мощности и имеет еще меньшее входное сопротивление. Однако его температурные и частотные свойства значительно лучше. Помимо этого в схеме с общей базой отсутствует фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами. Достоинством усилительного каскада по схеме с общей базой также является внесение значительно меньших искажений при усилении сигнала.

В усилительном каскаде, выполненном по схеме с общим коллектором, нагрузка включена в цепь эмиттера транзистора, а выходное напряжение снимается с эмиттера по отношению к шине корпуса. Именно поэтому такой каскад называют эмиттерным повторителем. Входное сопротивление каскада по схеме с общим коллектором в десятки раз выше, чем у каскада с общим эмиттером, а выходное сопротивление, наоборот, сравнительно мало. Помимо этого коэффициент усиления по току эмиттерного повторителя почти такой же, как и у каскада по схеме с общим эмиттером. Однако коэффициент усиления по напряжению близок к единице, причем всегда меньше ее. В схеме с общим коллектором отсутствует фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

Нередко в микрофонных усилителях миниатюрных радиопередатчиков применяются усилительные каскады на полевых транзисторах. Полевые транзисторы, в отличие от биполярных, имеют большое входное сопротивление, чем значительно облегчается решение задачи согласования каскадов. Обычно предпочтение отдается схемотехническим решениям, в которых полевой транзистор включен по схеме с общим истоком. Упрощенная принципиальная схема усилительного каскада, выполненного на полевом транзисторе с каналом n-типа, включенном по схеме с общим истоком, приведена на рис. 2.16.

Принцип работы усилительного каскада на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим истоком, заключается в следующем. С увеличением потенциала затвора ток в цепи стока и, соответственно, падение напряжения на резисторе  $R_1$  в цепи нагрузки возрастают. При этом напряжение между стоком и истоком уменьшается. В результате переменное напряжение между стоком и истоком оказывается сдвинутым по фазе на  $180^\circ$  относительно переменного напряжения между затвором и истоком.

Для оценки работы усилительного каскада на полевом транзисторе обычно используют такие характеристики, как коэффициент усиления по напряжению и выходное сопротивление каскада. Необходимо отметить, что значения входной, проходной и выходной емкостей полевого транзистора весьма малы и обычно не превышают нескольких пикофарад. Поэтому их влиянием на работу низкочастотного усилительного каскада можно пренебречь.

Принцип действия усилительного каскада, выполненного на биполярном транзисторе n-p-n проводимости, включенном по схеме с общим эмиттером, рассмотрим на примере простейшего микрофонного усилителя, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.2.

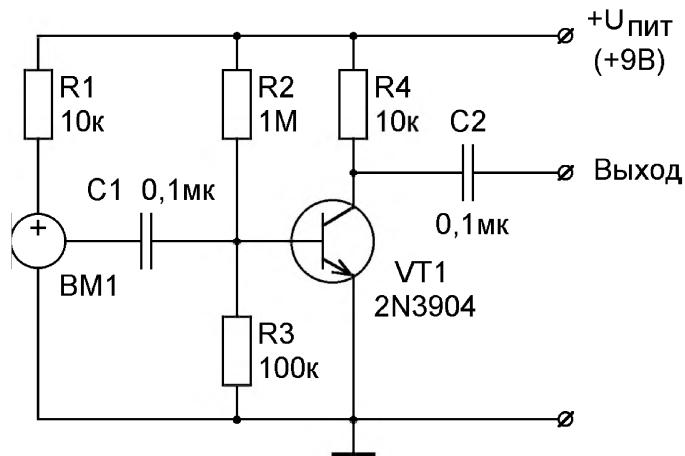


Рис. 2.2. Принципиальная схема простейшего микрофонного усилителя на п-р-п-транзисторе

В рассматриваемой схеме сигнал, сформированный на выходе микрофона BM1, через разделительный конденсатор C1 поступает на базу транзистора VT1, включенного по классической схеме с общим эмиттером. Конденсатор C1 обеспечивает развязку входной цепи усилителя и выходной цепи источника сигнала (микрофон BM1) по постоянному току. При отсутствии этого конденсатора сопротивление резистора R3 совместно с малым сопротивлением перехода база-эмиттер транзистора VT1 шунтирует выход источника сигнала. Помимо этого выходное сопротивление микрофона оказалось бы неприемлемое влияние на положение рабочей точки транзистора VT1, изменив режим его работы. Аналогичные функции выполняет разделительный конденсатор C2, обеспечивая развязку по постоянному току выходной цепи микрофонного усилителя и входных цепей подключаемых к его выходу каскадов. Через резистор R1 на соответствующий вывод электретного микрофона BM1 подается напряжение, необходимое для штатного функционирования микрофона.

При отсутствии входного сигнала на базе транзистора VT1, включенного по схеме с общим эмиттером, присутствует напряжение смещения, формируемое делителем R2, R3 из напряжения питания. Наличие напряжения смещения обеспечивает протекание тока между коллектором и эмиттером транзистора. Величина этого тока, который обычно называют коллекторным током, зависит от соотношения величин сопротивлений резисторов R2 и R3. Изменение этого соотношения приводит к смещению рабочей точки на характеристике транзистора VT1 и, соответственно, к изменению его режима работы.

При поступлении сигнала на базу транзистора VT1 происходит изменение тока базы, что вызывает соответствующее изменение величины коллекторного тока. В результате по аналогичному закону происходит изменение разности потенциалов на резисторе R4, выполняющем функцию нагрузочного резистора в цепи коллектора транзистора VT1. Как уже отмечалось, при возрастании напряжения на базе транзистора VT1 происходит падение напряжения на его коллекторе, и, наоборот, при падении напряжения на базе, напряжение на коллекторе увеличивается. Таким образом, выходное напряжение однокаскадного транзисторного усилителя будет находиться в противофазе входному напряжению.

## **Стабилизация положения рабочей точки транзистора**

Для того чтобы усилительный каскад работал в нормальном, штатном режиме, то есть без так называемого переусиления, на характеристике транзистора необходимо выбрать соответствующую рабочую точку, положение которой определяется величиной коллекторного тока при определенном коллекторном напряжении. Обычно в схемах усилительных каскадов с общим эмиттером напряжение на коллекторе транзистора выбирается равным половине напряжения источника питания, поскольку при таком соотношении обеспечивается достижение наибольшей амплитуды неискаженного выходного сигнала.

Величина напряжения, формируемого на коллекторе транзистора VT1 (рис. 2.2) при одном и том же коллекторном токе, зависит от величины сопротивления резистора R4, которая в различных схемах может находиться в пределах от 1 до 100 кОм. Малое сопротивление коллекторного резистора выбирается в том случае, когда транзистор VT1 должен работать в режиме с малым коллекторным током (в каскадах, которые должны обеспечивать низкий уровень собственных шумов). В результате амплитуда выходного тока, и соответственно, напряжения, будет малой при малом уровне шумов. Такие каскады обычно используются в качестве входных. При выборе резистора R4 с большим сопротивлением коэффициент усиления каскада увеличивается. Величина сопротивления резистора R4 в пределах нескольких килоом выбирается для усилителей напряжения, от которых требуется больший выходной ток при малом выходном сопротивлении.

При отсутствии входного сигнала ток базы, определяемый соотношением величин сопротивлений резисторов R2 и R3, инициирует протекание коллекторного тока, который часто называется током покоя. Под влиянием каких-либо внешних воздействий, например, при нагревании корпуса транзистора, ток покоя может измениться, несмотря на то, что напряжение на базе остается неизменным благодаря постоянным параметрам элементов делителя R2, R3. Увеличение коллекторного тока приводит к увеличению падения напряжения на резисторе R4, поэтому напряжение на коллекторе транзистора VT1 уменьшится. В результате уменьшится и напряжение между коллектором и эмиттером. Для большинства применяемых в звукоусилительной аппаратуре маломощных биполярных транзисторов падение напряжения коллектор-эмиттер на несколько десятых долей вольта приводит к переходу в режим насыщения, после чего транзистор перестает реагировать на изменения входного напряжения.

Избежать подобных неприятностей помогают специальные схемотехнические решения, обеспечивающие стабилизацию положения рабочей точки транзистора. Одно из них заключается в использовании цепи отрицательной обратной связи по току за счет подключения резистора в цепь эмиттера транзистора VT1. Принципиальная схема простейшего усилительного каскада со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи ООС по току приведена на рис. 2.3.

При увеличении коллекторного тока падение напряжения на резисторе R5 также увеличится, что при постоянном напряжении на

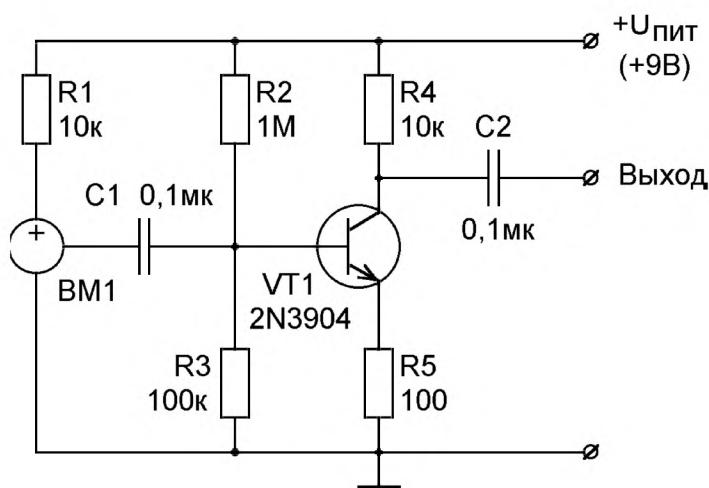


Рис. 2.3. Принципиальная схема микрофонного усилителя со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи ООС по току

базе транзистора VT1 приведет к уменьшению разности потенциалов между базой и эмиттером. Как следствие, изменится положение рабочей точки транзистора, поскольку уменьшится напряжение, обеспечивающее отпирание транзистора. Транзистор прикроется, а ток базы уменьшится, что приведет к соответствующему уменьшению коллекторного тока.

Как только ток коллектора уменьшится, температура транзистора понизится, а ток коллектора будет продолжать снижаться. При этом уменьшится и падение напряжения на резисторе R5 до первоначального значения. Таким образом происходит стабилизация рабочей точки транзистора VT1 с помощью включенного в цепь эмиттера резистора R5. Чем больше величина сопротивления резистора R5, тем стабильнее работает каскад при изменении температуры. Однако с увеличением этого сопротивления будет уменьшаться рабочее напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT1.

При поступлении на вход каскада переменного сигнала (в процессе работы в режиме усиления) через резистор в цепи эмиттера помимо постоянной составляющей проходит и переменная составляющая коллекторного тока. В результате на резисторе R5 будет формироваться переменное напряжение низкой частоты, которое также будет приложено к базе транзистора VT1, то есть через этот резистор замыкается петля отрицательной обратной связи по току. Поскольку фаза этого напряжения противоположна фазе входного напряжения усилителя, результатирующее напряжение на базе транзистора VT1 окажется уменьшенным, что приведет к понижению коэффициента усиления каскада. В то же время эта ООС обеспечивает снижение вносимых каскадом искажений, хотя и за счет снижения коэффициента усиления сигнала. Помимо этого указанная обратная связь увеличивает входное сопротивление каскада. Тем не менее, в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках для достижения максимальной амплитуды выходного сигнала резистор R5 из схемы микрофонного усилителя часто исключается.

Для того чтобы через резистор R5 проходила лишь постоянная составляющая коллекторного тока, параллельно этому резистору в цепи эмиттера транзистора VT1 включается электролитический конденсатор С3 сравнительно большой емкости. При этом его отрицательный вывод соединен с шиной корпуса, а положительный вывод подключен к эмиттеру транзистора VT1, на котором присутствует низкое положительное напряжение. Через этот конденсатор постоянный ток не проходит, поэтому на положение рабочей точки

транзистора VT1 конденсатор C3 не оказывает никакого влияния. Сопротивление этого конденсатора переменному току невелико, поэтому переменная составляющая коллекторного тока свободно проходит через конденсатор C3 на шину корпуса, не создавая на нем заметного напряжения низкой частоты. Принципиальная схема такого усилительного каскада, часто называемого классическим, приведена на рис. 2.4.

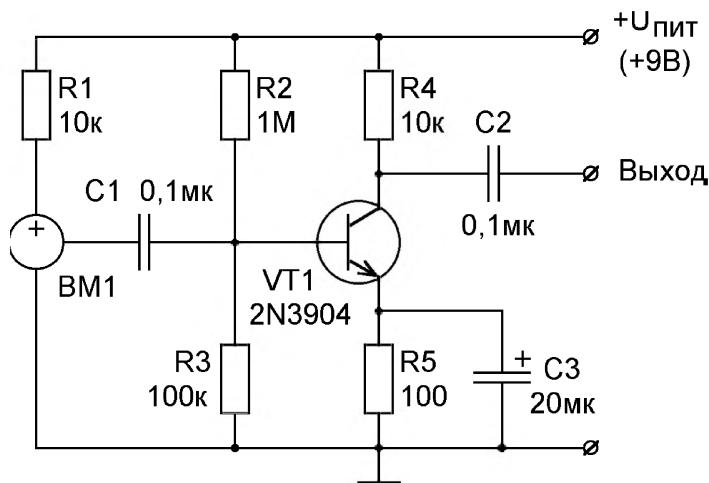


Рис. 2.4. Принципиальная схема классического усилительного каскада со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи ООС по току

При использовании в качестве источника низкочастотного сигнала электретного конденсаторного микрофона с двумя выводами принципиальная схема рассмотренного классического усилительного каскада будет выглядеть так, как показано на рис. 2.5.

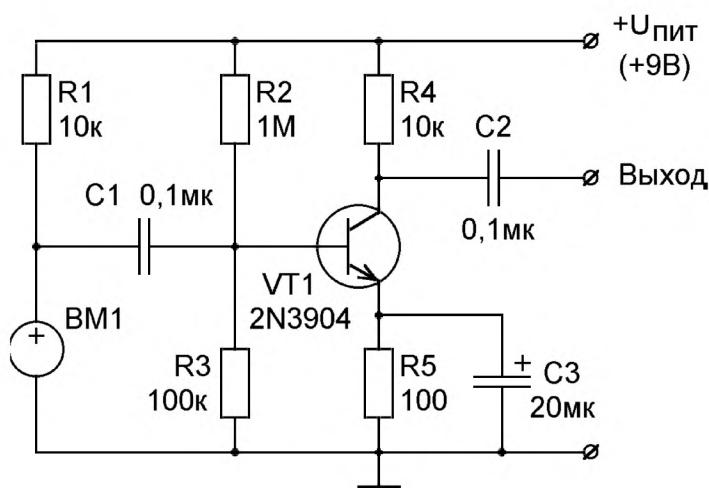


Рис. 2.5. Принципиальная схема классического усилительного каскада для электретного конденсаторного микрофона с двумя выводами

При использовании электродинамического (динамического) микрофона в качестве источника НЧ-сигнала принципиальная схема рассмотренного классического усилительного каскада будет выглядеть так, как показано на рис. 2.6.

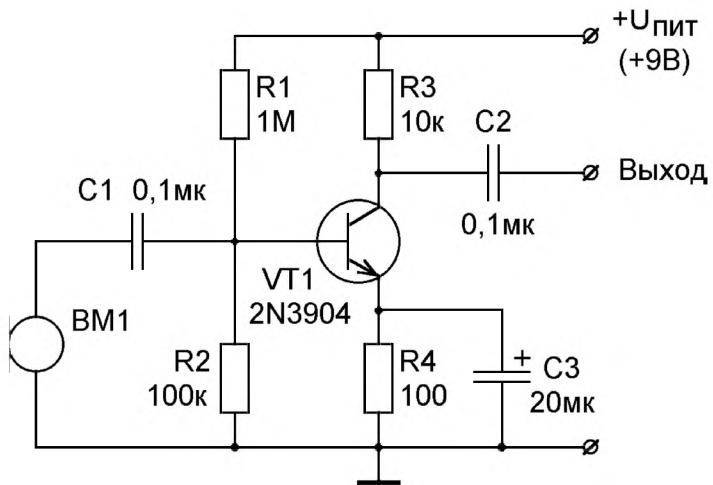


Рис. 2.6. Принципиальная схема классического усилительного каскада для динамического микрофона

Особого внимания заслуживает вопрос влияния на характеристики микрофонного усилителя величины напряжения питания. Сразу хотелось бы предупредить, что использование источников питания (батареек или сетевых адаптеров), выходное напряжение которых больше установленного для конкретного устройства напряжения питания категорически не допускается. Однако в радиолюбительской практике довольно часто возникает ситуация, когда под рукой нет необходимого источника. Поэтому при проведении экспериментов с транзисторными микрофонными усилителями в домашних условиях, если требуется значительно увеличить напряжение питания конструкции, предварительно следует уточнить по справочнику, соответствует ли величина напряжения коллектор-эмиттер используемого транзистора измененным условиям. Также следует проверить и рабочие напряжения электролитических конденсаторов. При необходимости эти элементы следует заменить.

Помимо этого любое изменение величины питающего напряжения приводит к изменению положения рабочей точки транзистора. Поэтому при изменении напряжения питания микрофонного усилителя следует соответствующим образом изменить и величину хотя бы одного из сопротивлений делителя R1, R2. Для резистора R1 действует правило, по которому его сопротивление при увеличе-

нии напряжения питания также следует увеличить, а при уменьшении – соответственно уменьшить. Для резистора R2 действует иное правило, по которому его сопротивление при увеличении напряжения питания следует уменьшить, а при уменьшении – увеличить.

Нередко в микрофонных усилителях в эмиттерной цепи транзистора VT1 вместо одного резистора используется цепочка, состоящая из двух включенных последовательно резисторов. Принципиальная схема такого усилителя, выполненного на n-p-n транзисторе, приведена на рис. 2.7. В данном случае в эмиттерной цепи транзистора VT1 последовательно включены резисторы R4 и R5. При этом положительный (верхний по схеме) вывод конденсатора C3 подключается к точке их соединения.

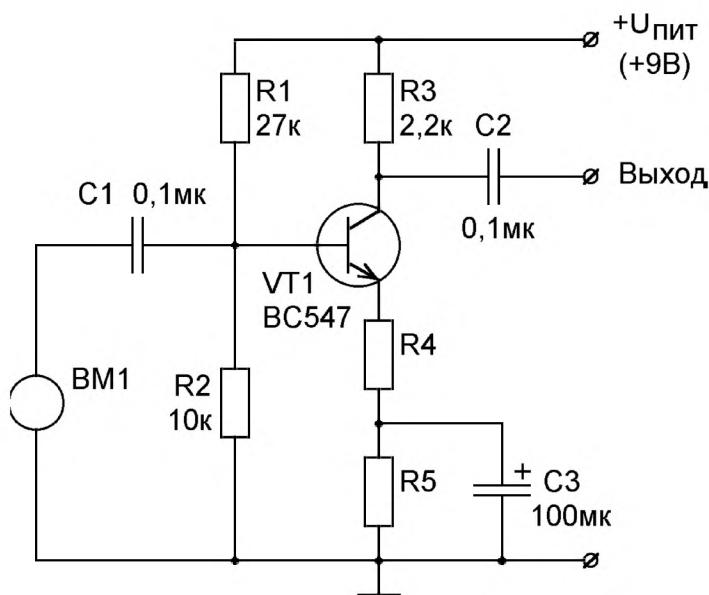


Рис. 2.7. Принципиальная схема микрофонного усилителя с разделившимся сопротивлением в цепи эмиттера транзистора

В рассматриваемой конструкции в работе схемы стабилизации рабочей точки транзистора VT1 участвуют оба резистора. В то же время по высокой частоте блокирован лишь резистор R5, а резистор R4 обеспечивает отрицательную обратную связь по току.

Коэффициент усиления данного микрофонного усилителя зависит от величин сопротивлений резисторов R4 и R5, его значение может изменяться от 3 до 100. Например, при  $R_4 = 1,5 \text{ Ом}$  и  $R_5 = 1,2 \text{ кОм}$  коэффициент усиления будет составлять 100 при входном сопротивлении  $R_{\text{вх}} = 3,5 \text{ кОм}$ . При увеличении сопротивления резистора R4 до 56 Ом коэффициент усиления рассматриваемого каскада будет равен 30, а входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  возрастет до 4 кОм. При

$R_4 = 220$  Ом и  $R_5 = 1$  кОм коэффициент усиления снизится до 10 при  $R_{\text{вх}} = 6$  кОм. Дальнейшее увеличение сопротивления резистора  $R_4$  до 680 Ом при уменьшении сопротивления резистора  $R_5$  до величины 470 Ом приведет к снижению коэффициента усиления данного каскада до 3, при этом входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  возрастет до 7 кОм. Значения выходного сопротивления данного усилителя при указанных значениях сопротивлений резисторов  $R_4$  и  $R_5$  неизменны и составляют 2 кОм.

Необходимо отметить, что данный усилительный каскад вполне надежно работает при снижении напряжения питания до 6 В.

В микрофонных усилителях миниатюрных радиопередающих устройств широко применяются и другие схемотехнические решения, обеспечивающие стабилизацию рабочей точки транзистора. Довольно часто используется усилительный каскад со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи отрицательной обратной связи по напряжению. При этом резистор ООС подключается между коллектором и базой транзистора VT1. Принципиальная схема микрофонного усилителя со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи ООС по напряжению приведена на рис. 2.8.

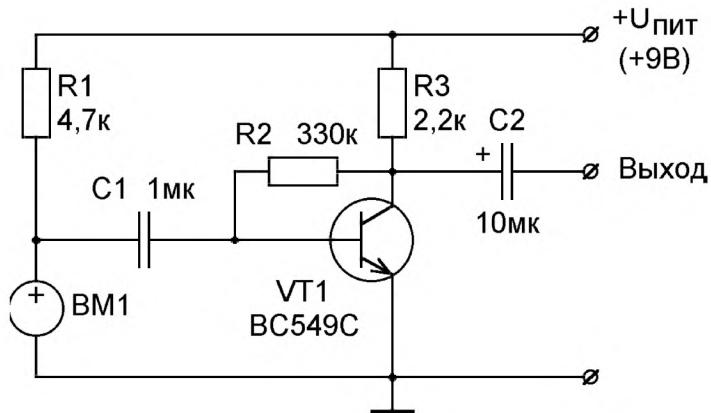


Рис. 2.8. Принципиальная схема микрофонного усилителя со стабилизацией рабочей точки транзистора с помощью цепи ООС по напряжению

Если по каким-либо причинам произойдет увеличение коллекторного тока транзистора VT1, то одновременно увеличится и падение напряжения на резисторе R3, что приведет к соответствующему уменьшению напряжения на коллекторе транзистора VT1. В результате уменьшится и напряжение, подаваемое на базу транзистора через резистор R2. Ток, протекающий через переход база-эмиттер, станет меньше, соответственно уменьшится и коллекторный

ток транзистора. Аналогичным образом, при уменьшении коллекторного тока транзистора VT1 одновременно уменьшится и падение напряжения на резисторе R3, что приведет к соответствующему увеличению напряжения на коллекторе транзистора. В результате увеличится напряжение, подаваемое на базу транзистора VT1 через резистор R2. Ток, протекающий через переход база-эмиттер, станет больше, соответственно увеличится и коллекторный ток транзистора.

Как и в рассмотренных ранее конструкциях для получения максимальной амплитуды неискаженного усиленного сигнала на выходе микрофонного усилителя необходимо, чтобы напряжение на коллекторе транзистора VT1 составляло примерно половину от величины напряжения питания каскада. Соотношение коллекторного и базового токов выражает коэффициент усиления транзистора по току. Значение тока базы транзистора VT1 определяется величиной сопротивления резистора R2. Таким образом, падение напряжения на резисторе R2 также должно быть равно половине величины напряжения питания каскада за вычетом напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1.

При сравнительно больших напряжениях питания (от 3 В до 12 В и выше) падением напряжения на переходе база-эмиттер транзистора можно пренебречь. В этом случае величина сопротивления резистора R2 может быть рассчитана как произведение величины сопротивления резистора R3 и коэффициента усиления транзистора VT1 по току. На практике рекомендуется выбирать величину сопротивления резистора R2 немного меньше расчетной. При напряжении питания усилителя в пределах от 1 В до 3 В пренебрегать падением напряжения на переходе база-эмиттер не следует, потому сопротивление резистора R2 необходимо уменьшить.

В микрофонных усилителях, эксплуатироваться которые предполагается в экстремальных условиях, например, при значительных колебаниях температуры окружающей среды или существенных колебаниях напряжения питания, нередко применяется схема стабилизации рабочей точки транзистора, изображенная на рис. 2.9.

## ***Микрофонный усилитель на полевом транзисторе***

В микрофонных усилителях миниатюрных радиопередающих устройств широко применяются и полевые транзисторы. При этом резистивные усилители на полевых транзисторах обеспечивают согла-

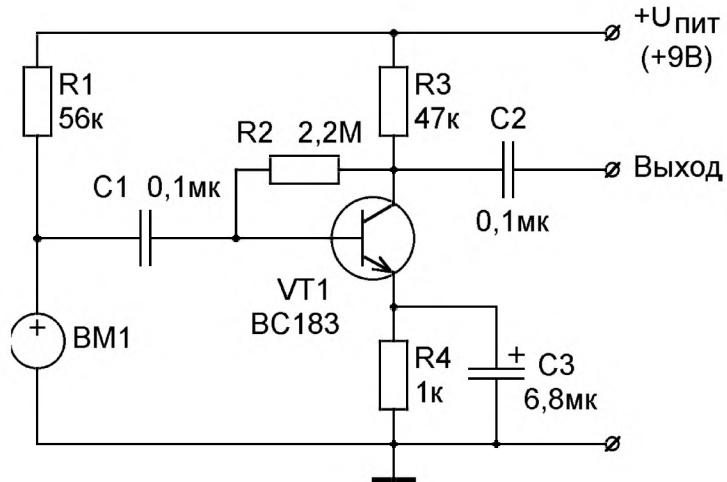


Рис. 2.9. Принципиальная схема микрофонного усилителя с усовершенствованной схемой стабилизации рабочей точки транзистора

сование источников сигнала, имеющих большое внутреннее сопротивление, с входом каскадов, обладающих относительно небольшим значением входного сопротивления. Каскады усиления на полевых транзисторах чаще всего выполняют по схеме с общим истоком.

Принципиальная схема предназначенного для работы с электретным микрофоном простейшего микрофонного усилителя, выполненного всего на одном полевом транзисторе, приведена на рис. 2.10. Усиление данной конструкции составляет не менее 20 дБ.

В рассматриваемой схеме сформированный микрофоном BM1 сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на вход усиленческого каскада, выполненного на полевом транзисторе VT1, который включен по схеме с общим истоком.

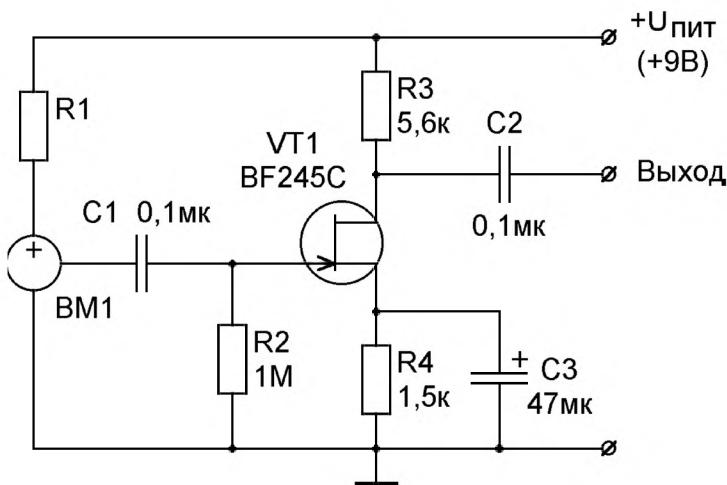


Рис. 2.10. Принципиальная схема микрофонного усилителя на полевом транзисторе

Если на затвор транзистора VT1 подать переменное напряжение малой величины, то при отрицательной полуволне этого напряжения ток, протекающий через транзистор, будет уменьшаться, а при положительной полуволне – увеличиваться по соответствующему закону. В результате аналогичным образом будет изменяться и напряжение на резисторе R3. Форма этого переменного напряжения повторяет форму входного сигнала, однако величина напряжения на стоке транзистора VT1 будет значительно больше, чем величина сигнала на его затворе.

Для формирования напряжения смещения, подаваемого на затвор транзистора VT1, в данном случае используется так называемая схема с автоматическим истоковым смещением. Напряжение автоматического смещения формируется при протекании тока стока транзистора VT1 через резистор R4. Это напряжение подводится к затвору транзистора через резистор утечки R2, который также обеспечивает сток зарядов, накапливающихся на затворе. Режим работы данного усилительного каскада определяется величиной сопротивления резистора R4.

При отсутствии входного сигнала через транзистор VT1 протекает ток стока, называемый током покоя. Этот ток обеспечивает формирование на резисторе R4 определенной разности потенциалов, то есть на верхнем по схеме выводе этого резистора будет положительное напряжение небольшой величины. Между затвором и шиной корпуса, имеющей нулевой потенциал, включен резистор R2, общее сопротивление которого несоизмеримо больше сопротивления резистора R4. В результате на затворе транзистора VT1 формируется потенциал, который по сравнению с малым положительным потенциалом истока будет более отрицательным. Это небольшое отрицательное напряжение на затворе обеспечивает частичное закрытие транзистора, при этом устанавливается меньшая величина тока стока. Таким образом, величина тока покоя транзистора VT1 зависит от сопротивления резистора, включенного в его цепь истока, то есть в данном случае от сопротивления резистора R4. Чем больше величина сопротивления резистора R4, тем большее отрицательное напряжение смещения подается на затвор транзистора VT1. Поэтому изменением сопротивления резистора R4 подбирается такое напряжение смещения, при котором обеспечивается работа транзистора на линейном участке характеристики.

Для того чтобы через резистор R4 проходила лишь постоянная составляющая коллекторного тока, параллельно этому резистору

в цепи эмиттера транзистора VT1 включен электролитический конденсатор С3. Через этот конденсатор постоянный ток не проходит, поэтому на положение рабочей точки транзистора конденсатор С3 не оказывает никакого влияния. Сопротивление данного конденсатора переменному току невелико, поэтому переменная составляющая тока истока свободно проходит через конденсатор С3 на шину корпуса.

Снимаемый с резистора R3 усиленный сигнал через разделительный конденсатор С2 подается на выход микрофонного усилителя.

Необходимо отметить, что при сборке данного усилителя следует соблюдать общепринятые меры предосторожности, обеспечивающие защиту полевых транзисторов от выхода из строя вследствие воздействия статического электричества. В процессе пайки следует пользоваться паяльником с заземленным жалом, газовым паяльником или же специальной паяльной станцией. Не следует забывать и об антistатическом браслете.

## **2.3. Двухкаскадные микрофонные усилители**

---

Рассмотренные схемы микрофонных усилителей представляют собой однокаскадные конструкции. Однако при разработке малогабаритных транзисторных радиопередатчиков широко используются схемотехнические решения, основанные на применении многокаскадных, чаще всего двухкаскадных, схем. В двухкаскадных микрофонных усилителях оба каскада обычно используются для усиления сигнала. В то же время нередко встречаются схемотехнические решения, в которых один из каскадов работает в режиме усиления, а второй используется в качестве согласующего каскада.

### **Усилители с непосредственной связью**

В миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах нередко возникает необходимость получения большого значения коэффициента усиления низкочастотного сигнала, для чего требуется использовать два и более каскадов усиления. В этом случае применение многокаскадных микрофонных усилителей с емкостной связью, каждый из каскадов которых выполнен на основе рассмотренных схем, не всегда приводит к удовлетворительным результатам.

Поэтому в миниатюрных радиопередающих устройствах широкое распространение получили схемотехнические решения микрофонных усилителей с непосредственной связью между каскадами.

Такие усилители содержат меньше деталей, имеют меньшую энергоемкость, легко настраиваются и менее критичны к изменениям величины напряжения питания. Помимо этого усилители с непосредственной связью между каскадами имеют более равномерную полосу пропускания, а нелинейные искажения в них могут быть сведены к минимуму. Одним из главных достоинств таких усилителей является сравнительно высокая температурная стабильность.

Однако высокая температурная стабильность, как и остальные перечисленные выше преимущества усилителей с непосредственной связью между каскадами, могут быть реализованы лишь при использовании глубокой отрицательной обратной связи по постоянному току, подаваемой с выхода на первый каскад усилителя. При применении соответствующего схемотехнического решения любые изменения тока, вызванные как температурными колебаниями, так и другими причинами, усиливаются последующими каскадами и по даются на вход усилителя в такой полярности. В результате усилитель возвращается в исходное состояние.

Принципиальная схема одного из вариантов двухкаскадного микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами приведена на рис. 2.11. При напряжении питания от 9 до 12 В и максимальном входном напряжении 25 мВ уровень выходного напря-

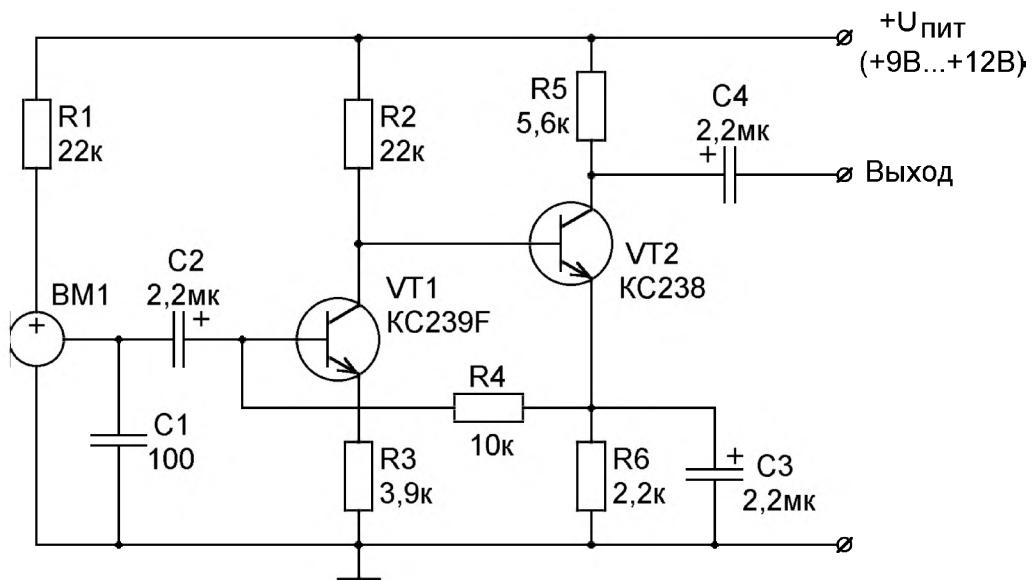


Рис. 2.11. Принципиальная схема микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами (вариант 1)

жения в частотном диапазоне от 10 Гц до 40 кГц может достигать 5 В. При этом потребляемый ток не превышает 2 мА.

Низкочастотный сигнал, сформированный микрофоном ВМ1, через разделительный конденсатор С2 поступает на вход первого усилительного каскада, выполненного на транзисторе VT1. Конденсатор С1 обеспечивает фильтрацию нежелательных высокочастотных составляющих входного сигнала. Через резистор R1 на электретный микрофон ВМ1 подается напряжение питания.

Усиленный сигнал с коллекторной нагрузки транзистора VT1 (резистор R2) подается непосредственно на базу транзистора VT2, на котором выполнен второй усилительный каскад. С коллекторной нагрузки этого транзистора сигнал поступает на выход усилителя через разделительный конденсатор С4.

Необходимо отметить, что резистор R2, используемый в качестве нагрузочного резистора в цепи коллектора транзистора VT1, имеет сравнительно большое сопротивление. В результате напряжение на коллекторе транзистора VT1 будет достаточно малым, что позволяет подключить базу транзистора VT2 непосредственно к коллектору транзистора VT1. Немалое значение в выборе режима работы транзистора VT2 играет и величина сопротивления резистора R6.

Между эмиттером транзистора VT2 и базой транзистора VT1 включен резистор R4, обеспечивающий возникновение между каскадами отрицательной обратной связи по постоянному току. В результате напряжение на базе транзистора VT1 формируется с помощью резистора R4 из напряжения, присутствующего на эмиттере транзистора VT2, которое в свою очередь формируется при прохождении коллекторного тока этого транзистора через резистор R6. По переменному току резистор R6 шунтируется конденсатором С3.

Если по какой-либо причине ток, проходящий через транзистор VT2, увеличится, то соответственно увеличится и напряжение на резисторах R5 и R6. В результате, благодаря резистору R4, увеличится напряжение на базе транзистора VT1, что приведет к увеличению его коллекторного тока и соответствующему увеличению падения напряжения на резисторе R2, а это вызовет уменьшение напряжения на коллекторе транзистора VT1, к которому непосредственно подключена база транзистора VT2. Уменьшение значения напряжения на базе транзистора VT2 приведет к уменьшению коллекторного тока этого транзистора и соответствующему уменьшению напряжения на резисторах R5 и R6. При этом уменьшится напряжение на базе транзистора VT1, этот транзистор прикроется и вновь будет работать в нор-

мальном, первоначально установленном режиме. Таким образом, токи и рабочие точки транзисторов VT1 и VT2 будут стабилизированы. Аналогичным образом схема стабилизации функционирует и при возможном уменьшении коллекторного тока транзистора VT2, например, при уменьшении температуры окружающей среды.

У усилителей с непосредственной связью между каскадами для установки режима обычно бывает достаточно подобрать величину сопротивления лишь одного резистора. В рассмотренной схеме режим работы устанавливается подбором сопротивления резистора R6 или резистора R2.

В связи с тем, что резистор R3 не зашунтирован конденсатором, в данном усилителе возникает обратная связь по переменному току, обеспечивающая резкое уменьшение искажений.

Необходимо отметить, что при любом изменении номинала резистора R4 или величины питающего напряжения усилителя необходимо откорректировать и положение рабочей точки. Важную роль в этом процессе играет резистор R6, вместо которого в процессе наложения конструкции обычно устанавливается подстроечный резистор, обеспечивающий правильный выбор рабочей точки транзисторов VT1 и VT2.

Принципиальная схема еще одного варианта двухкаскадного микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами приведена на рис. 2.12. Отличительной особенностью данного

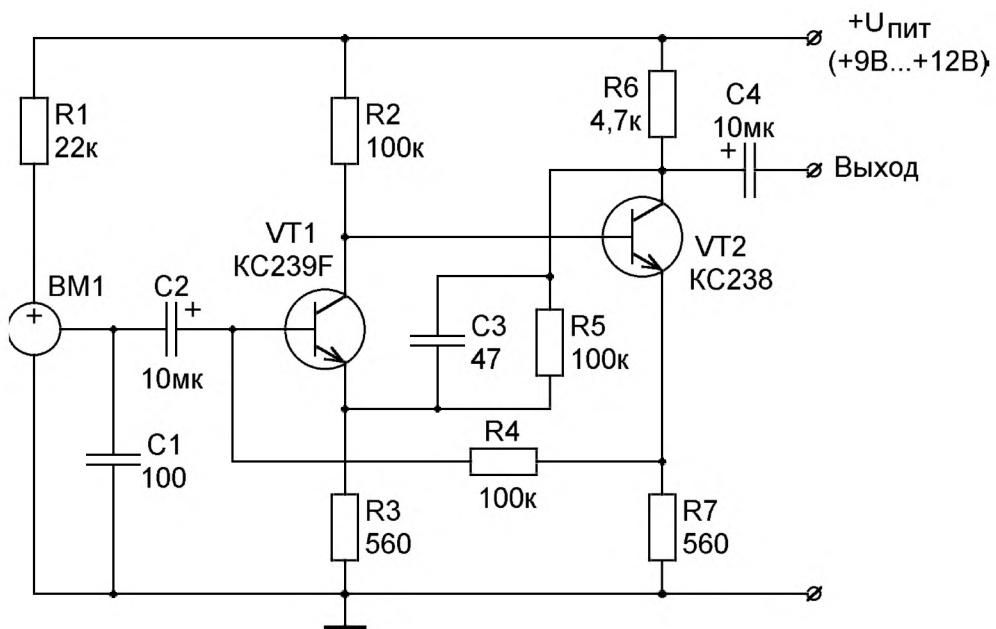


Рис. 2.12. Принципиальная схема микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами (вариант 2)

схемотехнического решения, по сравнению с предыдущим, является то, что для стабилизации режима работы в предлагаемой схеме используются две цепи обратной связи с выхода на вход.

Нетрудно заметить, что помимо передачи напряжения, снимаемого с эмиттера транзистора VT2, на базу транзистора VT1 через резистор R4, в данной конструкции также обеспечивается изменение напряжения эмиттера транзистора первого каскада в зависимости от величины тока, проходящего через коллекторную нагрузку транзистора VT2 (резистор R6). Вторая цепь обратной связи, подключенная между коллектором транзистора VT2 и эмиттером транзистора VT1, образована включенными параллельно резистором R5 и конденсатором C3. Необходимо отметить, что от величины емкости конденсатора C3 зависит значение верхней граничной частоты полосы пропускания данного микрофонного усилителя.

При напряжении питания от 9 до 15 В и максимальном входном напряжении 25 мВ уровень выходного напряжения рассмотренного двухкаскадного усилителя в частотном диапазоне от 20 Гц до 20 кГц может достигать 2,5 В. При этом потребляемый ток не превышает 2 мА.

Принципиальная схема еще одного варианта микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами приведена на рис. 2.13.

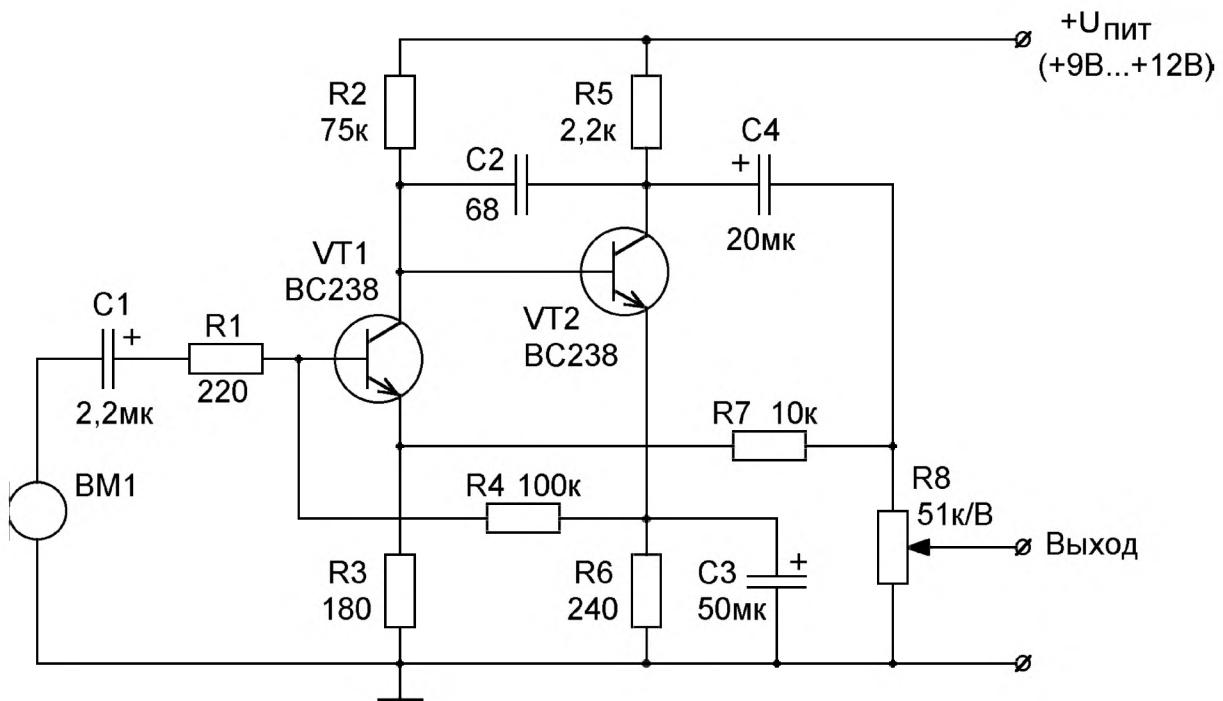


Рис. 2.13. Принципиальная схема микрофонного усилителя с непосредственной связью между каскадами (вариант 3)

В данной конструкции сигнал, сформированный микрофоном ВМ1, через разделительный конденсатор С1 и резистор R2 проходит на базу транзистора VT1, на котором собран первый каскад усиления. Усиленный сигнал с коллектора транзистора VT1 подается непосредственно на базу транзистора VT2 второго усилительного каскада.

Между эмиттером транзистора VT2 и базой транзистора VT1 включен резистор R4, обеспечивающий возникновение между каскадами отрицательной обратной связи по постоянному току. В результате напряжение на базе транзистора VT1 формируется с помощью резистора R4 из напряжения на эмиттере транзистора VT2, которое в свою очередь формируется при прохождении коллекторного тока этого транзистора через резистор R6. По переменному току резистор R6 шунтирован конденсатором С3.

Сформированный на коллекторе транзистора VT2 сигнал через разделительный конденсатор С4 и потенциометр R8 подается на выход микрофонного усилителя. Для уменьшения частотных искажений в области низких частот емкость разделительного конденсатора С4 увеличена до 20 мкФ. Потенциометр R8 выполняет функцию регулятора уровня выходного НЧ-сигнала и имеет логарифмическую характеристику (тип В).

В обычных усилительных каскадах, в которых транзистор включен по схеме с общим эмиттером, коэффициент усиления каскада определяется в первую очередь особенностями самого транзистора. В данной схеме коэффициент усиления в значительной степени зависит от параметров второй цепи обратной связи, включенной между выходом усилителя и эмиттером транзистора VT1. В рассматриваемой схеме эта цепь обратной связи образована резистором R7. Теоретически коэффициент усиления  $K_{yc}$  двухступенчатого усилительного каскада с непосредственной связью определяется соотношением величин сопротивлений резисторов R7 и R3, то есть вычисляется по формуле:

$$K_{yc} = R7/R3.$$

Для рассматриваемого каскада коэффициент  $K_{yc} = 10000/180 = 55,55$ . Приведенная формула справедлива для значений коэффициента усиления, находящихся в пределах от 10 до 100. При иных соотношениях вступают в силу дополнительные факторы, влияющие на величину коэффициента усиления. Особые методики расчета следует применять в тех случаях, когда в цепь обратной связи включаются последовательные или параллельные RC-цепочки.

Рассматривая классические схемы микрофонных усилителей на биполярных транзисторах, нельзя не упомянуть о двухкаскадном усилителе, выполненном на двух биполярных транзисторах разной проводимости. Принципиальная схема простого микрофонного усилителя, выполненного на n-p-n и p-n-p транзисторах, приведена на рис. 2.14.

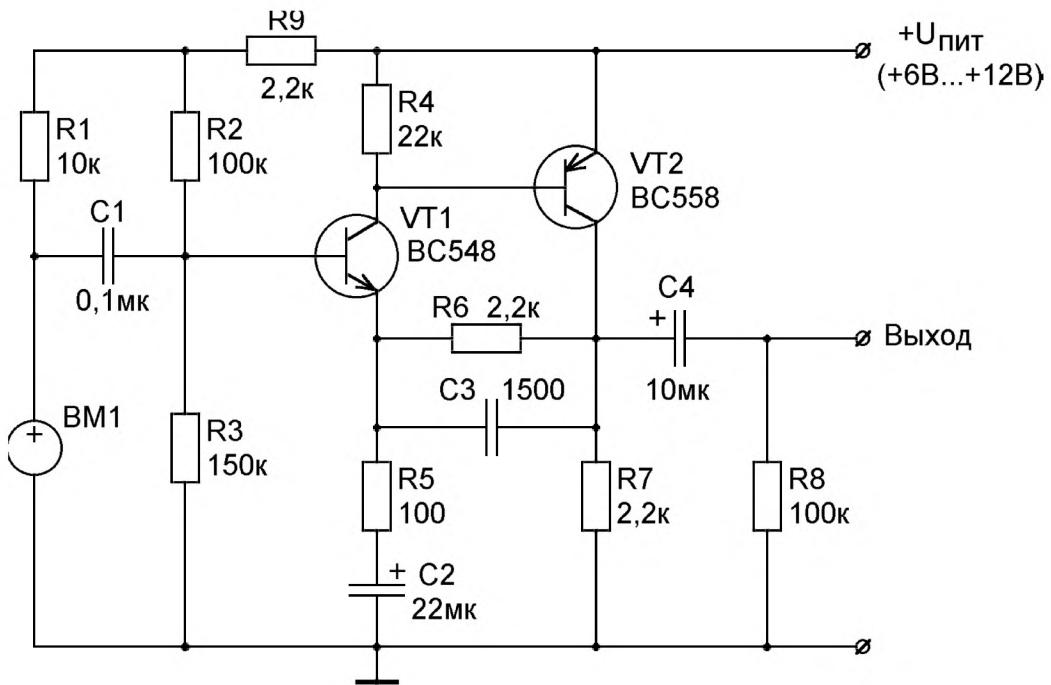


Рис. 2.14. Принципиальная схема микрофонного усилителя на биполярных транзисторах разной проводимости

Несмотря на простоту, данный усилитель, который можно использовать для усиления сигналов, снимаемых с выхода конденсаторного микрофона, имеет весьма приемлемые параметры. При напряжении питания от 6 до 12 В и максимальном входном напряжении 100 мВ уровень выходного напряжения в частотном диапазоне от 70 Гц до 45 кГц достигает 2,5 В.

Сформированный на выходе микрофона BM1 сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на базу транзистора VT1, имеющего n-p-n проводимость, на котором выполнен первый усилительный каскад. Напряжение смещения, подаваемое на базу транзистора VT1, формируется делителем, который образован резисторами R2 и R3.

Величина спада частотной характеристики данного микрофонного усилителя в области низких частот в значительной степени зависит от емкости разделительного конденсатора C1. Чем меньше ем-

кость этого конденсатора, тем больше спад частотной характеристики. Поэтому при указанном на схеме номинале емкости конденсатора С1 нижняя граница диапазона воспроизводимых усилителем частот находится на частоте около 70 Гц.

С коллектора транзистора VT1 усиленный сигнал подается непосредственно на базу транзистора VT2, имеющего р-п-р проводимость, на котором выполнен второй усилительный каскад. В данном усилителе, как и в рассмотренных ранее конструкциях, используется схема с непосредственной связью между каскадами. В качестве нагрузочного резистора в цепи коллектора транзистора VT1 используется резистор R4, имеющий большое сопротивление. В результате напряжение на коллекторе транзистора VT1 будет сравнительно малым, что позволяет базу транзистора VT2 подключить непосредственно к коллектору транзистора VT1. Немалое значение в выборе режима работы транзистора VT2 играет и величина сопротивления резистора R7.

Сформированный на коллекторе транзистора VT2 сигнал через разделительный конденсатор С4 подается на выход микрофонного усилителя. Для уменьшения частотных искажений в области нижних частот емкость разделительного конденсатора С4 увеличена до 10 мкФ. Величина спада в области верхних частот воспроизводимого усилителем диапазона может быть обеспечена уменьшением сопротивления нагрузки, а также использованием транзисторов с более высоким значением предельной частоты.

Коэффициент усиления данного усилителя определяется соотношением сопротивлений резисторов R5 и R6 в цепи обратной связи. Конденсатор С3 ограничивает усиление на высших частотах, препятствуя самовозбуждению усилителя.

При применении конденсаторного микрофона в цепь его включения потребуется подавать напряжение, необходимое для его питания. С этой целью в схеме установлен резистор R1, который одновременно является нагрузочным резистором выхода микрофона. При использовании рассматриваемого микрофонного усилителя с электродинамическим микрофоном резистор R1 из схемы можно исключить.

Особого внимания заслуживают схемотехнические решения двухкаскадных микрофонных усилителей, в которых входной каскад выполнен на полевом, а выходной каскад – на биполярном транзисторе. Принципиальная схема одного из вариантов простого микрофонного усилителя, выполненного на полевом и биполярном транзисторах,

приведена на рис. 2.15. Данная конструкция характеризуется не только низким уровнем шумов и сравнительно высоким входным сопротивлением, но и значительной шириной диапазона частот усиливаемого сигнала. При напряжении питания от 9 до 12 В и максимальном входном напряжении 25 мВ уровень выходного напряжения в частотном диапазоне от 10 Гц до 100 кГц может достигать 2,5 В. При этом потребляемый ток не превышает 1 мА, а входное сопротивление составляет 1 МОм.

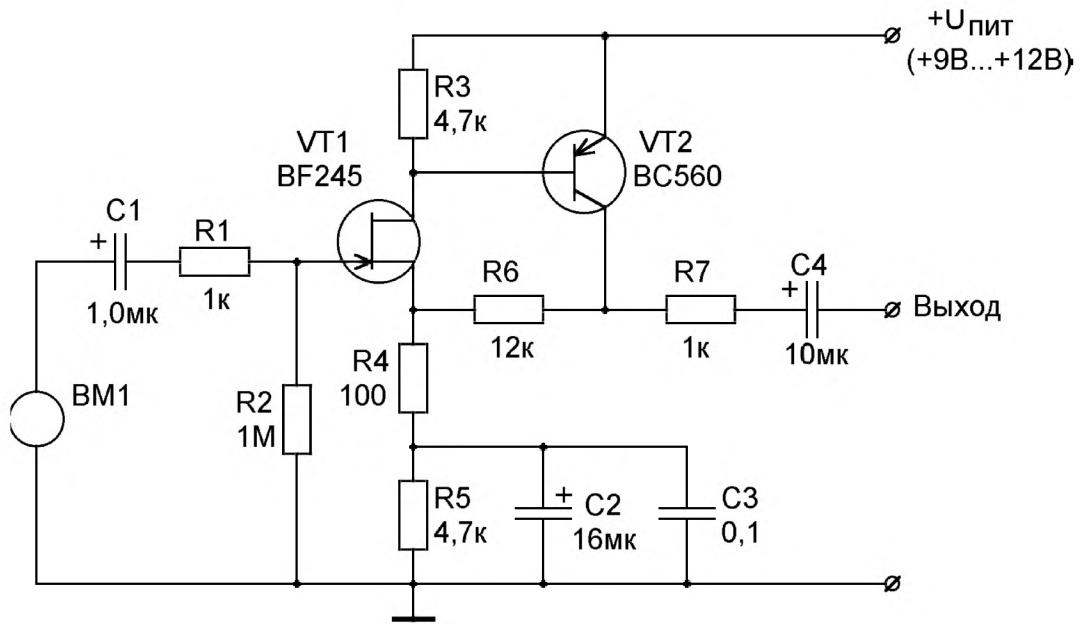


Рис. 2.15. Принципиальная схема микрофонного усилителя на полевом и биполярном транзисторах разной проводимости

Снимаемый с выхода микрофона BM1 сигнал через разделительный конденсатор C1 и резистор R1 подается на затвор полевого транзистора VT1, на котором выполнен входной усилительный каскад. Резистор R2, величина сопротивления которого определяет значение входного сопротивления всей конструкции, обеспечивает по постоянному току связь затвора транзистора VT1 сшиной корпуса. По постоянному току положение рабочей точки транзистора VT1 определяется величинами сопротивлений резисторов R3, R4 и R5. По переменному току резистор R5 шунтирован конденсаторами C2 и C3. Сравнительно большая емкость конденсатора C2 обеспечивает достаточное усиление в нижней части диапазона частот усиливаемого сигнала. В свою очередь, величина емкости конденсатора C3 обеспечивает достаточное усиление в верхней части диапазона частот.

Усиленный сигнал снимается с нагрузочного резистора R3 и подается непосредственно на базу транзистора VT2, имеющего р-п-р-проводимость, на котором выполнен второй каскад усиления. Резистор R6, включенный в коллекторную цепь транзистора VT2, не только является нагрузочным резистором во втором усилительном каскаде, но и входит в состав цепи обратной связи транзистора VT1. Соотношением величин резисторов R6 и R4 определяется коэффициент усиления всей конструкции. При необходимости усиление можно уменьшить, подобрав величину сопротивления резистора R4. Сформированный на коллекторе транзистора VT2 сигнал через резистор R7 и разделительный конденсатор C4 подается на выход микрофонного усилителя.

## **Микрофонные усилители с согласующим каскадом**

В миниатюрных радиопередатчиках для согласования выходного сопротивления микрофонного усилителя с входным сопротивлением последующих каскадов нередко на выходе усилительного каскада устанавливается буферный каскад, например, хорошо известный эмиттерный повторитель.

Принципиальная схема одного из вариантов микрофонного усилителя с буферным каскадом на выходе приведена на рис. 2.16. Среди основных характеристик данной конструкции следует отметить коэффициент усиления НЧ-сигнала, равный 22, а также диапазон частот, находящийся в пределах от 100 Гц до 5000 Гц. Питание

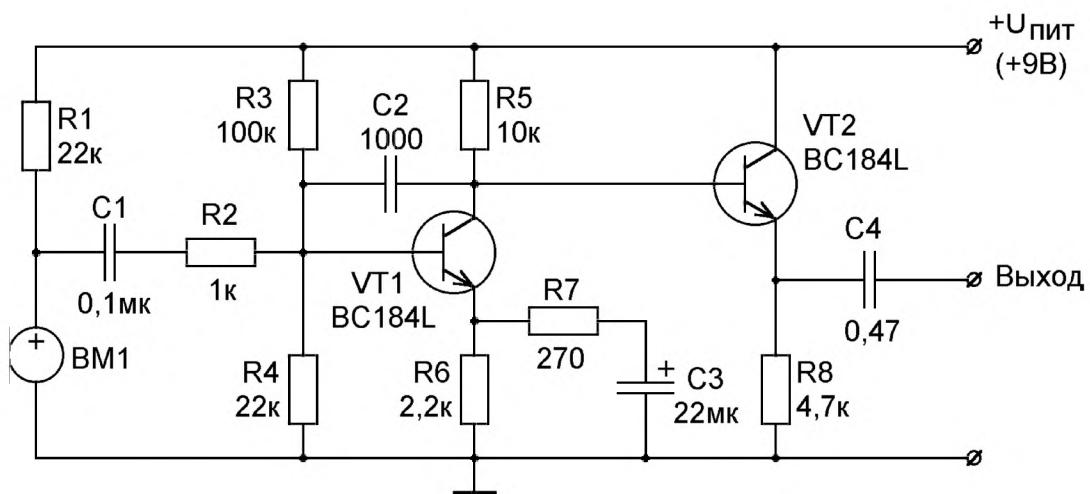


Рис. 2.16. Принципиальная схема микрофонного усилителя  
с буферным каскадом (вариант 1)

усилителя осуществляется постоянным напряжением +9 В, потребляемый ток не превышает 2 мА.

Сформированный на выходе микрофона ВМ1 низкочастотный сигнал через конденсатор С1 и резистор R2 проходит на базу транзистора VT1, на котором выполнен непосредственно усилительный каскад. Стабилизация рабочей точки этого транзистора осуществляется с помощью цепи отрицательной обратной связи по току. Особенностью данного каскада является еще одна цепь обратной связи, в состав которой входит конденсатор С2, включенный между коллектором и базой транзистора VT1. От величин емкостей этого конденсатора и конденсатора С3 зависят верхняя и нижняя границы диапазона частот усиливаемого сигнала.

Сигнал, снимаемый с коллекторной нагрузки транзистора VT1 (резистор R5), поступает на эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе VT2. При этом связь между каскадами осуществляется непосредственно, то есть между коллектором транзистора VT1 и базой транзистора VT2 отсутствует разделительный конденсатор. С эмиттера транзистора VT2 полезный сигнал через конденсатор С4 проходит на выход микрофонного усилителя. Использование эмиттерного повторителя в качестве выходного каскада микрофонного усилителя обеспечивает малое выходное сопротивление рассмотренной конструкции.

Принципиальная схема еще одного варианта микрофонного усилителя с буферным каскадом приведена на рис. 2.17.

Как и в рассмотренных ранее конструкциях, сигнал с выхода микрофона ВМ1 подается на вход усилительного каскада через раз-

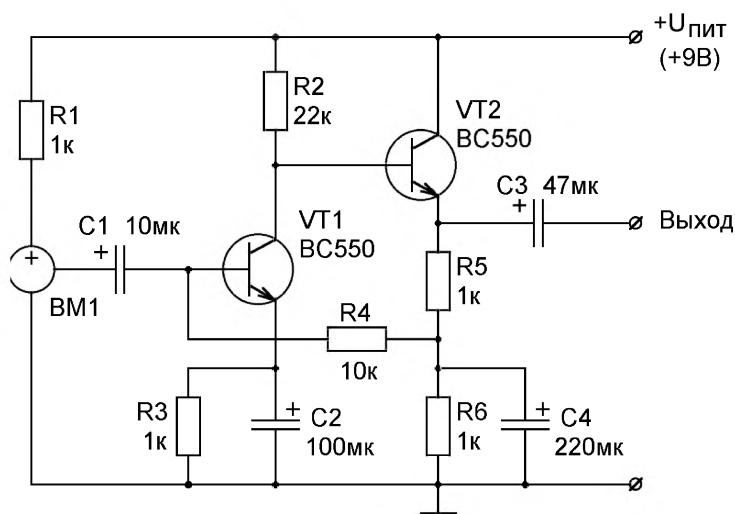


Рис. 2.17. Принципиальная схема микрофонного усилителя с буферным каскадом (вариант 2)

делительный конденсатор С1. Первый усилительный каскад выполнен на транзисторе VT1, стабилизация положения рабочей точки которого по постоянному току обеспечивается резистором R3. По переменному току этот резистор шунтирован конденсатором С2.

Сигнал, сформированный на резисторе R2, который является коллекторной нагрузкой транзистора VT1, подается на эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе VT2. При этом связь между каскадами осуществляется непосредственно, то есть между коллектором транзистора VT1 и базой транзистора VT2 отсутствует разделительный конденсатор. С эмиттера транзистора VT2 полезный сигнал через конденсатор С3 проходит на выход микрофонного усилителя.

Сопротивление участка цепи между эмиттером транзистора VT2 и шиной корпуса определяется суммой величин сопротивлений включенных последовательно резисторов R5 и R6. При том к точке их соединения подключен резистор R4. Таким образом, эмиттер транзистора VT2 и база транзистора VT1 оказываются соединенными между собой через резисторы R4 и R5, чем обеспечивается возникновение между каскадами отрицательной обратной связи по постоянному току. В результате напряжение на базе транзистора VT1 формируется с помощью резистора R4 из напряжения, присущего на эмиттере транзистора VT2, которое в свою очередь формируется при прохождении коллекторного тока этого транзистора через резисторы R5 и R6. По переменному току резистор R6 шунтируется конденсатором С4.

Применение конденсаторного микрофона требует подачи в цепь его включения соответствующего напряжения питания, для чего в схеме установлен резистор R1.

При разработке миниатюрных радиопередающих устройств и радиомикрофонов используются и другие, часто весьма интересные и оригинальные схемотехнические решения микрофонных усилителей. Однако ограниченный объем предлагаемого издания, к сожалению, не позволяет их рассмотреть. Необходимую дополнительную информацию заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

<b>1</b>	Микрофоны	<b>9</b>
<b>2</b>	Микрофонные усилители	<b>24</b>

## **3 ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

<b>4</b>	Модуляторы высокочастотного сигнала	<b>105</b>
<b>5</b>	Простые транзисторные радиопередающие устройства	<b>131</b>

В миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах формирование высокочастотного сигнала несущей частоты осуществляется с помощью специальных каскадов, представляющих собой обычные ВЧ-генераторы. При разработке таких генераторных каскадов чаще всего используются весьма простые и хорошо известные схемотехнические решения, позволяющие добиться весьма приемлемых характеристик.

В зависимости от особенностей схемотехнических решений, применяемых при их конструировании, ВЧ-генераторы можно разделить на несколько групп. В настоящее время в транзисторных микропередатчиках и радиомикрофонах широкое распространение получили обычные генераторы с резонансными LC-контурами, а также генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, выполненные на биполярных или полевых транзисторах. Поэтому в данной главе рассматриваются особенности функционирования транзисторных ВЧ-генераторов, их основные параметры и характеристики, а также основные достоинства и недостатки высокочастотных генераторов, разработанных на основе наиболее часто используемых в радиолюбительских конструкциях схемотехнических решений.

Необходимо отметить, что подробное описание теоретических основ функционирования узлов и блоков высокочастотных генераторов малогабаритных радиопередатчиков, к сожалению, выходит за рамки предлагаемого издания в связи с его ограниченным объемом. Поэтому принципы работы таких устройств будут рассмотрены весьма упрощенно, не претендуя на академическую точность.

Конечно же, в специализированной литературе и в сети Интернет можно найти немало схемотехнических решений и описаний конструкций микропередатчиков, в которых для генерации высокочастотных сигналов несущей частоты используются каскады, выполненные на другой элементной базе, например, на микросхемах, на туннельных диодах или л-диодах. Однако рассмотрение основных принципов функционирования таких устройств выходит за рамки предлагаемой книги.

### **3.1. Общие сведения**

---

Основу высокочастотного тракта любого радиопередатчика, в том числе и транзисторного, составляет генератор высокочастотных колебаний. Прежде чем перейти к рассмотрению некоторых схемотех-

нических решений ВЧ-генераторов, применяемых в миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах, автор считает необходимым привести некоторые основополагающие сведения, касающиеся теоретических основ генерации высокочастотных радиосигналов. В данном разделе рассматриваются вопросы, касающиеся назначения и основ функционирования высокочастотных генераторов, критерии их классификации, а также основные характеристики. Особое внимание уделено мерам, принимаемым для обеспечения стабильности частоты сигнала, формируемого ВЧ-генератором.

## **Назначение и принцип действия**

Неотъемлемой частью любого миниатюрного радиопередающего устройства является специальный каскад, который предназначен для генерации высокочастотного сигнала несущей частоты. Главной отличительной особенностью такого каскада, который в соответствии с его назначением называется генератором, является возникновение незатухающих ВЧ-колебаний. Такие колебания в генераторе могут возникать либо самопроизвольно, либо при наличии определенного внешнего воздействия (управляющий импульс и т.п.). Генераторы, в которых колебания возникают самостоятельно, часто называют автогенераторами или самовозбуждающимися генераторами.

С точки зрения схемотехники генераторы высокочастотного сигнала несущей частоты, применяемые в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках и радиомикрофонах, чаще всего представляют собой усилительный каскад, между выходом и входом которого включена цепь положительной обратной связи. Применение именно положительной обратной связи объясняется тем, что колебания, подаваемые с выхода усилительного каскада на его вход, должны иметь такую полярность, которая необходима для поддержания уже возникших в каскаде колебаний.

При рассмотрении принципа действия генератора входящий в его состав усилительный каскад можно представить как четырехполюсник, без искажений усиливающий подаваемый на его вход сигнал, то есть функционирующий в нормальном (штатном) рабочем режиме. В этом случае форма выходного напряжения такого каскада будет полностью повторять форму напряжения на его входе, но в тоже время будет отличаться большей амплитудой и в некоторых случаях фазой. Если же теперь выходной сигнал усилителя подать на его вход через специальный каскад (цепь обратной связи), кото-

рый обеспечит преобразование его амплитуды и, при необходимости, фазы таким образом, чтобы они соответствовали аналогичным параметрам входного сигнала, то подавать на вход каскада какой-либо сигнал извне не потребуется. Это значит, что первоначальный входной сигнал может быть отключен, а вместо него в качестве входного будет использоваться соответствующим образом преобразованный выходной сигнал. В результате каскад продолжает функционировать, но уже не как усилитель, а как генератор сигнала. Таким образом, генератор высокочастотных колебаний можно представить как специальный преобразователь, в котором энергия постоянного тока источника питания преобразуется в энергию переменного тока высокой частоты.

Одной из главных задач, решаемых с помощью цепи обратной связи, является такое преобразование амплитуды выходного сигнала, при котором после прохождения через цепь ОС величина амплитуды подаваемого на вход усилительного каскада будет достаточной для поддержания колебаний в системе. Именно это условие, часто называемое балансом амплитуд, является решающим при выборе определенной глубины обратной связи. При меньшей глубине или слабой обратной связи амплитуда выходного сигнала будет уменьшаться, колебания станут затухающими, что приведет к срыву генерации. При большей глубине или сильной обратной связи амплитуда выходного сигнала будет возрастать. В результате неконтролируемое увеличение амплитуды колебаний может привести к выходу из строя активного элемента усилительного каскада. В лучшем случае активный элемент (например, транзистор) либо войдет в режим ограничения, либо закроется.

Второй задачей, решение которой обеспечивает цепь обратной связи, является преобразование фазы выходного сигнала таким образом, чтобы она по отношению к фазе входного сигнала имела сдвиг  $0^\circ$  или  $360^\circ$ . В этом случае обычно говорят, что выходной сигнал подается на вход усилительного каскада в фазе. Выполнение данного условия, часто называемого балансом фаз, является основополагающим фактором при выборе схемотехнического решения активного элемента и цепи обратной связи. Необходимо отметить, что конкретные особенности усилительного каскада и цепи обратной связи обеспечивают синфазность выходного и входного сигналов лишь на одной частоте. Таким образом, частота формируемых генератором колебаний зависит от суммарного фазового сдвига непосредственно в усилительном каскаде и в цепи положительной обратной связи.

Усиление каскада и передаточная характеристика цепи обратной связи являются комплексными характеристиками и зависят от частоты сигнала. Поэтому в любом генераторе, обеспечивающем формирование незатухающих колебаний, в том числе и высокочастотном, такие колебания имеют вполне определенные амплитуду и частоту, значения которых зависят как от примененных при разработке усилителя и ПОС схемотехнических решений, так и от параметров входящих в их состав элементов. При этом амплитуда и частота формируемого генератором сигнала устанавливаются автоматически. Таким образом, для устойчивой работы генератора с необходимой частотой и амплитудой сигнала необходимо не только правильно выбрать, например, положение рабочей точки транзистора усилительного каскада, но и установить параметры цепи обратной связи (глубина обратной связи и фазовый сдвиг).

При разработке высокочастотных генераторов для миниатюрных транзисторных радиопередатчиков необходимость соблюдения условия баланса фаз имеет решающее значение при выборе схемы включения транзистора в усилительном каскаде. Дело в том, что при включении транзистора по схеме с общим эмиттером фазовый сдвиг между сигналом на его базе и сигналом на коллекторе будет составлять  $180^\circ$ . При выборе такой схемы включения цепь обратной связи, подключаемая между базой и коллектором, должна обеспечивать необходимый фазовый сдвиг. Если же транзистор будет включен по схеме с общей базой или с общим коллектором, то изменять фазу сигнала в цепи обратной связи не потребуется, поскольку фаза выходного сигнала при таких схемах включения совпадает с фазой входного сигнала. Необходимо отметить, что в указанных случаях речь идет о схемах включения транзистора по переменному току.

## **Состав и классификация**

Генераторы высокочастотных колебаний несущей частоты, используемые в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках и радиомикрофонах, состоят из нескольких функциональных частей или блоков. Такими блоками обычно являются активный элемент, селективный элемент, цепь положительной обратной связи, а также вспомогательные каскады и элементы.

Активный элемент является основной составляющей частью ВЧ-генератора. Главной задачей такого элемента, в качестве которого обычно используется транзистор, является обеспечение условий для

возникновения и поддержки высокочастотных колебаний. В отличие от транзисторов, применяемых в НЧ-генераторах, такой транзистор должен иметь как можно большую верхнюю граничную частоту и как можно меньшие паразитные емкости.

В зависимости от выбранного схемотехнического решения активного элемента высокочастотного генератора транзистор может быть включен по постоянному току либо по схеме с общим эмиттером, либо по схеме с общей базой, либо по схеме с общим коллектором. Необходимо отметить, что соответствующий электрод транзистора (например, эмиттер) считается общим по постоянному току, если к нему подключаются источники питания двух других электродов (например, базы и коллектора). В ВЧ-генераторах миниатюрных радиопередатчиков транзистор активного элемента по постоянному току обычно включается по схеме с общим эмиттером с соответствующими цепями питания, смещения и стабилизации положения рабочей точки.

По переменному току, независимо от примененной схемы включения по постоянному току, транзистор может быть включен также по одной из трех схем: либо с общим эмиттером, либо с общей базой, либо с общим коллектором. При этом электрод транзистора считается общим по переменному току, если к нему подключаются входное и выходное колебательные напряжения. Поэтому все переменные напряжения измеряются по отношению к общему электроду с помощью высокочастотного вольтметра. Если на электроде существует падение напряжения, то этот электрод считается изолированным, если же нет – то заземленным. Естественно, в схемах ВЧ-генераторов из трех электродов транзистора по высокой частоте может быть заземлен только один электрод.

Для схемотехнических решений высокочастотных транзисторных генераторов не является редкой ситуация, когда один и тот же электрод транзистора активного элемента является изолированным по переменному току и заземленным по постоянному току, или наоборот. Например, в хорошо известной схеме эмиттерного повторителя транзистор по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером, а по переменному току – по схеме с общим коллектором.

В качестве селективного элемента ВЧ-генератора малогабаритных радиопередающих устройств обычно используется либо резонансный контур, либо кварцевый резонатор. Именно селективный элемент оказывает решающее влияние на значение частоты сигнала, формируемого генератором, то есть является частотозадающим эле-

ментом. Например, в рассматриваемых далее схемотехнических решениях LC-генераторов селективный элемент чаще всего представляет собой обычный колебательный контур, состоящий из включенных параллельно конденсатора и катушки индуктивности.

Колебания, возникающие в параллельном резонансном контуре при подаче на него постоянного напряжения, например, при включении питания, являются затухающими вследствие потерь энергии в контуре. Для получения незатухающих колебаний необходимо подать в контур колебания, совпадающие по фазе с первоначально возникшими свободными колебаниями, которые к тому же должны иметь достаточную мощность для компенсации потерь энергии в контуре. Именно такие требования предъявляются к колебаниям, которые формируются на выходе активного элемента генератора. При соблюдении указанных условий амплитуда колебаний в резонансном контуре станет постоянной, то есть в контуре возникнут незатухающие колебания.

Элементы, входящие в состав цепи положительной обратной связи, обеспечивают обратную связь между выходом и входом каскада, выполненного на активном элементе. Параметры элементов цепи обратной связи определяют условия достижения и поддержания балансов амплитуды и фазы, необходимых для возникновения незатухающих колебаний и стабильной работы ВЧ-генератора.

Вспомогательные элементы в первую очередь обеспечивают работу транзистора по постоянному току, определяя положение рабочей точки транзистора и ее стабилизацию. Помимо этого, определенные элементы могут использоваться для связи между активным элементом и резонансным контуром.

Несмотря на огромное количество схемотехнических решений высокочастотных генераторов для миниатюрных транзисторных радиопередатчиков, в них всегда присутствуют основные элементы и соответствующие связи между ними, которые определяют критерии классификации генераторов и их характеристики.

В специализированной радиотехнической литературе можно найти различные критерии и, соответственно, системы классификации высокочастотных генераторов. Однако ограниченный объем данной книги не позволяет подробно рассмотреть даже некоторые из них. Поэтому далее остановимся лишь на важнейших критериях и признаках, чаще всего используемых в качестве основы для классификации ВЧ-генераторов, применяемых в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках.

Одним из основных критериев, применяемых при классификации ВЧ-генераторов, является тип селективного элемента. Поэтому часто классификацию по такому принципу называют классификацией по типу селективного элемента. В соответствии с этим критерием высокочастотные генераторы делятся на LC-генераторы, RC-генераторы, а также кварцевые генераторы. В миниатюрных транзисторных радиопередатчиках обычно применяются LC-генераторы и кварцевые генераторы.

В LC-генераторах в качестве селективного элемента используется резонансный контур, образованный включенными параллельно катушкой индуктивности и конденсатором. Отличительной особенностью этого типа генераторов является минимальный уровень искажений формируемого сигнала, поскольку резонансный контур подавляет частотные составляющие высших гармоник даже в том случае, когда активный элемент работает в нелинейном режиме.

Необходимо отметить, что LC-генераторы, в зависимости от схемотехнического решения цепи положительной обратной связи, делятся на генераторы с индуктивной связью, с емкостной связью и трехточечные генераторы (так называемые трехточки). В генераторах с индуктивной связью цепь положительной обратной связи между входным и выходным электродами транзистора образована индуктивной связью, а в генераторах с емкостной связью - емкостной. В трехточечных ВЧ-генераторах, которые в свою очередь делятся на индуктивные и емкостные трехточки, резонансный контур подключен к активному элементу в трех точках. Некоторые специалисты считают индуктивную трехточку частным случаем генератора с индуктивной связью, емкостную трехточку – частным случаем генератора с емкостной связью.

В миниатюрных транзисторных радиопередатчиках широко используются так называемые кварцевые генераторы, в которых в качестве селективного элемента используется кварцевый резонатор. Главной особенностью таких ВЧ-генераторов является формирование сигнала одной частоты, значение которой определяется особенностями кварцевого резонатора. При этом выходной сигнал может генерироваться не только на основной частоте резонанса, но и на частотах гармонических составляющих. Кварцевые генераторы отличаются высокой стабильностью частоты сигнала, поэтому часто их называют генераторами с кварцевой стабилизацией частоты.

## **Основные характеристики**

Основными характеристиками, оказывающими решающее влияние на выбор схемы высокочастотного генератора малогабаритного радиопередатчика или радиомикрофона, являются частота генерируемых колебаний и ее стабильность, а также напряжение питания и выходная мощность.

При изготовлении и проведении экспериментов с миниатюрными транзисторными радиопередающими устройствами особое внимание следует обратить на выбор значения рабочей частоты высокочастотного генератора, которая чаще всего является несущей частотой выходного сигнала всей конструкции. Дело в том, что действующее законодательство Российской Федерации достаточно четко регулирует порядок и условия производства, сбыта и/или приобретения (в том числе и в целях сбыта), ввоза, вывоза, а также использования радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств, в том числе и радиопередатчиков. К сожалению, ограниченный объем данной книги не позволяет подробно рассмотреть правовые основы производства и использования высокочастотных радиопередающих устройств в России. Поэтому далее будут приведены лишь некоторые, весьма ограниченные сведения, необходимые для выбора частоты ВЧ-генератора маломощного транзисторного радиопередатчика или радиомикрофона.

Действующее законодательство России содержит правовую норму, в соответствии с которой изготовление, приобретение, ввоз в Российскую Федерацию, использование (эксплуатация) радиоэлектронных средств гражданского применения на территории Российской Федерации осуществляются на основании разрешений, выдаваемых органами службы государственного надзора за связью в Российской Федерации. Указанные разрешения выдаются в соответствии с установленным порядком по заявкам юридических и физических лиц, включая иностранных.

В то же время на территории России действует Перечень радиоэлектронных средств, для которых не требуется разрешение на использование. Этот Перечень утвержден Решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минсвязи РФ от 2 апреля 2001 года (с последующими изменениями). В соответствии с указанным Перечнем не требуется разрешение на использование некоторых категорий радиоэлектронных (высокочастотных) средств. К таким средствам или устройствам относятся, например, концертные ра-

диомикрофоны, работающие на фиксированных частотах 165,70 МГц, 166,10 МГц, 166,50 МГц и 167,15 МГц, имеющие выходную мощность до 20 мВт. Помимо этого не требуется разрешение на использование радиомикрофонов типа «Караоке» мощностью до 10 мВт, работающих в частотных диапазонах от 66 МГц до 74 МГц, от 87,5 МГц до 92 МГц и от 100 МГц до 108 МГц. Также не требуется разрешение на использование концертных радиомикрофонов мощностью до 5 мВт, работающих в частотных диапазонах от 151 МГц до 216 МГц, от 175 МГц до 230 МГц, от 470 МГц до 638 МГц, от 710 МГц до 726 МГц.

Для того чтобы радиолюбители избежали возможных неприятных недоразумений с правоохранительными органами, автор рекомендует всем читателям, которые решат не только повторить конструкции радиопередающих устройств, описание которых приведено в данной книге, но и проводить самостоятельные эксперименты в этой области, ознакомиться с соответствующими законодательными актами России. Необходимую информацию заинтересованные радиолюбители могут найти в специализированной юридической литературе или в распространяемых в электронном виде различных справочных правовых системах (например, в системе «ГАРАНТ»).

Одним из важнейших параметров, качественно характеризующих высокочастотный генератор маломощных радиопередающих устройств, является стабильность частоты выходного сигнала. Данный параметр определяется как абсолютное значение отклонений частоты генерируемого сигнала, вызванных различными причинами, за определенный промежуток времени. Необходимо отметить, что генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, по сравнению с обычными LC-генераторами, отличаются значительно более высокой стабильностью частоты сигнала.

Напряжение питания высокочастотных генераторов транзисторных микропередатчиков обычно соответствует напряжению питания остальных каскадов. В некоторых случаях, с целью обеспечения высокой стабильности частоты, питание генератора может осуществляться меньшим напряжением, которое формируется специальным стабилизатором.

При разработке и создании миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов особого внимания заслуживает выбор мощности изготавливаемой конструкции. Значения выходной мощности таких устройств должны соответствовать требованиям действующего законодательства Российской Федерации, о кото-

рых было рассказано ранее. Остается добавить, что также не требуется специальное разрешение, например, на эксплуатацию детских радиопереговорных устройств, работающих в полосе радиочастот от 26957 кГц до 27283 кГц, с мощностью излучения не более 10 мВт.

## **Обеспечение стабильности частоты ВЧ-генератора**

Существует несколько основных причин, которые могут привести к отклонениям частоты в высокочастотных генераторах миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов. Среди них в первую очередь следует отметить применение некачественных элементов, изменения температурного режима, отклонения напряжения питания, изменение параметров нагрузки и особенности конструктивного исполнения.

При выборе элементной базы особого внимания требует правильный подбор транзистора активного элемента, который должен иметь достаточно высокую граничную частоту. На практике граничная частота транзистора должна быть в несколько раз больше, чем рабочая частота генератора. Дело в том, что на частотах, находящихся в непосредственной близости от граничной частоты, коэффициент усиления транзистора обычно недостаточно высок для обеспечения стабильной генерации незатухающих колебаний.

Стабильность частоты транзисторного ВЧ-генератора также зависит от возможного изменения внутреннего сопротивления транзистора и схемы его включения. Обычно при выборе схемотехнического решения высокочастотного генератора предпочтение отдается схемам включения транзистора с общей базой и с общим коллектором.

Также внимательно следует отнестись к качественным характеристикам элементов резонансного контура. В первую очередь это касается конструктивных особенностей катушки индуктивности, а также материалов, из которых она изготавливается. Витки катушки должны быть жестко закреплены на каркасе таким образом, чтобы исключить изменение их положения в результате как механического, так и теплового воздействия. С учетом данного требования следует выбирать и материал каркаса. Не рекомендуется для увеличения значения индуктивности применять катушку с сердечником, поскольку при долговременной эксплуатации устройства стабильность частоты может ухудшиться.

Параметры резонансного контура ВЧ-генератора зависят и от характеристик примененного в нем конденсатора. Использование конденсаторов с некоторыми типами диэлектрика, достаточно надежно функционирующих в низкочастотных каскадах, может привести к таким изменениям качественных параметров контура, в результате которых произойдет срыв колебаний генератора.

Изменения температурного режима отдельных элементов высокочастотного генератора, в первую очередь транзистора и элементов резонансного контура, также оказывают влияние на стабильность частоты сигнала. В значительной мере компенсировать влияние температуры на режим работы транзистора позволяет применение соответствующих схемотехнических решений, например, классической мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки транзистора по постоянному току.

При изменении температуры окружающего пространства соответствующим образом изменяются как индуктивность катушки, так и емкость конденсатора, входящих в состав резонансного контура, что приводит к изменению его резонансной частоты. Температурные зависимости параметров элементов характеризуются соответствующими температурными коэффициентами. Например, значение индуктивности катушки при положительном температурном коэффициенте увеличивается с возрастанием температуры. Поэтому в некоторых случаях рекомендуется компенсировать влияние положительного температурного коэффициента катушки использованием конденсатора с соответствующим отрицательным температурным коэффициентом.

В транзисторных микропередатчиках напряжение питания высокочастотных генераторов транзисторных микропередатчиков обычно не отличается от напряжения питания остальных каскадов. Однако в некоторых схемотехнических решениях с целью обеспечения высокой стабильности частоты питание генератора осуществляется меньшим напряжением, которое формируется специальным стабилизатором. В результате при снижении напряжения элемента питания значение напряжения, подаваемого на высокочастотный генератор, остается неизменным.

Существуют и другие способы повышения стабильности частоты ВЧ-генератора, например, использование термостата, специальных фильтров в цепи питания и т.д. Необходимую информацию заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

## 3.2. Генераторы с резонансными LC-контурами

---

В так называемых LC-генераторах в качестве селективного элемента используется резонансный контур, образованный включенными параллельно катушкой индуктивности и конденсатором. Отличительной особенностью этого типа генераторов является минимальный уровень искажений формируемого сигнала, поскольку резонансный контур подавляет частотные составляющие высших гармоник даже в том случае, когда активный элемент работает в нелинейном режиме.

При разработке малогабаритной транзисторной радиопередающей аппаратуры профессионалы и любители используют различные схемотехнические решения высокочастотных генераторов с резонансными LC-контурами, основу которых составляет активный элемент, выполненный на биполярном или полевом транзисторе.

В зависимости от схемы подключения резонансного контура к активному элементу LC-генераторы делятся на генераторы с индуктивной связью, с емкостной связью и трехточечные генераторы. В генераторах с индуктивной связью цепь положительной обратной связи образована индуктивной ПОС между входным и выходным электродами транзистора, а в генераторах с емкостной связью – емкостной цепью ПОС. В трехточечных ВЧ-генераторах, часто называемых трехточками, резонансный контур подключен к активному элементу в трех точках. В зависимости от особенностей схемотехнического решения трехточки могут быть индуктивными или емкостными.

В связи с ограниченным объемом данной книги в следующих разделах будут рассмотрены лишь некоторые из наиболее популярных схемотехнических решений высокочастотных LC-генераторов, применяемые при разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств.

### **LC-генераторы с индуктивной связью**

Отличительной особенностью LC-генераторов с индуктивной связью, отраженной в их названии, является цепь положительной обратной связи, которая обеспечивает индуктивную связь между входом и выходом активного элемента. Схемотехнические решения таких генераторов высокочастотных колебаний, хотя и редко, но

применяются в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках и радиомикрофонах.

Первый LC-генератор с индуктивной обратной связью создал немецкий изобретатель Александр Мейсснер (Alexander Meissner) в 1913 году. В его ламповой конструкции для обеспечения положительной обратной связи использовались две катушки с встречным включением обмоток (так называемое трансформаторное включение). Поэтому в специализированной литературе для обозначения такого схемотехнического решения часто используются названия «схема Мейсснера» или «схема с трансформаторной индуктивной связью». В генераторе по схеме Мейсснера резонансный контур подключен к цепи управляющей сетки лампы, включенной по схеме с общим катодом. Конечно же, за прошедшие годы данное схемотехническое решение неоднократно усовершенствовалось, в том числе и вследствие появления и применения новой элементной базы. Тем не менее, схемы транзисторных LC-генераторов с индуктивной обратной связью, по-прежнему называются схемами Мейсснера.

В высокочастотных генераторах миниатюрных радиопередатчиков широкое распространение получило схемотехническое решение, в котором резонансный контур включен в цепь коллектора транзистора активного элемента. Принципиальная схема простого LC-генератора с индуктивной положительной обратной связью, выполненного на биполярном транзисторе по схеме Мейсснера, приведена на рис. 3.1.

В данной схеме при включении питания в коллекторной цепи транзистора VT1 начинает протекать ток, инициирующий возникновение свободных колебаний в параллельном резонансном конту-

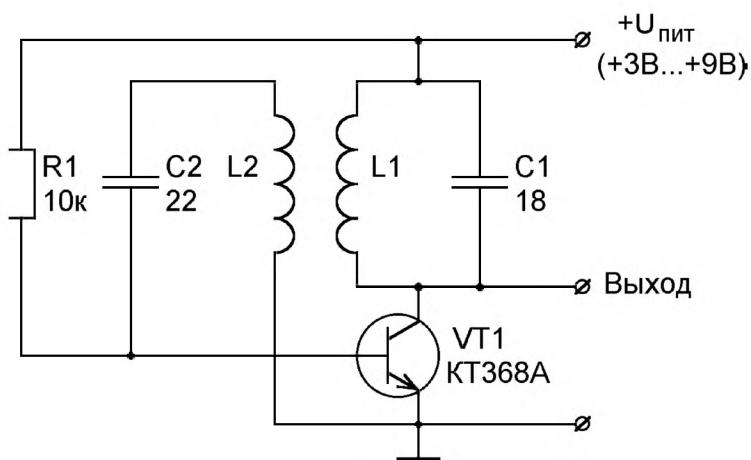


Рис. 3. 1. Принципиальная схема простого LC-генератора с индуктивной обратной связью (вариант 1)

ре, образованном конденсатором С1 и катушкой L1. Частота этих колебаний определяется параметрами элементов контура. С катушкой L1 индуктивно связана катушка L2, входящая в состав цепи положительной обратной связи. За счет контурного тока вокруг катушки L1 формируется переменное магнитное поле, под действием которого в катушке связи L2 возникает ЭДС взаимоиндукции, приложенная к участку база-эмиттер транзистора VT1. Напряжение смещения на базу транзистора подается через резистор R1.

Катушка связи L2 включена таким образом, что фаза сигнала, подаваемого на базу транзистора VT1, отличается на  $180^\circ$  от фазы сигнала, формируемого на его коллекторе. В результате сигнал, поступающий базу транзистора через цепь обратной связи, оказывается в фазе с исходным сигналом, то есть выполняется условие баланса фаз, необходимое для возникновения устойчивой генерации.

ЭДС взаимоиндукции, приложенная к участку база-эмиттер транзистора VT1, инициирует соответствующие изменения коллекторного тока транзистора. В результате в составе коллекторного тока транзистора VT1 формируется переменная составляющая с частотой колебаний в контуре. Именно эта переменная составляющая коллекторного тока обеспечивает восполнение потерь энергии в контуре.

Колебания, возникающие при включении питания в параллельном резонансном контуре, образованном конденсатором С1 и катушкой L1, являются затухающими вследствие потерь энергии в контуре. Для получения незатухающих колебаний следует подать в контур колебания, совпадающие по фазе с первоначально возникшими свободными колебаниями, которые к тому же должны иметь достаточную мощность для компенсации потерь энергии в контуре, то есть необходимо выполнить условие баланса амплитуд. Такие колебания формируются активным элементом генератора (транзистор VT1) за счет усиления колебаний, подаваемых на базу транзистора через цепь положительной обратной связи, в состав которой входят катушка L2 и разделительный конденсатор С2. Для того чтобы усиленные колебания имели требуемый фазовый сдвиг и поддерживали колебания в резонансном контуре, а не заглушали их, необходимо правильно включить катушку L2. В рассматриваемой схеме переменные напряжения на базе и на коллекторе транзистора VT1 должны быть в противофазе. При соблюдении указанных условий амплитуда колебаний в резонансном контуре будет постоянной, то есть в контуре будут существовать незатухающие колебания.

В специализированной литературе и в сети Интернет можно найти большое количество конструкций, в состав которых входят транзисторные LC-генераторы с индуктивной обратной связью. Упрощенная принципиальная схема еще одного из вариантов схемотехнического решения LC-генератора с индуктивной ОС, выполненного на биполярном транзисторе, приведена на рис. 3.2.

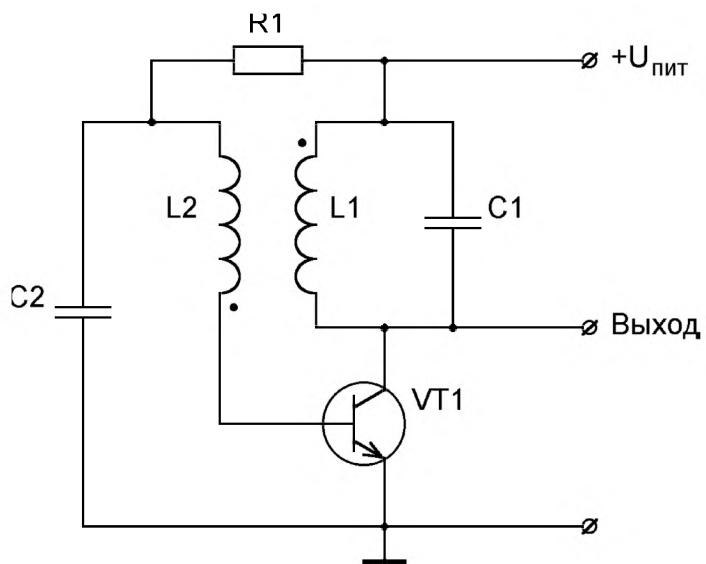


Рис. 3.2. Упрощенная принципиальная схема LC-генератора с индуктивной обратной связью (вариант 2)

Как и в рассмотренном ранее схемотехническом решении, в данной конструкции селективный элемент представляет собой параллельный колебательный контур, подключенный в коллекторную цепь транзистора VT1, по постоянному и переменному току включенного по схеме с общим эмиттером. Следует отметить, что для снижения влияния транзистора на резонансный контур, подключение часто осуществляется с помощью дополнительного вывода, то есть с меньшим реактивным сопротивлением. Однако на параметры генератора это не оказывает особого влияния, за исключением глубины обратной связи.

В непосредственной индуктивной связи с катушкой L1 контура находится катушка L2, которая подключена, соответственно, в цепь базы транзистора VT1. Положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивления резистора R1, через который положительное напряжение от источника питания подается на базу транзистора.

Как уже отмечалось, одним из условий возникновения и устойчивой генерации колебаний является баланс амплитуд. В рассматри-

ваемом схемотехническом решении принцип работы активного элемента в режиме автоматической поддержки баланса амплитуд заключается в следующем. При недостаточном уровне глубины обратной связи через транзистор VT1 протекает ток покоя, то есть транзистор работает в режиме, характерном для обычных усилителей напряжения. При увеличении глубины обратной связи каскад возбуждается, переходя в режим генерации колебаний. Как только каскад начнет работать в режиме генерирования колебаний, в катушке L2 инициируется переменное напряжение, которое выпрямляется переходом база-эмиттер транзистора VT1, как диодом. С учетом поляризации этого перехода на базе транзистора и на конденсаторе C2 формируется отрицательное постоянное напряжение. Оно имеет противоположную полярность по отношению к напряжению, подаваемому на базу транзистора VT1 через резистор R1. В результате положение рабочей точки изменяется, что приводит в определенной степени к запиранию транзистора. Таким образом, автоматически обеспечивается режим работы, при котором коллекторный ток транзистора не превышает допустимую величину. Необходимый уровень глубины обратной связи определяется количеством витков катушки L2 и, естественно, расстоянием между катушками L1 и L2.

Для того, чтобы в рассматриваемом каскаде колебания возникли и устойчиво генерировались, между базой и коллектором транзистора T1 должен быть соответствующий сдвиг фазы, достигающий  $180^\circ$ . Для выполнения этого условия катушка L2 должна быть включена соответствующим образом, то есть так, как определяют на схеме точки, указывающие начало витков. Если данное условие не будет соблюдено, то напряжение обратной связи на базе транзистора не будет иметь необходимый фазовый сдвиг ( $0^\circ$  или  $360^\circ$ ).

Еще один вариант схемотехнического решения LC-генератора с индуктивной обратной связью предложил американский изобретатель Ральф Хартли (Ralph Hartley) в 1915 году. В его схеме для обеспечения положительной обратной связи использовалась одна катушка, с отвода которой снималось напряжение цепи ПОС (так называемое автотрансформаторное включение). Поэтому в специализированной литературе для обозначения такого схемотехнического решения часто используются названия «схема Хартли» или «схема с автотрансформаторной индуктивной связью».

Следует признать, что схемотехнические решения высокочастотных генераторов с индуктивной связью (генератор Хартли или генератор Мейсснера), несмотря на свои достоинства (например, срав-

нительно большая выходная мощность) довольно редко используются при разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств.

## LC-генераторы с емкостной связью

В названии LC-генераторов с емкостной связью отражена их отличительная особенность, которая заключается в использовании цепи положительной ОС, обеспечивающей емкостную связь между входом и выходом активного элемента. Схемотехнические решения таких генераторов высокочастотных колебаний довольно часто применяются в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках и радиомикрофонах. Принципиальная схема одного из вариантов LC-генератора с емкостной связью, основу которого составляет биполярный транзистор n-p-n проводимости, приведена на рис. 3.3.

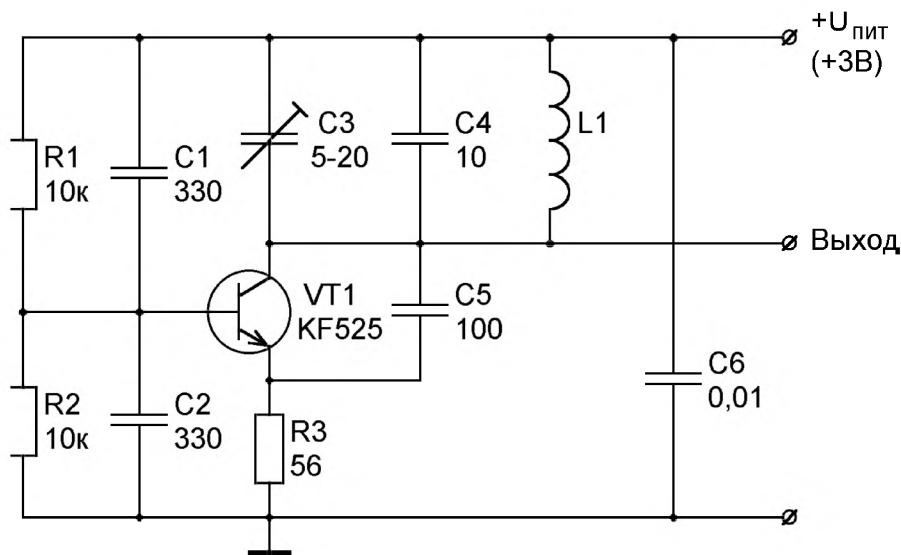


Рис. 3.3. Принципиальная схема LC-генератора с емкостной обратной связью (вариант 1)

В рассматриваемой схеме транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. Положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений резисторов R1 и R2. В состав мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки помимо резисторов R1 и R2 входит резистор R3, включенный в цепи эмиттера транзистора VT1.

По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой. При этом база транзистора заземлена по высокой частоте через конденсаторы C1 и C2. Входным электродом активного эле-

мента по высокой частоте в данном случае является эмиттер транзистора VT1. Резонансный контур, образованный конденсаторами C3, C4 и катушкой L1, включен на выходе активного элемента, а именно в цепи коллектора транзистора.

Для схемы с общей базой характерно отсутствие фазового сдвига между входным и выходным напряжениями. Дело в том, что, например, при отрицательной полуволне входного напряжения токи эмиттера и коллектора транзистора VT1 соответственно возрастают. В результате увеличивается падение напряжения на нагрузке, то есть на коллекторе транзистора присутствует отрицательная полуволна выходного напряжения.

Цепь положительной обратной связи образована конденсатором С5, который включен между коллектором и эмиттером транзистора VT1. При прохождении через эту цепь ПОС фаза сигнала не изменяется. При достаточной глубине обратной связи (при соблюдении условия баланса амплитуд) каскад переходит в режим генерации высокочастотных колебаний в FM-диапазоне с частотой около 100 МГц.

Особенностью данной схемы является то, что колебания возникают и устойчиво генерируются и при сравнительно низком значении напряжения питания, например, при напряжении 3 В. Помимо этого, при использовании соответствующего транзистора, имеющего высокую граничную частоту, частота колебаний генератора может достигать значений, больших, чем 100 МГц.

Принципиальная схема еще одного варианта LC-генератора с емкостной связью приведена на рис. 3.4.

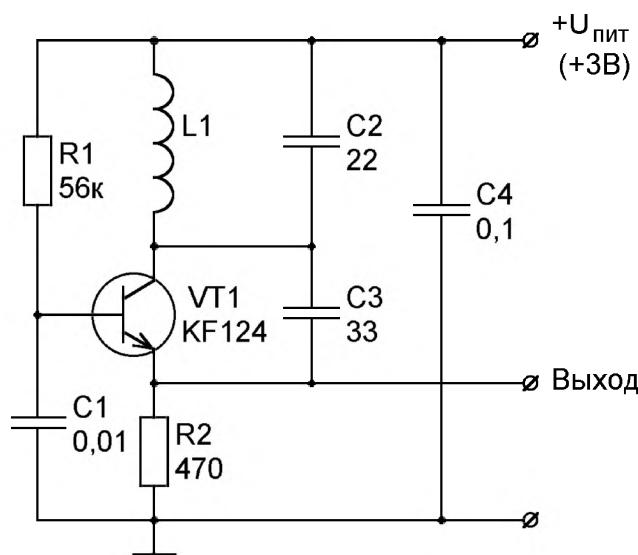


Рис. 3.4. Принципиальная схема LC-генератора с емкостной обратной связью (вариант 2)

В этой схеме транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером, а по переменному току – по схеме с общей базой, которая заземлена по высокой частоте через конденсатор C1. Входным электродом активного элемента по переменному току, как и в рассмотренной ранее конструкции, является эмиттер транзистора VT1. Резонансный контур, образованный конденсатором C2 и катушкой L1, включен в цепь коллектора транзистора. Цепь положительной обратной связи образована конденсатором C3, который включен между коллектором и эмиттером транзистора VT1.

Однако для данной конструкции характерны некоторые схемотехнические особенности. Положение рабочей точки транзистора VT1 определяется величиной сопротивления резистора R1. Выходной сигнал генератора снимается с точки подключения конденсатора C3 цепи ОС к эмиттеру транзистора.

### **Трехточечные LC-генераторы**

В конструкциях малогабаритных транзисторных радиопередающих устройств широкое распространение получили ВЧ-генераторы с трехточечным включением резонансного контура, то есть выполненных по схеме так называемой трехточки. Этот термин основан на применяемых при разработке таких устройств соответствующих схемотехнических решениях, для которых характерно подключение резонансного контура к активному элементу в трех точках.

Необходимо отметить, что в специализированной литературе и в сети Интернет можно найти большое количество конструкций транзисторных трехточечных LC-генераторов, которые представляют собой модификации основополагающих схемотехнических решений и лишь на первый взгляд имеют принципиально значимые отличия от классических схем. В связи с ограниченным объемом предлагаемой книги в данном разделе будут рассмотрены особенности построения и функционирования транзисторных трехточечных LC-генераторов, основу которых составляют лишь наиболее часто применяемые при создании миниатюрных радиопередатчиков схемотехнические решения.

В зависимости от схемы включения по высокой частоте активного элемента транзисторного ВЧ-генератора возможны три основных варианта включения как индуктивной, так и емкостной трехточек: по схеме с общей базой, по схеме с общим эмиттером и по схеме с общим коллектором. Упрощенные принципиальные схемы тран-

зисторных трехточечных LC-генераторов приведены на рис. 3.5. Особенностью данных схемотехнических решений является включение активного элемента (биполярный транзистор) по переменному току по схеме с общей базой.

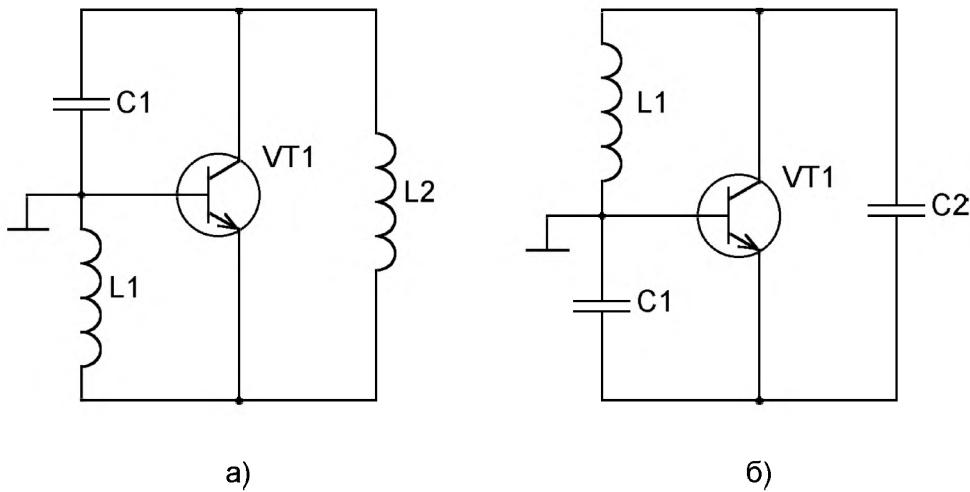


Рис. 3.5. Упрощенные принципиальные схемы LC-генераторов с индуктивной (а) и емкостной (б) трехточками

В высокочастотном LC-генераторе, выполненном по индуктивной трехточечной схеме (рис. 3.5а), резонансный контур (селективный элемент) образован включенными последовательно катушками L1, L2 и подключенным параллельно им конденсатором C1. Этот контур включен в цепь выходного электрода активного элемента, то есть в цепь коллектора транзистора VT1. В процессе генерации сигнал обратной связи снимается с точки соединения катушек L1, L2 и подается в цепь эмиттера, который является входным электродом активного элемента. Таким образом, селективный элемент оказывается подключенным к транзистору в трех точках. На практике в индуктивных трехточечных генераторах вместо двух катушек применяется одна катушка с отводом, поэтому часто такую схему называют трехточкой по схеме Хартли.

В высокочастотном LC-генераторе, выполненном по емкостной трехточечной схеме (рис. 3.5б), резонансный контур образован включенными последовательно конденсаторами C1, C2 и подключенной параллельно им катушкой L1. Этот контур включен в цепь выходного электрода активного элемента, то есть в цепь коллектора транзистора VT1. В процессе генерации сигнал обратной связи снимается с точки соединения конденсаторов C1, C2, образующих так называемый емкостной делитель, и подается в цепь эмиттера, который яв-

ляется входным электродом активного элемента. Таким образом, в данном случае селективный элемент также подключен к транзистору в трех точках, но уже с помощью емкостного делителя. Впервые использовать емкостной делитель в цепи положительной обратной связи лампового LC-генератора предложил американский изобретатель Эдвин Колпитц (Edwin Colpitts) в 1919 году, поэтому часто такую схему называют трехточкой по схеме Колпитца.

Следует признать, что в миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах LC-генераторы, выполненные по индуктивной трехточечной схеме, применяются сравнительно редко. Поэтому далее будут рассмотрены схемотехнические решения LC-генераторов с емкостным делителем, выполненных по схеме емкостной трехточки. Принципиальная схема одного из вариантов генератора с емкостным делителем в цепи положительной обратной связи приведена на рис. 3.6.

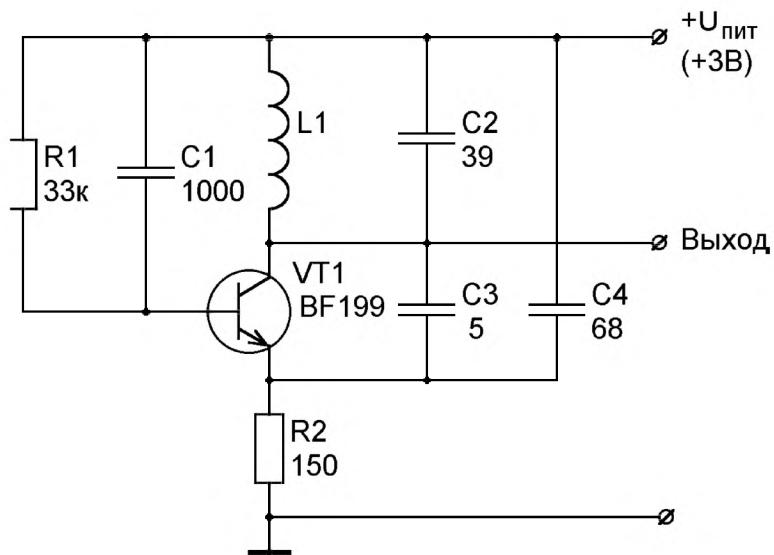


Рис. 3.6. Принципиальная схема генератора с емкостным делителем (вариант 1)

В рассматриваемой конструкции транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивления резистора R1. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C1.

Высокочастотные колебания возникают в колебательном контуре, включенном между коллектором и базой транзистора. Резонансный контур, образованный конденсаторами C2, C3, C4 и катушкой

L1, включен на выходе активного элемента, то есть в коллекторной цепи транзистора VT1. Снимаемое с емкостного делителя, образованного конденсаторами C3 и C4, напряжение подается во входную цепь активного элемента, а именно на эмиттер транзистора VT1, в результате чего каскад оказывается охваченным положительной обратной связью. Величина указанного напряжения, и, соответственно глубина обратной связи, определяется соотношением величин емкостей конденсаторов C3 и C4.

Как и в других схемотехнических решениях подобных высокочастотных LC-генераторов, в данной схеме коллектор транзистора VT1 подключен непосредственно к нижнему по схеме выводу катушки L1. В этом случае глубина положительной обратной связи определяется лишь соотношением величин емкостей конденсаторов C3 и C4. Однако часто коллектор транзистора подключается к отводу от соответствующего витка катушки L1. В этом случае глубина связи цепи ПОС с выхода активного элемента на его вход зависит и от выбора витка катушки, к которому подключается коллектор транзистора VT1.

Настройка контура при регулировке частоты генерируемых колебаний осуществляется преимущественно изменением индуктивности катушки L1 и конденсатора C2, поскольку изменение емкостей конденсаторов C3 и C4 приведет к изменению параметров цепи обратной связи. Помимо этого изменение индуктивности катушки при увеличении частоты колебаний повышает добротность резонансного контура. Затухание колебаний в резонансном контуре, инициированное высоким выходным сопротивлением транзистора VT1, весьма незначительно.

Как уже отмечалось, зависимость стабильности частоты генерируемых колебаний от положения рабочей точки транзистора минимальна при его включении по переменному току по схеме с общей базой. Коллекторный ток мало зависит от напряжения между коллектором и базой транзистора. В данном случае транзистор работает в режиме практически со 100% обратной связью, поэтому коэффициент усиления каскада по току почти равен единице. Это означает, что коллекторный ток почти равен току эмиттера, однако протекает в противоположном направлении. Помимо этого, в активном элементе ВЧ-генератора, выполненном на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, не происходит поворот фазы выходного напряжения по отношению к входному напряжению. К тому же входное сопротивление такого каскада сравнительно мало и составляет

обычно единицы или десятки ом, в то же время его выходное сопротивление на несколько порядков выше.

Принципиальная схема еще одного варианта генератора емкостным делителем приведена на рис. 3.7. Ее главное отличие от рассмотренного ранее схемотехнического решения заключается в ином подключении конденсатора C1, а также в изменении схемотехнического решения емкостного делителя в цепи обратной связи.

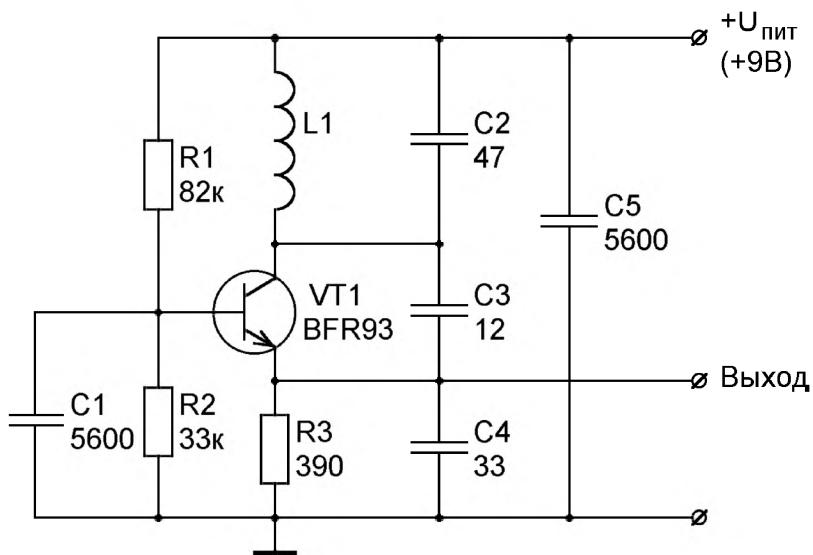


Рис. 3.7. Принципиальная схема генератора с емкостным делителем (вариант 2)

По постоянному току транзистор VT1 в данной схеме включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R1 и R2. Эти же резисторы совместно с резистором R3 образуют схему стабилизации положения рабочей точки. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C1.

Высокочастотные колебания возникают в колебательном контуре, включенном между коллектором и базой транзистора. Резонансный контур, образованный конденсаторами C2, C3, C4 и катушкой L1, включен на выходе активного элемента, то есть в коллекторной цепи транзистора VT1. При анализе данного схемотехнического решения не следует забывать о том, что верхний по схеме вывод катушки L1 подключен к источнику питания, который имеет такой же высокочастотный потенциал, как и шина корпуса, и, соответственно, как и база транзистора VT1.

Снимаемое с резонансного контура напряжение через емкостной делитель, образованный конденсаторами С3 и С4, подается во входную цепь активного элемента, а именно на эмиттер транзистора VT1, в результате чего каскад оказывается охваченным положительной обратной связью. Величина указанного напряжения, и, соответственно глубина обратной связи, определяется соотношением величин емкостей конденсаторов С3 и С4.

В малогабаритных транзисторных радиопередающих устройствах широкое распространение получили более сложные схемотехнические решения LC-генераторов с емкостным делителем. Принципиальная схема одного из вариантов такого ВЧ-генератора, который может формировать колебания на частотах ЧМ- и FM-диапазонов, приведена на рис. 3.8.

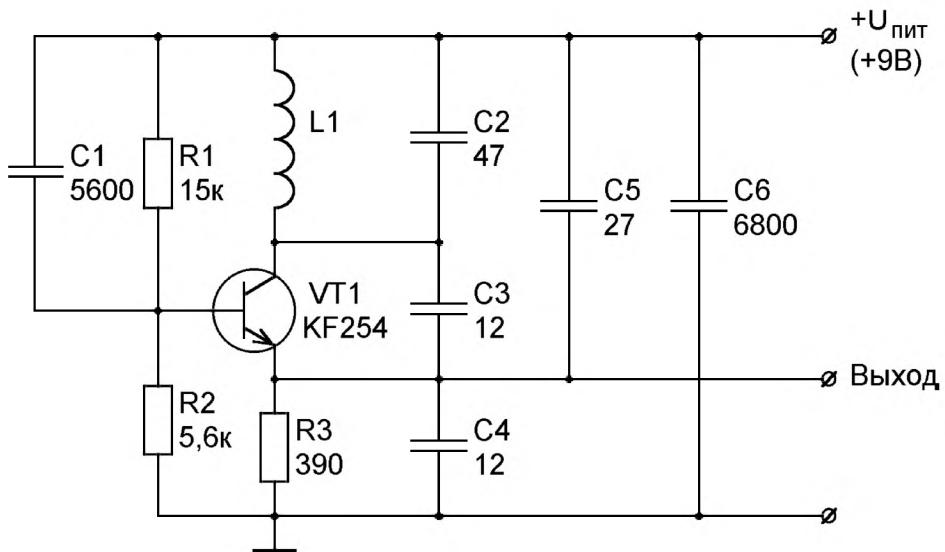


Рис. 3.8. Принципиальная схема LC-генератора с усовершенствованным емкостным делителем

В данном случае транзистор VT1 по постоянному току включен также по схеме с общим эмиттером. Как и в рассмотренной ранее схеме, положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R1 и R2. Эти же резисторы совместно с резистором R3 образуют схему стабилизации положения рабочей точки. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор С1.

Высокочастотные колебания возникают в резонансном контуре, включенном по переменному току между коллектором и базой транзистора. Резонансный контур образован конденсаторами С2, С3, С4,

C5 и катушкой L1, включен в коллекторную цепь транзистора VT1. Снимаемое с емкостного делителя напряжение ОС подается во входную цепь активного элемента, а именно на эмиттер транзистора VT1, в результате чего каскад оказывается охваченным положительной обратной связью.

В рассмотренных выше схемотехнических решениях трехточечных LC-генераторов транзистор активного элемента по переменному току включен по схеме с общей базой. Однако при разработке миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов широко используются схемы, в которых транзистор активного элемента по переменному току включен по схеме с общим коллектором.

В активном элементе высокочастотного генератора, выполненном на транзисторе, включенном по схеме с общим коллектором, нагрузка подключена в цепь эмиттера транзистора, а выходное напряжение снимается с эмиттера по отношению к шине корпуса. Входное сопротивление такого каскада, часто называемого эмиттерным повторителем, в десятки раз выше, чем у каскада с общим эмиттером, а выходное сопротивление, наоборот, сравнительно мало. Помимо этого коэффициент усиления по току у эмиттерного повторителя почти такой же, как и у каскада по схеме с общим эмиттером. Однако коэффициент усиления по напряжению близок к единице, причем всегда меньше ее. Необходимо отметить, что в схеме с общим коллектором отсутствует фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами.

Расчеты показывают, что практическая реализация LC-генератора по схеме емкостной трехточки при включении транзистора по переменному току по схеме с общим коллектором представляет определенные трудности вследствие сравнительно малой индуктивности катушки резонансного контура (до единиц нГн). Поэтому при разработке ВЧ-генераторов малогабаритных транзисторных радиопередающих устройств часто используется схемотехническое решение, основанное на замене катушки с малой индуктивностью последовательно включенными конденсатором и катушкой индуктивности. При этом на рабочей частоте комплексное сопротивление этого последовательного колебательного контура должно быть таким же, как и у катушки в классической схеме трехточки. Впервые использовать последовательный колебательный контур в LC-генераторе по схеме емкостной трехточки предложил в 1948 году американский изобретатель Джеймс Клапп (James Clapp), поэтому часто такую схему называют схемой Клаппа. Отличительной особенно-

стью LC-генераторов, выполненных по схеме Клаппа, является сравнительно высокая стабильность частоты.

Принципиальная схема одного из вариантов LC-генератора, выполненного по схеме Клаппа на биполярном транзисторе, включенном по переменному току по схеме с общим коллектором, приведена на рис. 3.9.

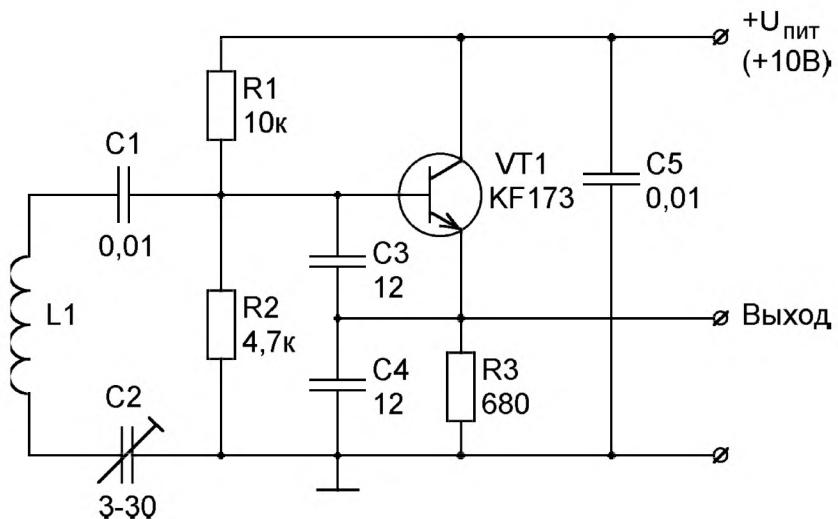


Рис. 3.9. Принципиальная схема LC-генератора по схеме Клаппа

По постоянному току транзистор VT1 в данной схеме включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R1 и R2. Эти же резисторы совместно с резистором R3 образуют мостовую схему стабилизации положения рабочей точки. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общим коллектором, поскольку по высокой частоте его коллектор заземлен через шунтирующий конденсатор C5.

Последовательный колебательный контур в данной схеме образован катушкой L1 и конденсатором C2. Параллельно этому контуру включены конденсаторы C3 и C4, образующие емкостной делитель. Коэффициент передачи цепи обратной связи или глубина обратной связи зависит как от величин емкостей указанных конденсаторов, так и от соотношения этих значений. Таким образом, селективный элемент включен между эмиттером (выход активного элемента) и базой (вход активного элемента) транзистора VT1. Формируемый генератором сигнал синусоидальной формы снимается с эмиттера транзистора.

На частоте резонанса через последовательный контур протекает наибольший ток (ток резонанса). Если емкость конденсаторов С3 и С4 будет велика, то их реактивное сопротивление будет сравнительно мало. В результате падение напряжения на них, инициированное протекающим через эти конденсаторы током резонанса, также будет мало. В этом случае связь активного элемента с резонансным контуром минимальна, поскольку по высокой частоте цепочка конденсаторов С3 и С4 представляет собой практически короткозамкнутую цепь.

При уменьшении величин емкостей конденсаторов С3 и С4 падение напряжения на них возрастает, соответственно увеличивается связь между активным элементом и резонансным контуром. При определенном значении реактивного сопротивления конденсаторов связь между эмиттером транзистора VT1 и его базой станет достаточной для того, чтобы каскад начал работать в режиме генерации высокочастотных колебаний.

Как уже отмечалось, в рассматриваемом генераторе транзистор VT1 по переменному току включен по схеме с общим коллектором, для которой характерны большое входное и малое выходное сопротивления. Из схемы видно, что величина входного сопротивления каскада между резонансным контуром и цепью базы транзистора VT1 определяется величиной емкости конденсатора С3. Величина выходного сопротивления между цепью эмиттера транзистора VT1 и резонансным контуром, в свою очередь, определяется величиной емкости конденсатора С4.

Параметры данного генератора зависят не только от величин емкостей конденсаторов С3 и С4, но и от соотношения этих величин. Срыв генерации весьма вероятен при слишком большой емкости конденсатора С3, однако при ее уменьшении режим генерации восстанавливается. Поэтому в данной схеме для достижения стабильности работы в режиме генерации значениям емкостей конденсаторов С3 и С4 следует уделить особое внимание. На практике в радиолюбительских условиях величины емкостей конденсаторов С1 и С2, а также их соотношение рекомендуется подбирать экспериментально. Не следует забывать о том, что при замене резистора R3 дросселем (с целью снижения величины питающего напряжения) емкость конденсатора С4 следует увеличить так, чтобы уменьшить связь между цепью эмиттера транзистора VT1 и резонансным контуром.

Естественно, стабильная работа генератора обеспечивается соответствующим режимом работы, определяемым правильным выбором положения рабочей точки транзистора активного элемента.

Обычно для ее стабилизации используется мостовая схема, которую в данном случае образуют резисторы R1, R2 и R3.

В некоторых случаях между резонансным контуром и базой транзистора VT1 включается конденсатор C1 сравнительно большой емкости. Малое реактивное сопротивление этого конденсатора не влияет на частоту генерации. В то же время применение этого конденсатора обеспечивает отделение базы транзистора VT1 от резонансного контура по постоянному току. В результате возможное краткое замыкание между обкладками конденсатора C2 не влияет на положение рабочей точки транзистора.

В рассматриваемой схеме значение резонансной частоты генератора определяется не только параметрами элементов, входящих в состав резонансного контура, но и параметрами реактивного сопротивления подключаемой к резонансному контуру нагрузки. В данном случае речь идет о транзисторе VT1 и цепях его обвязки. Поэтому желательно добиваться минимального влияния цепей обратной связи на контур, а также выбирать транзистор с соответствующими параметрами.

Естественно, чем меньше глубина обратной связи, тем меньше влияние нагрузки на резонансный контур. Поэтому в процессе налаживания параметры элементов цепи обратной связи, определяющие коэффициент передачи цепи ПОС, следует выбирать так, чтобы при возможно минимальной глубине обратной связи генерация была устойчивой, в том числе и при неблагоприятных условиях работы транзистора. На практике величины емкостей конденсаторов C3 и C4 выбирают как можно большими, а емкость конденсатора C2 – как можно меньшей, то есть минимально необходимой для возникновения колебаний.

При перестройке резонансного контура с целью изменения рабочей частоты генератора изменяется и коэффициент передачи цепи обратной связи, зависящий от параметров конденсаторов C3 и C4. Например, с возрастанием резонансной частоты глубина обратной связи уменьшается, поскольку емкостное сопротивление этих конденсаторов уменьшается. В результате уменьшается и напряжение, необходимое для поддержки соответствующего уровня глубины ОС. Поэтому главным признаком качества созданной конструкции генератора является равномерное выходное напряжение во всем диапазоне перестраиваемых частот.

При выборе коэффициента передачи цепи ПОС особое внимание также следует обратить на форму генерируемого сигнала. Слишком

глубокая обратная связь приведет к искажениям синусоидальной формы выходного сигнала, что, в свою очередь, является причиной появления нежелательных гармоник. Помимо этого на форму сигнала оказывает влияние и неудачный выбор рабочей точки транзистора VT1. Не следует забывать о том, что транзистор следует выбирать с максимальным коэффициентом усиления и граничной частотой.

Рабочая частота рассматриваемого LC-генератора по схеме Клаппа составит около 100 МГц при использовании бескаркасной катушки L1, содержащей 7 витков провода диаметром 0,8 мм, которые наматываются на оправку диаметром 10 мм. Вместо переменного конденсатора C2 рекомендуется включить подстроечный конденсатор той же емкости. При напряжении питания 10 В коллекторный ток транзистора VT1 типа KF173 составляет примерно 5 мА. При использовании других высокочастотных транзисторов рекомендуется подобрать положение рабочей точки.

На форму выходного сигнала LC-генератора, выполненного по схеме Клаппа, значительное влияние оказывает и входное сопротивление последующего каскада. Даже его малая величина воздействует на резонансный контур как дополнительное реактивное сопротивление, поскольку даже незначительное увеличение тока на выходе транзистора VT1 приводит к увеличению тока на его выходе. В результате изменяется режим работы резонансного контура, что приводит к ухудшению его добротности. Поэтому подключать, например, умножитель частоты или усилительный каскад к выходу такого генератора непосредственно, без буферного каскада, не рекомендуется.

## **LC-генераторы на полевых транзисторах**

В рассмотренных ранее схемотехнических решениях LC-генераторов в качестве активного элемента использовался биполярный транзистор. Однако при разработке миниатюрных радиопередатчиков и радиомикрофонов широко применяются схемы активных элементов, выполненных на полевых транзисторах. Главное достоинство полевых транзисторов, часто называемых канальными или униполярными, заключается в высоком входном сопротивлении, соизмеримом с входным сопротивлением электронных ламп. Особую группу составляют полевые транзисторы с изолированным затвором.

По переменному току полевой транзистор активного элемента высокочастотного генератора может быть включен с общим исто-

ком, с общим затвором или с общим стоком. При разработке микропередатчиков чаще используются схемотехнические решения, в которых полевой транзистор по переменному току включен по схеме с общим стоком. Такая схема включения полевого транзистора аналогична схеме включения с общим коллектором для биполярного транзистора. В активном элементе, выполненном на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим стоком, нагрузка подключена в цепь истока транзистора, а выходное напряжение снимается с истока по отношению к шине корпуса.

Коэффициент усиления по напряжению такого каскада, часто называемого истоковым повторителем, близок к единице, то есть выходное напряжение практически равно входному. При этом фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами отсутствует. Истоковые повторители отличает сравнительно небольшое входное сопротивление при повышенном входном сопротивлении. Помимо этого для таких каскадов характерна малая входная емкость, что приводит к увеличению входного сопротивления на высоких частотах.

Одним из критерииев классификации LC-генераторов на полевых транзисторах, как и генераторов на биполярных транзисторах, является схемотехническое решение цепи положительной обратной связи. В зависимости от примененной схемы цепи ПОС такие генераторы делятся на генераторы с индуктивной связью, с емкостной связью и трехточечные генераторы (так называемые трехточки). В генераторах с индуктивной связью цепь положительной обратной связи между входным и выходным электродами транзистора образована индуктивной связью, а в генераторах с емкостной связью – емкостной. В трехточечных ВЧ-генераторах, которые в свою очередь делятся на индуктивные и емкостные трехточки, резонансный контур подключен к активному элементу в трех точках.

Следует признать, что при разработке высокочастотных генераторов для миниатюрных радиопередающих устройств особой популярностью пользуются схемотехнические решения с полевыми транзисторами, основанные на применении индуктивной трехточки (схема Хартли). Дело в том, что на высоких частотах комплексное входное сопротивление полевого транзистора велико. Поэтому транзистор практически не шунтирует резонансный контур, то есть не оказывает никакого влияния на его параметры. Принципиальная схема одного из вариантов высокочастотного LC-генератора, выполненного по схеме Хартли на полевом транзисторе, включенном по переменному току по схеме с общим стоком, приведена на рис. 3.10.

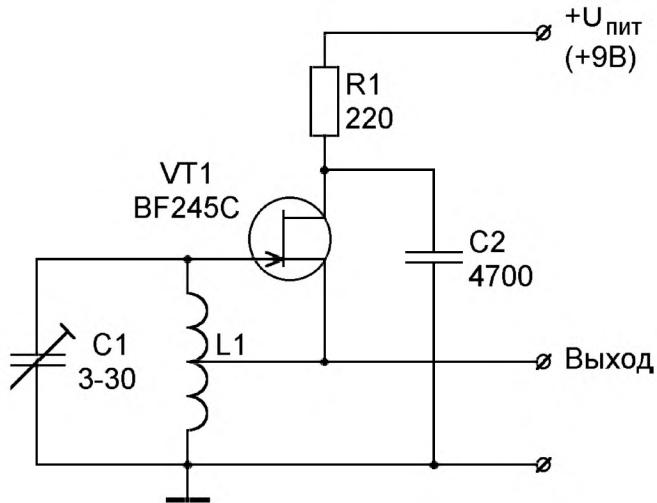


Рис. 3. 10. Принципиальная схема LC-генератора на полевом транзисторе по схеме Хартли

В рассматриваемой схеме активный элемент LC-генератора выполнен на полевом транзисторе VT1, который по переменному току включен по схеме истокового повторителя, то есть с общим стоком. Электрод стока транзистора замкнут на шину корпуса через конденсатор C2. Резонансный контур образован включенными параллельно подстроенным конденсатором C1 и катушкой индуктивности L1, от параметров которых зависит частота генерируемых колебаний. Этот контур подключен в цепь затвора полевого транзистора VT1.

Возникшие в резонансном контуре колебания подаются на затвор транзистора VT1. При положительной полуволне входного сигнала на затвор поступает соответственно положительное напряжение, в результате чего возрастает проводимость канала, а ток стока растет. При отрицательной полуволне колебания на затвор поступает соответственно отрицательное напряжение, в результате чего проводимость канала снижается, а ток стока уменьшается. Снимаемое с электрода истока транзистора VT1 напряжение подается в резонансный контур, а именно на вывод катушки L1, которая по отношению к истоку транзистора включена по схеме повышающего автотрансформатора. Такое включение позволяет увеличить коэффициент передачи цепи положительной обратной связи до необходимого уровня, то есть обеспечивает соблюдение условия баланса амплитуд. Выполнение условия баланса фаз обеспечивается включением транзистора VT1 по схеме с общим стоком.

Соблюдение условий баланса амплитуд и баланса фаз приводит к возникновению устойчивых колебаний на частоте резонанса колебательного контура. При этом частота генерируемого сигнала может

изменяться с помощью подстроечного конденсатора С1 колебательного контура. Выходной сигнал, формируемый генератором, снимается с электрода истока полевого транзистора VT1.

При конструировании высокочастотных генераторов для микропередатчиков нередко используются схемотехнические решения с полевыми транзисторами, основанные на применении емкостной трехточки (схема Колпитца). Принципиальная схема одного из вариантов высокочастотного LC-генератора, выполненного по схеме Колпитца на полевом транзисторе, включенном по переменному току по схеме с общим стоком, приведена на рис. 3.11.

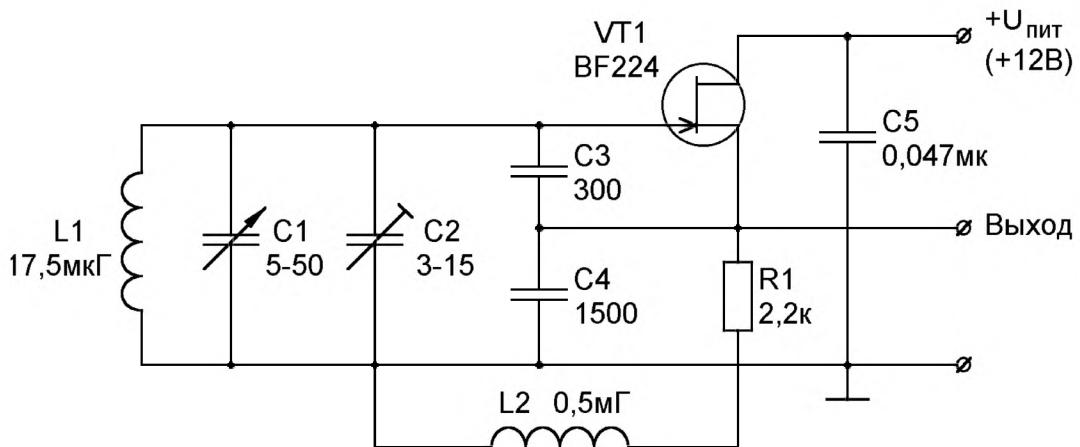


Рис. 3.11. Принципиальная схема LC-генератора на полевом транзисторе по схеме Колпитца

Активный элемент данного LC-генератора выполнен на полевом транзисторе VT1, который по переменному току включен по схеме с общим стоком. При этом электрод стока транзистора замкнут на шину корпуса через конденсатор С5. Параллельный резонансный контур образован катушкой индуктивности L1 и конденсаторами С1 – С4, от параметров которых зависит частота генерируемых колебаний. Этот контур включен в цепь затвора полевого транзистора.

Возникшие в резонансном контуре колебания подаются на затвор транзистора VT1. Снимаемое с электрода истока транзистора VT1 напряжение через цепь обратной связи подается в резонансный контур, а именно в точку соединения конденсаторов С3 и С4, образующих емкостной делитель. Выбор соответствующих величин емкостей конденсаторов С3 и С4, а также необходимого соотношения этих величин позволяет подобрать такой уровень коэффициента передачи цепи положительной обратной связи, при котором обеспе-

чиваются соблюдение условия баланса амплитуд. Выполнение условия баланса фаз обеспечивается включением транзистора VT1 по схеме с общим стоком.

Соблюдение условий баланса амплитуд и баланса фаз обеспечивает возникновение устойчивых колебаний на частоте резонанса колебательного контура. При этом частота генерируемого сигнала может изменяться с помощью конденсатора C2 (грубая настройка) и конденсатора C1 (точная настройка). Выходной сигнал частотой около 5 МГц, формируемый генератором, снимается с электрода истока полевого транзистора VT1.

### **3.3. Генераторы с кварцевой стабилизацией частоты**

Помимо генераторов с резонансными LC-контурами при разработке малогабаритной транзисторной радиопередающей аппаратуры широко используются различные схемотехнические решения генераторов, частота которых стабилизирована кварцевым резонатором. Отличительной особенностью таких генераторов, часто называемых кварцевыми, является высокая стабильность частоты формируемого сигнала, поскольку добротность кварцевых резонаторов на несколько порядков превышает добротность обычных LC-контуров.

#### **Кварцевый резонатор в ВЧ-генераторе**

Кварцевый резонатор в настоящее время является неотъемлемой частью многих схемотехнических решений высокочастотных генераторов миниатюрных радиопередатчиков и радиомикрофонов. Использование кварцевых резонаторов обусловлено, в первую очередь, повышением требований к стабильности несущей частоты формируемого ВЧ-генератором сигнала и, соответственно, частоты сигнала, излучаемого передающим устройством.

Прежде чем перейти к рассмотрению схемотехнических решений кварцевых генераторов высокочастотного сигнала несущей частоты, применяемых в малогабаритных транзисторных радиопередающих устройствах, следует вспомнить основополагающие принципы функционирования кварцевого резонатора.

Конструктивно кварцевый резонатор представляет собой обработанную соответствующим образом пластину кварца, механически

закрепленную в специальном держателе. Главной отличительной особенностью такой кварцевой пластины являются ее пьезоэлектрические свойства, проявляющиеся в ее механической деформации под воздействием электрического поля. Этот эффект, часто называемый обратным пьезоэлектрическим эффектом, обеспечивает возникновение механических колебаний кварцевой пластины в том случае, если она будет помещена в переменное электрическое поле. При этом частота возникших механических колебаний равна частоте колебаний электрического поля. Механические колебания, в свою очередь, вызывают появление на поверхности кварцевой пластины изменяющегося соответствующим образом электрического заряда, который инициирует появление в цепи переменного тока (прямой пьезоэлектрический эффект). Величина этого тока зависит от амплитуды механических колебаний кварцевой пластины.

При приближении частоты колебаний внешнего электрического поля к собственной резонансной частоте механических колебаний кварцевой пластины амплитуда механических деформаций резко возрастает, а при совпадении этих частот становится максимальной. Максимумы амплитуды могут возникать и в том случае, когда частота колебаний внешнего электрического поля будет кратной частоте механического резонанса.

Подробное рассмотрение конструктивных особенностей, механических свойств и электрических параметров кварцевых резонаторов выходит за рамки данной книги. Дополнительную информацию заинтересованный читатель найдет в специализированной литературе и в сети Интернет. Поэтому далее приводится весьма краткая информация, касающаяся особенностей функционирования кварцевых резонаторов в транзисторных ВЧ-генераторах миниатюрных радиопередатчиков.

Кварцевый резонатор, включенный в электрическую цепь, можно представить в виде последовательного колебательного контура, в состав которого входят эквивалентная индуктивность пластины  $L_{\text{ЭКВ}}$ , ее эквивалентная емкость  $C_{\text{ЭКВ}}$ , а также сопротивление потерь  $R_{\text{ЭКВ}}$ . Эта цепочка образует так называемую динамическую ветвь. Поскольку кварцевая пластина установлена в специальном держателе, обладающем определенной статической емкостью  $C_0$ , в состав эквивалентной схемы параллельно последовательному контуру следует включить и эту емкость, которая образует так называемую статическую ветвь. Эквивалентная схема кварцевого резонатора приведена на рис. 3.12.

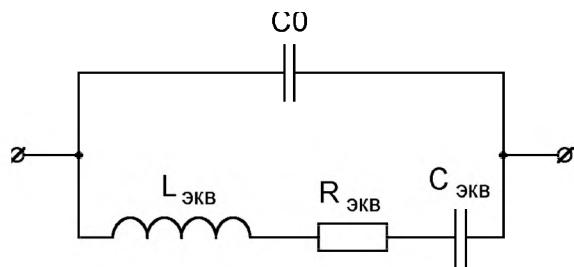


Рис. 3.12. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

Эквивалентная схема кварцевого резонатора определяет наличие двух резонансных частот. Первая из них представляет собой резонансную частоту последовательного колебательного контура (частота последовательного резонанса), значение которой рассчитывается на основании параметров входящих в его состав элементов и практически совпадает с частотой механического резонанса пластины. Наличие емкости, подключенной параллельно динамической ветви, приводит к появлению резонансной частоты параллельного колебательного контура (частота параллельного резонанса), которая выше частоты последовательного резонанса.

На частотах ниже частоты последовательного резонанса сопротивление контура имеет емкостной характер, поскольку ток контура опережает напряжение. Непосредственно на частоте последовательного резонанса сопротивление контура минимально, а ток и напряжение совпадают по фазе. На частотах, находящихся между частотами последовательного и параллельного резонансов, сопротивление эквивалентного контура имеет индуктивный характер. В результате в параллельном контуре, образованном этой индуктивностью и емкостью статической ветви, возникает параллельный резонанс на соответствующей частоте. При этом общее сопротивление контура максимально, а ток и напряжение совпадают по фазе.

На основании рассмотренных особенностей эквивалентной схемы кварцевого резонатора можно сделать вывод о том, что возможны несколько вариантов его применения в транзисторных ВЧ-генераторах малогабаритных радиопередающих устройств.

Во-первых, схемотехническое решение высокочастотного генератора может быть основано на использовании кварцевого резонатора в качестве элемента с индуктивным сопротивлением в составе резонансного контура. Обычно в таких генераторах, выполненных по трехточечной схеме и часто называемых осцилляторными, кварцевый резонатор применяется в качестве одного из реактивных сопротивлений трехточки. При этом в емкостной трехточке кварцевый

резонатор включается между коллектором и базой транзистора, а в индуктивной трехточке – либо между эмиттером и базой, либо между эмиттером и коллектором транзистора активного элемента.

Во-вторых, схемотехническое решение высокочастотного генератора может быть основано на использовании кварцевого резонатора в качестве последовательного резонансного контура. В таких генераторах, часто называемых генераторами последовательного резонанса, кварцевый резонатор включается в цепь положительной обратной связи, а его эквивалентное сопротивление имеет активный характер.

В-третьих, кварцевый резонатор может быть подключен параллельно резонансному контуру генератора. В таких схемах, часто называемых схемами с затягиванием, образуется система из двух взаимно связанных контуров. Одним из этих контуров является кварцевый резонатор, который должен работать на частоте параллельного резонатора. Следует признать, что схемотехнические решения, основанные на схемах с затягиванием, применяются сравнительно редко.

Некоторые специалисты выделяют в отдельную группу кварцевые генераторы, в которых частота генерации представляет собой одну из нечетных гармоник частоты кварцевого резонатора. Чаще всего это третья или пятая гармоника, однако иногда могут использоваться 15-я и даже 21-я гармоники. Такие генераторы называют гармониковыми.

При разработке малогабаритных транзисторных радиопередающих устройств широкое распространение получили схемотехнические решения высокочастотных генераторов первых двух групп, то есть осцилляторных генераторов и генераторов последовательного резонанса. Необходимо отметить, что в специализированной литературе и в сети Интернет можно найти большое количество конструкций, которые представляют собой модификации указанных генераторов, а их схемы лишь на первый взгляд имеют принципиально значимые отличия от основополагающих схемотехнических решений. В данном разделе будут рассмотрены особенности работы генераторов с кварцевой стабилизацией частоты, основу которых составляют лишь наиболее часто применяемые схемотехнические решения.

## **Трехточечные кварцевые генераторы**

Среди радиолюбителей, занимающихся конструированием миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов весьма популярны схемотехнические решения кварцевых ВЧ-гене-

раторов с трехточечным включением резонансного контура. В таких генераторах, как и в трехточечных LC-генераторах, подключение резонансного контура к активному элементу осуществляется в трех точках. При этом, в зависимости от схемы включения по переменному току транзистора активного элемента кварцевого трехточечного генератора возможны три основных варианта включения как индуктивной, так и емкостной трехточек: по схеме с общей базой, по схеме с общим эмиттером и по схеме с общим коллектором.

Кварцевый резонатор используется в трехточечных генераторах в качестве элемента с индуктивным характером реактивного сопротивления. Поэтому при выборе схемы генератора с емкостным делителем в цепи обратной связи (емкостная трехточка) можно добиться выполнения условий самовозбуждения без использования катушки индуктивности.

В настоящее время в миниатюрных транзисторных передатчиках чаще всего используются три типа трехточечных кварцевых генераторов, выполненных с использованием емкостного делителя в цепи ПОС. Главное отличие этих схемотехнических решений, называемых по именам их изобретателей, заключается в способе включения транзистора активного элемента по переменному току. В емкостной трехточке по схеме Пирса транзистор включен по схеме с общим эмиттером, в емкостной трехточке по схеме Колпитца – с общим коллектором, а в емкостной трехточке по схеме Клаппа – с общей базой. Упрощенные принципиальные схемы трехточечных кварцевых генераторов указанных типов приведены на рис. 3.13.

Весьма интересным представляется схемотехническое решение емкостной трехточки с включением кварцевого резонатора между

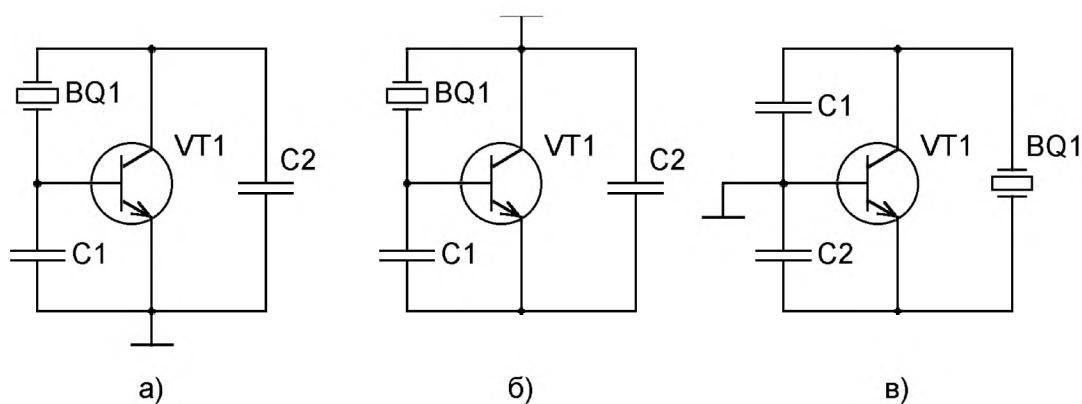


Рис. 3.13. Упрощенные принципиальные схемы кварцевых емкостных трехточек по схеме Пирса (а), по схеме Колпитца (б) и по схеме Клаппа (в)

базой и коллектором транзистора активного элемента (рис. 3.13а). Его впервые предложил американский изобретатель Джордж Пирс (Pierce), поэтому часто такая схема генератора называется схемой Пирса. Принципиальная схема высокочастотного кварцевого генератора по схеме Пирса, выполненного на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, приведена на рис. 3.14. Частота генерируемого сигнала составляет 1 МГц.

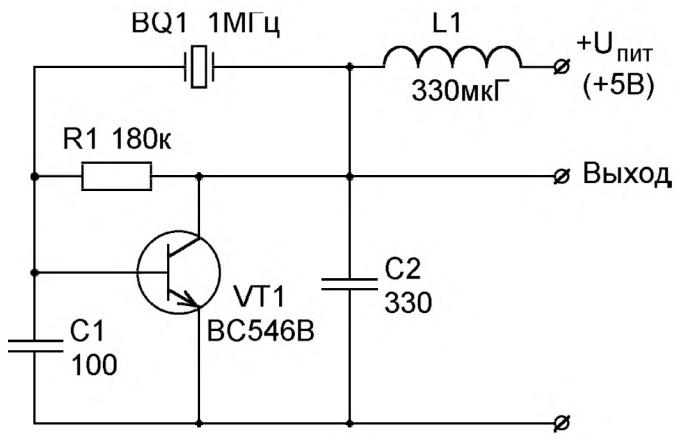


Рис. 3.14. Принципиальная схема трехточечного кварцевого генератора по схеме Пирса с частотой 1 МГц

В рассматриваемой схеме активный элемент выполнен на биполярном транзисторе VT1, который по переменному току включен по схеме с общим эмиттером. Стабилизация рабочей точки транзистора обеспечивается с помощью цепи ООС, а режим работы транзистора VT1 по постоянному току определяется величиной сопротивления резистора R1. Особенностью данной схемы является включение кварцевого резонатора BQ1 между базой и коллектором транзистора, то есть в цепи отрицательной обратной связи. При этом значение частоты генерируемых колебаний рекомендуется выбирать немного ниже частоты параллельного резонанса.

При изменении параметров конденсаторов C1 и C2 в данном генераторе можно использовать кварцевые резонаторы с большей частотой. Например, для частот от 10 МГц до 30 МГц емкость этих конденсаторов должна составлять 27 пФ. Соответственно следует уменьшить и индуктивность дроссельной катушки L1.

Отличительной особенностью кварцевых генераторов, выполненных по схеме Пирса, является сравнительно высокая стабильность частоты генерируемого высокочастотного сигнала, поскольку на добротность кварцевого резонатора параметры подключаемых к не-

му элементов практически не оказывают заметного влияния. В то же время амплитуда выходного сигнала в значительной мере зависит от стабильности положения рабочей точки транзистора. Поэтому нередко используются схемотехнические решения, в которых для стабилизации положения рабочей точки транзистора активного элемента применена и так называемая классическая мостовая схема.

Принципиальная схема высокочастотного кварцевого генератора по схеме Пирса с использованием классической схемы стабилизации положения рабочей точки транзистора, приведена на рис. 3.15. В данном случае частота генерируемого сигнала может составлять от 1 МГц до 3 МГц.

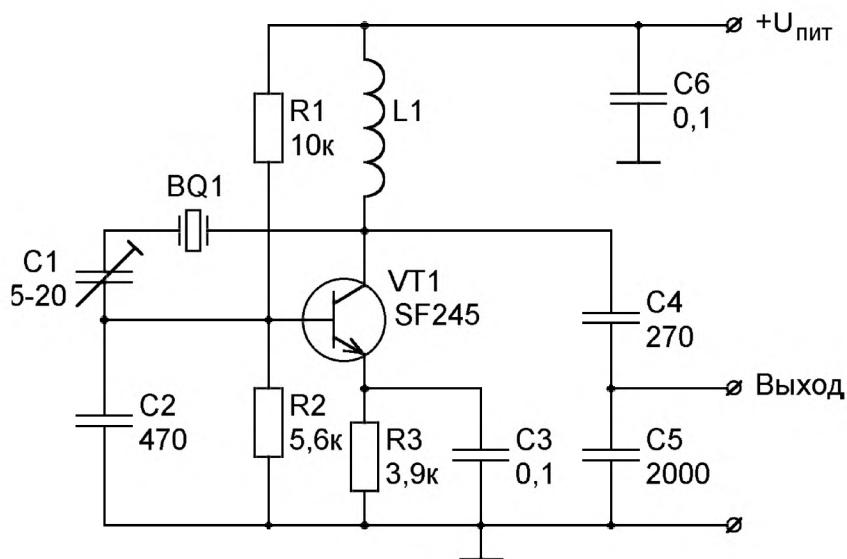


Рис. 3.15. Принципиальная схема кварцевого трехточечного генератора по схеме Пирса с частотой от 1 МГц до 3 МГц

Как и в рассмотренной ранее схеме активный элемент генератора выполнен на биполярном транзисторе VT1, который по переменному току включен по схеме с общим эмиттером. Однако в данной схеме положение рабочей точки транзистора VT1 определяется соотношением величин сопротивлений резисторов R1 и R2, образующих делитель напряжения в цепи базы транзистора. В состав мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки в данном случае помимо резисторов R1 и R2 входит резистор R3, включенный в цепь эмиттера транзистора VT1. По высокой частоте резистор R3 образует цепь положительной обратной связи, глубина которой уменьшается подключением конденсатора C3. Таким образом, стабилизация положения рабочей точки обеспечивается использованием цепи отрицательной обратной связи по току за счет подключения резистора

R3 и конденсатора C3 в цепь эмиттера транзистора VT1. Более подробно принцип действия такой цепи ООС был рассмотрен в соответствующем разделе одной из предыдущих глав.

Для того, чтобы каскад начал работать в режиме генерации колебаний, необходимо обеспечить сдвиг фазы между выходом и входом активного элемента на  $180^\circ$ . Выполнение этого условия обеспечивается соответствующим включением конденсаторов C2, C4 и C5. Емкости конденсаторов C2 и C4 следует выбирать максимально возможными, однако их величины ограничены возможностями транзистора VT1 по обеспечению самовозбуждения каскада. Поэтому в данной конструкции рекомендуется применять транзистор с максимальным усилением по току. Напомним, что рассматриваемое схемотехническое решение основано на использовании индуктивной составляющей комплексного сопротивления кварцевого резонатора BQ1, который работает в режиме, близком к режиму параллельного резонанса. Резонансную частоту в незначительных пределах можно регулировать с помощью подстроичного конденсатора C1, который включен последовательно с кварцевым резонатором BQ1.

На конденсаторах C4 и C5 собран емкостной делитель, с которого снимается выходной сигнал. Входное комплексное сопротивление активного элемента генератора определяется величиной емкости конденсатора C2, а выходное – емкостями конденсаторов C4 и C5. Емкость конденсатора C5 сравнительно велика, поэтому его емкостным сопротивлением в данном случае можно пренебречь. Этот конденсатор обеспечивает благоприятные условия для снятия выходного сигнала с коллектора транзистора VT1.

Необходимо отметить, что в случае, если напряжение источника питания достаточно велико, высокочастотный дроссель L1 в цепи коллектора транзистора можно заменить обычным резистором.

Данное схемотехническое решение практически без каких-либо изменений можно использовать при построении генератора с более высокой рабочей частотой. Например, при использовании кварцевого резонатора BQ1, имеющего частоту от 3 МГц до 10 МГц емкость конденсатора C1 должна быть уменьшена до 330 пФ, емкость конденсатора C2 – до 150 пФ, а емкость конденсатора C4 – до 1500 пФ. При использовании кварцевого резонатора BQ1, имеющего частоту от 10 МГц до 30 МГц емкость конденсатора C1 должна быть уменьшена до 180 пФ, емкость конденсатора C2 – до 47 пФ, а емкость конденсатора C4 – до 330 пФ.

Для получения более высоких значений частот сигнала используются схемотехнические решения так называемых гармониковых

генераторов по схеме Пирса, в которых частота генерации представляет собой одну из нечетных гармоник частоты кварцевого резонатора. Чаще всего это третья, пятая или седьмая гармоники. Однако рассмотрение таких схем выходит за рамки данной книги.

Генераторы Пирса вполне заслуженно считаются генераторами с наилучшей кратковременной стабильностью частоты. Однако недостатком таких схем является сравнительная сложность. К тому же особое внимание следует уделять качественной стабилизации базового тока транзистора. Недостатком генераторов по схеме Пирса можно считать и то, что ни один из выводов кварцевого резонатора не подключен к шине корпуса.

При разработке транзисторных микропередатчиков и радиомикрофонов нередко используется схемотехническое решение трехточечного кварцевого генератора, в котором транзистор активного элемента по переменному току включен по схеме с общим коллектором. При этом кварцевый резонатор, имеющий индуктивный характер реактивного сопротивления, входит в состав параллельного резонансного контура в качестве индуктивной ветви. Емкостная ветвь этого контура образована двумя включенными последовательно конденсаторами, в точку соединения которых подается сигнал с выхода активного элемента (рис. 3.13б). В результате конденсаторы образуют емкостной делитель в цепи положительной обратной связи, поэтому такую схему кварцевого генератора часто называют схемой Колпитца. Принципиальная схема кварцевого трехточечного генератора по схеме Колпитца приведена на рис. 3.16. Частота ге-

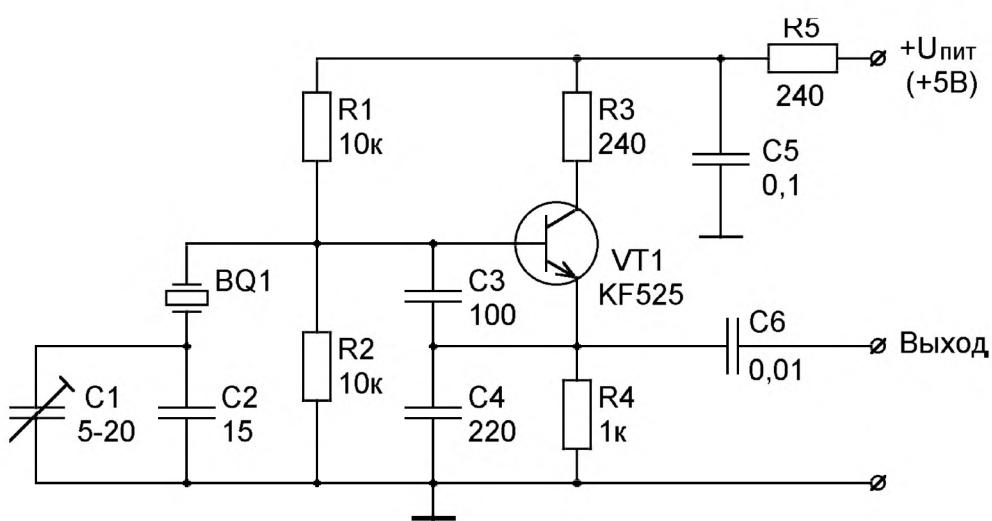


Рис. 3.16. Принципиальная схема кварцевого трехточечного генератора по схеме Колпитца с частотой от 10 МГц до 25 МГц

нерируемого сигнала может составлять от 10 МГц до 25 МГц при выходном эффективном напряжении от 200 мВ до 300 мВ.

В рассматриваемой конструкции транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивлений резисторов R1 и R2, образующих делитель напряжения. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общим коллектором, поскольку по высокой частоте его коллектор заземлен через конденсатор C5 сравнительно большой емкости.

Высокочастотные колебания возникают в колебательном контуре, включенном по переменному току между базой транзистора VT1 и шиной корпуса. Резонансный контур образован кварцевым резонатором BQ1 и конденсаторами C1, C2, C3 и C4. Сигнал, сформированный в эмиттерной цепи транзистора VT1, то есть на выходе активного элемента, подается на емкостной делитель, образованный конденсаторами C3 и C4, входящий в состав резонансного контура. Снимаемое с емкостного делителя напряжение подается во входную цепь активного элемента, а именно на базу транзистора VT1, в результате чего каскад оказывается охваченным положительной обратной связью. Величина напряжения ОС, и, соответственно, глубина обратной связи, определяется соотношением величин емкостей конденсаторов C3 и C4.

Необходимо отметить, что при стабилизации положения рабочей точки транзистора VT1 указанным способом, то есть с помощью мостовой схемы, в состав которой входят резисторы R1, R2 и R4, резисторный делитель оказывает заметное влияние на добротность кварцевого резонатора BQ1. Это влияние объясняется тем, что при сравнительно высоком входном сопротивлении транзистора элементы указанного делителя выступают в качестве дополнительной нагрузки пьезоэлектрического элемента. В результате уменьшение добротности кварцевого резонатора может привести к ухудшению параметров всего каскада. Решить данную проблему можно либо выбором возможно больших величин сопротивлений резисторов делителя, либо применением более простых схем стабилизации положения рабочей точки транзистора (без резисторного делителя). Однако во втором случае, скорее всего, стабильность положения рабочей точки будет хуже.

Емкость конденсаторов C3 и C4, которые используются в емкостном делителе, следует выбирать возможно большей, особенно если в качестве активного элемента каскада применяется транзистор

с менее качественными высокочастотными параметрами. При этом емкость конденсатора  $C_4$  в выходной цепи обычно выбирается в 2–3 раза большей, чем емкость конденсатора  $C_3$ . Высокая суммарная емкость позволяет последовательно с кварцевым резонатором включить цепочку из двух включенных параллельно конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Подстроечный конденсатор обеспечивает возможность регулировки рабочей частоты генератора в незначительных пределах.

Рассмотренное схемотехническое решение может стать основой транзисторного генератора с выходной частотой до 100 МГц. Однако в этом случае рекомендуется использовать гармонические составляющие основной частоты генерации. К достоинствам схемы Колпитца следует отнести и то, что один из выводов кварцевого резонатора  $BQ1$  при необходимости может быть подключен непосредственно к шине корпуса. Для этого достаточно исключить из схемы конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ .

Не менее интересным представляется схемотехническое решение емкостной трехточки с включением кварцевого резонатора между эмиттером и коллектором транзистора активного элемента (рис. 3.13в). Такую схему часто называют схемой Клаппа. Принципиальная схема кварцевого трехточечного генератора по схеме Клаппа приведена на рис. 3.17.

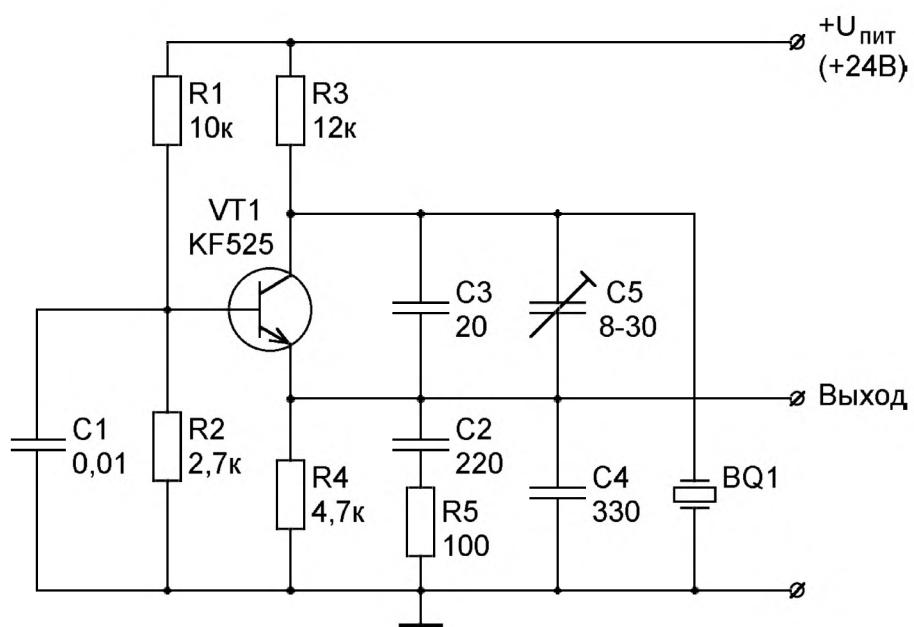


Рис. 3.17. Принципиальная схема кварцевого генератора с включением транзистора по схеме с общей базой (схема Клаппа)

Транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивлений резисторов R1 и R2, образующих делитель напряжения. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C1 сравнительно большой емкости. Стабилизация положения рабочей точки транзистора VT1 обеспечивается мостовой схемой, в состав которой помимо резисторов R1 и R2 входит резистор R4 в цепи эмиттера транзистора.

Кварцевый резонатор BQ1 включен в выходной цепи активного элемента, между коллектором транзистора VT1 и шиной корпуса. Связь выходной и входной цепей активного элемента обеспечивается включением между коллектором и эмиттером транзистора VT1 емкостного делителя, образованного конденсаторами C3 и C4. Емкости этих конденсаторов следует выбирать максимально возможными, однако не следует забывать о том, что одновременно с их увеличением уменьшается глубина обратной связи, что приводит к ухудшению режима работы кварцевого резонатора BQ1. В данном случае емкостной делитель подключен параллельно резонатору, поэтому его общее емкостное сопротивление должно быть хотя бы в два раза больше, чем внутреннее сопротивление резонатора, для того, чтобы обратная связь имела достаточную глубину. При необходимости величины емкостей конденсаторов C3 и C4 можно уменьшить. Параллельно конденсатору C3 рекомендуется подключить подстроечный конденсатор C5.

Из схемы видно, что для достижения высокого выходного сопротивления каскада величина сопротивления резистора R3 в цепи коллектора транзистора VT1 должна быть большой. Однако реализация этого условия довольно сложна, поскольку одновременно необходимо обеспечить стабильный режим работы транзистора. В этом заключается один из недостатков рассматриваемого схемотехнического решения. Тем не менее, при соблюдении определенного компромисса можно сконструировать генератор с весьма приемлемыми параметрами.

При выборе величины сопротивления резистора R3 не следует забывать о том, что его малое значение одновременно с уменьшением выходного сопротивления каскада приводит к уменьшению добротности кварцевого резонатора, который работает в режиме параллельного резонанса. Увеличить сопротивление резистора R3 можно за счет увеличения напряжения источника питания. При низком на-

пряжении питания вместо резистора R3 рекомендуется включить дроссель.

## Генераторы последовательного резонанса

Схемотехническое решение высокочастотного кварцевого генератора может быть основано на применении кварцевого резонатора в качестве элемента цепи положительной обратной связи. В таких генераторах, часто называемых генераторами последовательного резонанса, кварцевый резонатор используется как последовательный резонансный контур и работает на частотах, близких к частоте последовательного резонанса. При этом эквивалентное сопротивление кварцевого резонатора имеет активный характер.

В настоящее время известно несколько основных схемотехнических решений кварцевых генераторов последовательного резонанса, каждое из которых имеет свои достоинства и недостатки. Среди таких схем следует отметить генераторы по схемам Батлера (Butler) и по схеме Хегнера (Hegner). При этом генераторы последовательного резонанса по схеме Батлера могут быть выполнены как на одном, так и на двух транзисторах.

Упрощенная принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера на двух транзисторах приведена на рис. 3.18. Главной особенностью данного схемотехнического решения является включение кварцевого резонатора BQ1 в цепь положительной обратной связи между эмиттерами транзисторов VT1 и VT2.

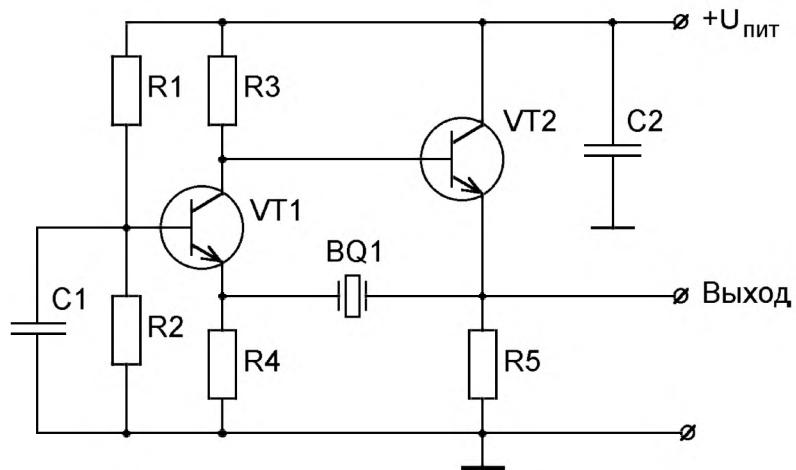


Рис. 3.18. Упрощенная принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера на двух транзисторах

Упрощенная принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера на одном транзисторе приведена на рис. 3.19. В этом случае транзистор VT1 по переменному току включен по схеме с общей базой. Особенностью этого схемотехнического решения является включение кварцевого резонатора BQ1 в цепь положительной обратной связи между коллектором и эмиттером транзистора VT1.

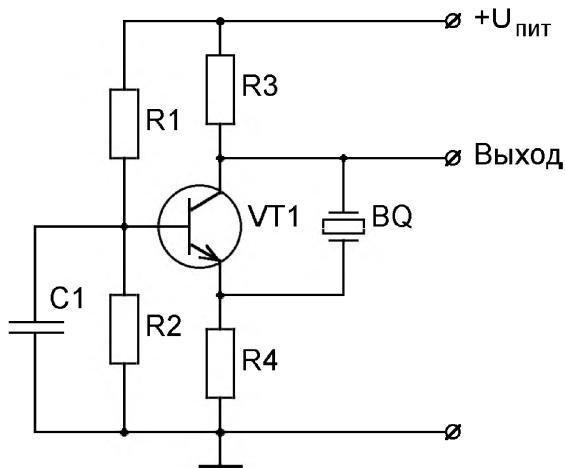


Рис. 3.19. Упрощенная принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера на одном транзисторе

Упрощенная принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Хегнера приведена на рис. 3.20. Главной особенностью рассматриваемой схемы является включение

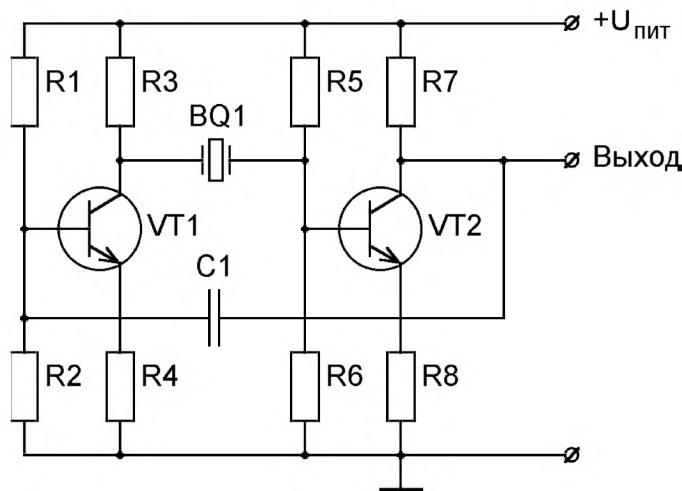


Рис. 3.20. Упрощенная принципиальная схема кварцевого генераторов последовательного резонанса по схеме Хегнера

кварцевого резонатора BQ1 в цепь положительной обратной связи между коллектором транзистора VT2 и базой транзистора VT1.

Следует признать, что указанные схемотехнические решения сравнительно редко применяются при разработке высокочастотных генераторов миниатюрных радиопередающих устройств. Дело в том, что более сложные схемотехнические решения генераторов с кварцевой стабилизацией частоты обычно основаны на использовании двух и более транзисторов, что ведет к усложнению схемы и увеличению количества пассивных элементов. В специализированной литературе и в сети Интернет можно найти большое количество конструкций, которые представляют собой модификации указанных схем генераторов последовательного резонанса, а их схемы лишь на первый взгляд имеют принципиально значимые отличия от основополагающих схемотехнических решений. В связи с ограниченным объемом предлагаемой книги в данном разделе будут рассмотрены особенности работы кварцевых генераторов последовательного резонанса на основе схем Батлера.

В первую очередь речь идет о схемотехническом решении кварцевого генератора по схеме Батлера, выполненного на двух транзисторах. Отличительной особенностью данной схемы транзисторного ВЧ-генератора, характеризующегося качеством, надежностью и универсальностью, является включение кварцевого резонатора в цепь обратной связи между эмиттерами транзисторов. Различные модификации этой схемы широко используются при разработке генераторов с частотами от 10 МГц до 200 МГц.

Принципиальная схема одного из вариантов высокочастотного кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера, выполненного на двух транзисторах, приведена на рис. 3.21. Частота генерируемого сигнала данной конструкции составляет от 6 МГц до 30 МГц при выходном напряжении 200 мВ. Потребляемый ток при напряжении питания 9 В не превышает 3 мА, выходное сопротивление около 200 Ом.

В рассматриваемой схеме цепь положительной обратной связи образует П-образная цепочка, в состав «горизонтальной» части которой входят включенные последовательно кварцевый резонатор BQ1, подстроечный конденсатор C4 и катушка индуктивности L2, а «вертикальные» составляющие образуют резисторы R6 и R8, имеющие малые сопротивления. Цепь ПОС подключена к эмиттерам транзисторов VT1 и VT2 через разделительные конденсаторы C3 и C5. Таким образом, в рассматриваемой конструкции полные сопро-

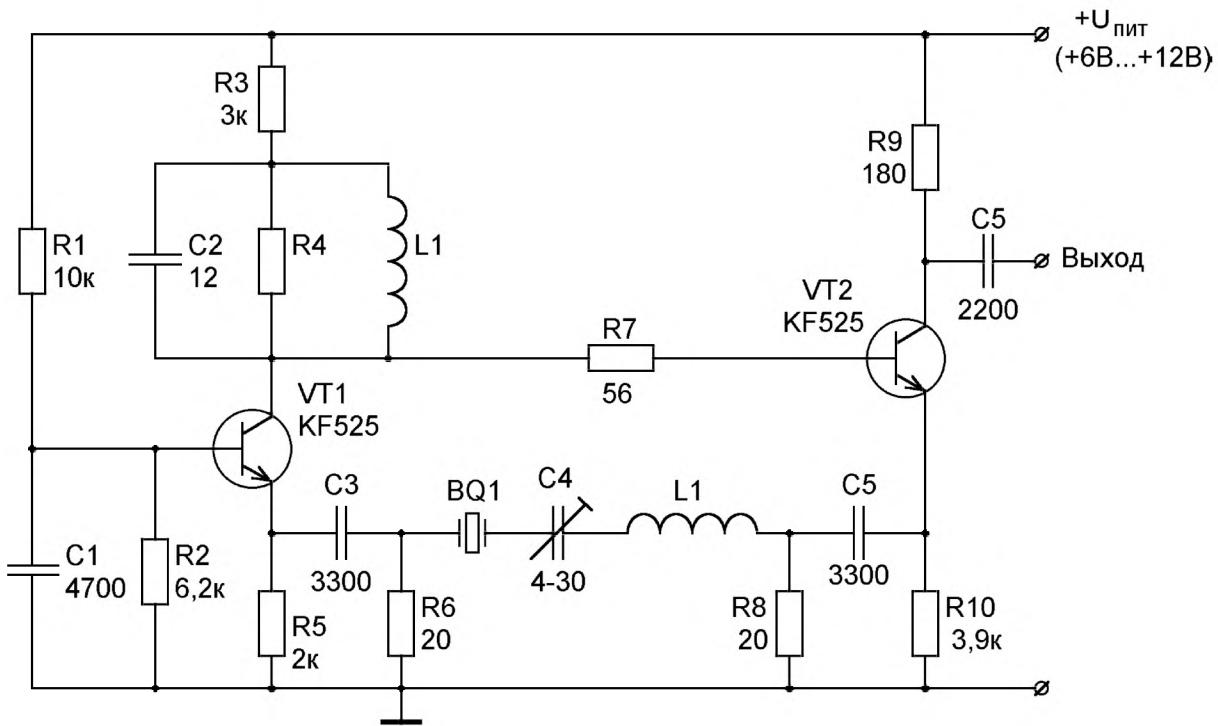


Рис. 3.21. Принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера, выполненного на двух транзисторах

тивления цепей на контактах кварцевого резонатора BQ1, который работает в режиме так называемого последовательного резонанса, малы.

Транзистор VT1 по переменному току включен по схеме с общей базой, поскольку его базовый электрод подключен к шине корпуса через конденсатор C1. Положение рабочей точки транзистора стабилизируется обычной мостовой схемой, в состав которой входят резисторы R1, R2 и R5.

При генерации на основной гармонической составляющей в качестве нагрузки в цепь коллектора транзистора VT1 включен обычный резистор. При генерации на гармонических составляющих в качестве коллекторной нагрузки используется LC резонансный контур, настроенный на частоту соответствующей гармоники. Задачей резонансного контура является коррекция фазового сдвига, необходимого при выборе той или иной гармонической составляющей. Одновременно изменяется и глубина обратной связи. Часто в цепь нагрузки параллельно LC-конттуру подключается резистор для того, чтобы снизить добротность резонансной цепи.

Сформированный на коллекторе транзистора VT1 сигнал через резистор R7 проходит на базу транзистора VT2, с эмиттера которого снимается сигнал, поступающий в цепь обратной связи. С учетом

того, что база транзистора VT2 непосредственно связана с коллектором транзистора VT1, положение его рабочей точки определяется в том числе и величиной сопротивления резистора R10. Величина сопротивления этого резистора должна быть сравнительно высокой, поскольку на коллекторе транзистора VT1 присутствует большое положительное напряжение.

Нередко при разработке кварцевых ВЧ-генераторов последовательного резонанса используются схемотехнические решения, основанные на так называемой схеме Батлера на одном транзисторе. В зарубежной специализированной литературе такие схемы часто называют схемами  $\frac{1}{2}$  Батлера. В отечественной специализированной литературе можно встретить такие названия, как, например, однокаскадные фильтровые схемы. В указанных однокаскадных генераторах транзистор активного элемента по переменному току может быть включен по схеме с общей базой или по схеме с общим коллектором.

Принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера, выполненного на одном биполярном транзисторе, включенном по схеме с общей базой, приведена на рис. 3.22. Частота генерируемого сигнала составляет 80 МГц при выходном эффективном напряжении 200 мВ на нагрузке 50 Ом. Потребляемый ток при напряжении питания 9 В не превышает 3 мА.

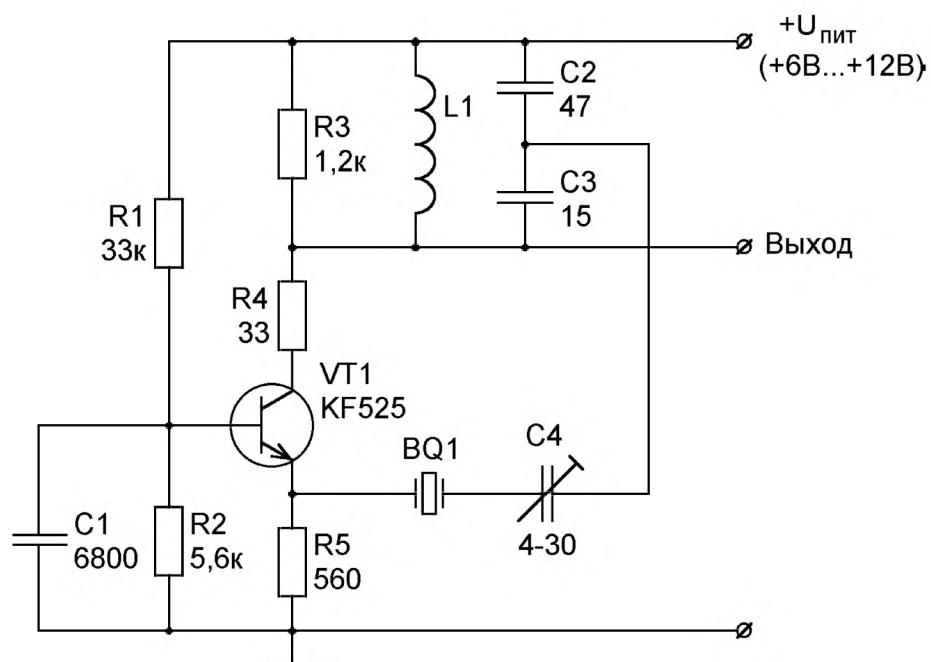


Рис. 3.22. Принципиальная схема кварцевого генератора последовательного резонанса по схеме Батлера на одном транзисторе, включенном по схеме с общей базой

Транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки этого транзистора определяется величиной сопротивлений резисторов R1 и R2, образующих делитель напряжения. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C1 сравнительно большой емкости. Стабилизация положения рабочей точки транзистора VT1 обеспечивается мостовой схемой, в состав которой помимо резисторов R1 и R2 входит и резистор R5 в цепи эмиттера транзистора VT1.

К выходу активного элемента (коллектор транзистора VT1) подключен параллельный резонансный контур, образованный катушкой индуктивности L1 и цепочкой, состоящей из последовательно включенных конденсаторов C2 и C3, образующих емкостной делитель. Снимаемый точки соединения конденсаторов C2 и C3 сигнал обратной связи через кварцевый резонатор BQ1 подается на вход активного элемента (эмиттер транзистора VT1).

В кварцевом генераторе последовательного резонанса по схеме Батлера на одном транзисторе, включенном по схеме с общей базой, сигнал обратной связи может сниматься и с соответствующего отвода катушки L1, то есть с использованием индуктивного делителя. Однако в этом случае усложняется процесс настройки генератора. Тем не менее, такое схемотехническое решение иногда применяется при создании ВЧ-генераторов на частоту генерируемого сигнала до 40 МГц.

Необходимо отметить, что при использовании схемотехнических решений ВЧ-генераторов по схемам  $\frac{1}{2}$  Батлера как с емкостным, так и с индуктивным делителем, на выходе генератора следует устанавливать буферный каскад.

В настоящее время существует большое количество вариантов схем высокочастотного кварцевого генератора по схеме Батлера на одном транзисторе, основанных как на рассмотренных, так и других схемотехнических решениях, например, с включением транзистора по схеме с общим коллектором. Однако ограниченный объем предлагаемого издания, к сожалению, не позволяет их рассмотреть. Необходимую дополнительную информацию, касающуюся вопросов схемотехники ВЧ-генераторов для миниатюрных радиопередающих устройств и радиомикрофонов, заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

<b>1</b>	Микрофоны	9
<b>2</b>	Микрофонные усилители	24
<b>3</b>	Генераторы сигнала высокой частоты	54

## **4 МОДУЛЯТОРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА**

<b>5</b>	Простые транзисторные радиопередающие устройства	131
----------	---	-----

Принцип действия радиопередатчика в общих чертах заключается в том, что поступающая на его вход полезная информация преобразуется в электрический НЧ-сигнал, который соответствующим образом изменяет генерируемый ВЧ-генератором сигнал, передаваемый через антенный тракт на выход устройства. Формирование преобразованного ВЧ-сигнала, несущего полезную информацию, осуществляется специальным каскадом, который называется модулятором и является неотъемлемой частью радиопередающих устройств, начиная от простейших любительских конструкций и заканчивая современными профессиональными радиопередатчиками.

В данной главе рассматриваются особенности схемотехнических решений модуляторов, наиболее часто используемых при разработке малогабаритных транзисторных радиопередающих устройств. Отдельные разделы посвящены принципам формирования модулированного сигнала, а также отличительным схемотехническим особенностям модуляторов сигнала высокочастотных LC-генераторов и генераторов с кварцевой стабилизацией частоты, применяемых в миниатюрных радиопередатчиках. Особое внимание уделено рассмотрению некоторых схемотехнических решений, наиболее часто используемых при разработке и создании каскадов, обеспечивающих модуляцию ВЧ-сигналов с помощью варикапов.

Подробное описание принципов функционирования модуляторов малогабаритных радиопередатчиков, к сожалению, выходит за рамки предлагаемого издания в связи с его ограниченным объемом. Поэтому принципы работы таких устройств, как и протекающие в отдельных узлах и каскадах физические процессы, рассмотрены весьма упрощенно, а приводимые далее основные понятия и определения не претендуют на академическую точность.

## **4.1. Общие сведения**

---

Прежде чем перейти к рассмотрению схемотехнических решений модуляторов, применяемых при разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств, автор считает необходимым привести некоторые основополагающие сведения, касающиеся теоретических основ модуляции высокочастотных радиосигналов.

## **Основные понятия и определения**

Главное требование, предъявляемое практически к любому радиопередающему устройству, заключается в обеспечении передачи определенной информации. Поэтому в процессе функционирования радиопередатчика предназначенная для передачи информация, поступающая на вход такого устройства, сначала преобразуется в электрический сигнал низкой частоты и, если требуется, дополнительно обрабатывается в соответствующих каскадах низкочастотного тракта (например, ограничивается и/или усиливается). Окончательно сформированный на выходе НЧ-тракта сигнал воздействует на высокочастотный сигнал, генерируемый ВЧ-генератором, и соответствующим образом изменяет один или несколько его параметров. Преобразованный ВЧ-сигнал при необходимости подвергается дополнительной обработке в соответствующих каскадах высокочастотного тракта (например, в каскадах усиления и/или умножения), после чего передается в антенный тракт.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что под модуляцией в радиотехнике понимается процесс изменения одного или нескольких параметров несущего (чаще всего высокочастотного) колебания или сигнала в соответствии с изменением параметров колебания или сигнала (чаще всего низкочастотного), содержащего подлежащую передаче информацию.

Несущее колебание, называемое модулируемым сигналом, представляет собой электромагнитный сигнал, предназначенный для образования радиочастотного сигнала с помощью модуляции. В миниатюрных транзисторных радиопередатчиках модулируемый сигнал формируется высокочастотным генератором.

Электрический сигнал низкой частоты, содержащий информацию, подлежащую передаче, называется модулирующим. Этот сигнал может быть как непрерывным, так и импульсным. В миниатюрных радиопередающих устройствах формирование непрерывного модулирующего низкочастотного сигнала осуществляется посредством преобразования звуковых колебаний или акустических сигналов с помощью специальных акусто-электрических преобразователей. Обычно в роли таких преобразователей выступают хорошо известные микрофоны различных типов, обеспечивающие преобразование энергии акустических колебаний окружающей среды в пе-

ременный электрический ток звуковой частоты. Этот сигнал, при необходимости, усиливается микрофонным усилителем.

В процессе модуляции в соответствии с изменением параметров модулирующего сигнала происходит изменение одного или нескольких параметров модулируемого сигнала. В самом простом случае при использовании как непрерывного, так и импульсного модулирующего сигнала изменяемыми параметрами модулируемого сигнала могут быть, например, его амплитуда, частота или фаза.

В радиопередающих устройствах модуляция осуществляется с помощью специального каскада, который называется модулятором и обычно имеет два входа и один выход. При этом на низкочастотный вход подается модулирующий сигнал, а на высокочастотный вход – модулируемый сигнал. Преобразованный радиосигнал, содержащий полезную информацию, снимается с выхода модулятора. Этот сигнал часто называют модулированным.

Необходимо отметить, что главной отличительной особенностью миниатюрных радиопередающих устройств является их простота, обеспечиваемая использованием при их разработке соответствующих схемотехнических решений. Поэтому в транзисторных микропередатчиках модулятор нередко состоит всего лишь из нескольких элементов. Особой популярностью пользуются схемотехнические решения, позволяющие осуществить модуляцию сигнала с помощью непосредственного воздействия модулирующего низкочастотного сигнала на параметры входящих в состав высокочастотного генератора элементов. Именно такие схемотехнические решения рассматриваются далее.

## **Виды модуляции**

В зависимости от особенностей передаваемой информации и требований, предъявляемых к качеству передачи, в настоящее время используются различные виды модуляции. Например, при использовании непрерывного модулирующего сигнала изменяемыми параметрами модулируемого сигнала могут быть его амплитуда, частота и фаза. Поэтому при обработке ВЧ-сигнала применяются соответственно амплитудная, частотная и фазовая модуляция. Если же в качестве модулирующего используется импульсный сигнал, то модулируемый сигнал может обрабатываться, соответственно, посредством, например, частотно-импульсной, фазо-импульсной или широтно-импульсной модуляции. В настоящее время широко применяется предварительное преобразование непрерывного сигнала,

несущего полезную информацию, в импульсную форму. Сформированный на выходе низкочастотного тракта импульсный сигнал используется в качестве модулирующего сигнала.

Миниатюрные радиопередатчики обычно работают в непрерывном режиме. При разработке модуляторов для таких устройств используются схемотехнические решения, позволяющие обеспечить изменение одного параметра ВЧ-сигнала, чаще всего частоты или амплитуды. Поэтому рассматриваемые в соответствующих разделах данной главы конструкции представляют собой малогабаритные транзисторные радиопередатчики с частотной или амплитудной модуляцией ВЧ-сигнала.

В режиме амплитудной модуляции высокочастотного сигнала работали первые радиовещательные станции, использовавшиеся для передачи речи и музыки. Этот вид модуляции широко используется и в настоящее время, например, для звукового радиовещания в диапазонах длинных, средних и коротких волн (ДВ, СВ и КВ), для трехпрограммного проводного вещания, а также в отдельных областях радиосвязи и телевизионного вещания. Разновидностью амплитудной модуляции является однополосная модуляция, которая, однако, практически не используется в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках.

В процессе амплитудной модуляции в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего НЧ-сигнала изменяется амплитуда модулируемого ВЧ-колебания несущей частоты. При этом частота модулируемого сигнала остается постоянной. Мгновенная амплитуда модулированного сигнала теоретически может иметь любой уровень в пределах от 0 до 100% от уровня модулируемого колебания. Однако на практике используются меньшие уровни модуляции, обычно в пределах от 30% до 50%.

Главными недостатками сигналов с амплитудной модуляцией являются их слабая помехозащищенность и сравнительно низкое качество передаваемого полезного сигнала. В то же время дальность передачи АМ-сигналов, например, в диапазонах ДВ и КВ с отражением от ионосферы, значительно больше, чем сигналов с другими видами модуляции.

Частотная модуляция высокочастотного сигнала используется, например, для передачи сигналов радиовещательных станций в диапазонах УКВ и FM, а также в радиостанциях СВ диапазона. Конечно же, частотная модуляция широко применяется и в других сферах радиотехники, например, в военной радиосвязи.

В процессе частотной модуляции в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего НЧ-сигнала изменяется частота модулируемого ВЧ-колебания. При этом амплитуда модулируемого сигнала остается постоянной. Отклонение частоты модулируемого колебания, например, у сигналов FM-диапазона обычно находится в пределах от  $\pm 50$  кГц до  $\pm 75$  кГц, а у любительских радиостанций не превышает 10 кГц.

Главными достоинствами сигналов с частотной модуляцией, по сравнению с АМ-сигналами, являются высокая помехозащищенность, меньший уровень шумов при снижении уровня модулированного сигнала, а также высокое качество передаваемого полезного сигнала.

Для передачи полезного сигнала используются и другие виды модуляции. Однако они практически не используются в миниатюрных транзисторных радиопередатчиках, поэтому их рассмотрение выходит за рамки данной книги.

## **Основные способы модуляции**

Одна из главных задач, решаемых при создании миниатюрных радиопередающих устройств и радиомикрофонов, заключается в использовании наименьшего возможного количества элементов при достижении требуемого качества передаваемого сигнала. Успешное решение этой задачи обеспечивается применением соответствующих схемотехнических решений, в том числе и при разработке модуляторов. Поэтому в транзисторных микропередатчиках модуляторы обычно весьма просты и состоят всего лишь из нескольких элементов.

При разработке радиопередающей аппаратуры профессионалы и любители используют различные схемотехнические решения модуляторов. Однако особой популярностью при разработке транзисторных микропередатчиков пользуются схемотехнические решения, позволяющие осуществить модуляцию сигнала с помощью непосредственного воздействия модулирующего низкочастотного сигнала на параметры элементов, входящих в состав высокочастотного генератора. При использовании таких схемотехнических решений как амплитудная, так и частотная модуляция высокочастотного сигнала может осуществляться несколькими способами.

Во-первых, в процессе модуляции в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего сигнала могут изменяться пара-

метры и режимы работы активного элемента ВЧ-генератора. Во-вторых, могут изменяться параметры и режимы работы селективного элемента. И, в-третьих, модулировать ВЧ-сигнал можно с помощью изменения параметров цепи положительной обратной связи. На практике в транзисторных микропередатчиках чаще всего применяются первые два способа модуляции, отдельные варианты которых и будут рассмотрены в соответствующих разделах данной главы.

Одним из основных способов осуществления модуляции ВЧ-сигнала является непосредственное воздействие модулирующего низкочастотного сигнала на параметры активного элемента, входящего в состав ВЧ-генератора. В миниатюрных транзисторных радиопередатчиках активный элемент обычно выполнен на одном транзисторе, поэтому при использовании соответствующих схемотехнических решений обеспечивается изменение параметров и режимов работы этого транзистора. Режим работы транзистора ВЧ-генератора может изменяться, например, в том случае, когда в соответствии с модулирующим сигналом изменяется напряжение питания каскада. Такой способ модуляции часто применяется для получения амплитудной модуляции ВЧ-сигнала как LC-генераторов, так и генераторов с кварцевой стабилизацией частоты. Помимо этого нередко используются схемы, в которых мгновенное значение модулирующего сигнала изменяет величину напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора, то есть влияет на положение рабочей точки транзистора. Весьма популярны схемотехнические решения, позволяющие осуществить модуляцию посредством изменения определенных параметров транзистора активного элемента, например, величины межэлектродных емкостей. Такие способы модуляции обычно применяются для получения частотной модуляции сигнала LC-генератора.

Не менее широко в радиолюбительских конструкциях транзисторных микропередатчиков применяются схемотехнические решения, обеспечивающие модуляцию посредством воздействия модулирующего НЧ-сигнала на параметры селективного элемента, который обычно представляет собой параллельный резонансный контур. Параметры такого контура могут изменяться, например, в том случае, когда в соответствии с модулирующим сигналом изменяется емкость входящих в состав контура элементов. В результате с помощью простых схем можно добиться формирования ЧМ-сигнала с весьма приемлемыми параметрами.

Особой популярностью пользуются схемотехнические решения, в которых для получения ВЧ-сигнала, модулированного по частоте, применяются специальные полупроводниковые элементы, например, варикапы. Модуляторы на варикапах применяются для получения частотной модуляции сигналов не только LC-генераторов, но и генераторов с кварцевой стабилизацией частоты.

Конечно же, в специализированной литературе и в сети Интернет можно найти немало схемотехнических решений транзисторных микропередатчиков, в которых для модуляции ВЧ-сигналов используются и другие способы. Однако рассмотрение особенностей функционирования таких устройств выходит за рамки предлагаемой книги. Поэтому в данной главе основное внимание уделено описанию простейших схем, обеспечивающих реализацию упомянутых выше способов модуляции.

Необходимо отметить, что одна из неблагоприятных особенностей приводимых далее схемотехнических решений АМ- и ЧМ-модуляторов, обусловленная их простотой, заключается в наличии так называемых паразитных модуляций. Дело в том, что при изменении определенных параметров и режимов работы отдельных элементов ВЧ-генератора с помощью простейших схем модуляции практически всегда одновременно с изменением, например, амплитуды несущего высокочастотного сигнала в соответствии с мгновенным значением сигнала, содержащего полезную информацию (амплитудная модуляция), происходит изменение частоты ВЧ-сигнала (частотная модуляция). И, наоборот, при осуществлении частотной модуляции в качестве паразитной проявляется амплитудная модуляция сигнала несущей частоты. Таким образом, при использовании одного и того же схемотехнического решения можно создать микропередатчик, с помощью которого, например, в КВ-диапазоне можно передавать АМ-сигналы, а в УКВ-диапазоне – ЧМ-сигналы. При этом выбор диапазона и, соответственно, вид модуляции зависит от параметров и номиналов элементов соответствующих каскадов, в первую очередь генератора ВЧ-сигнала.

## **4.2. Модуляция с помощью варикапа**

---

В малогабаритных транзисторных радиопередающих устройствах и радиомикрофонах для получения частотно-модулированного сигнала нередко применяются специальные полупроводниковые прибо-

ры, называемые варикапами. С их помощью можно модулировать по частоте сигналы, формируемые как LC-генераторами, так и генераторами с кварцевой стабилизацией частоты.

## **Принцип действия и основные параметры варикапа**

Варикап представляет собой разновидность полупроводникового диода, одним из основных свойств которого является зависимость так называемой барьерной емкости от приложенного к нему обратного напряжения. При этом отрицательный полюс источника напряжения должен быть подключен к положительному выводу варикапа. В процессе подачи на варикап управляющего напряжения, например, НЧ-сигнала, мгновенное значение этого сигнала вызывает соответствующее изменение величины обратного напряжения на электродах варикапа. В результате происходит и изменение его барьерной емкости. Таким образом, в схемах модуляторов варикап используется в качестве аналога конденсатора переменной емкости, управляемого не механически, а электрически, посредством изменения величины обратного напряжения.

Необходимо отметить, что в модуляторах миниатюрных радиопередатчиков нередко в качестве варикапов используются кремниевые стабилитроны при обратном напряжении, величина которого меньше напряжения стабилизации, когда обратный ток еще очень мал, и, следовательно, обратное сопротивление стабилитрона весьма велико.

Основными параметрами варикапа являются его номинальная емкость, коэффициент перекрытия по емкости в рабочем интервале напряжений, максимальная рабочая частота, добротность конденсатора, роль которого выполняет варикап, а также температурный коэффициент варикапа.

Номинальная емкость варикапа представляет его барьерную емкость при заданном напряжении смещения. На основании зависимости барьерной емкости от приложенного к выводам варикапа обратного напряжения строится так называемая вольт-фарадная характеристика варикапа, имеющая участок, форма которого близка к линейной. Для того чтобы варикап работал именно на этом участке характеристики, на его электроды следует подать исходное напряжение смещения, величина которого определяет положение рабочей точки варикапа, то есть его номинальную барьерную емкость.

Под коэффициентом перекрытия по емкости в рабочем интервале напряжений понимается отношение общих емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения. Обычно определение данного коэффициента производится для емкостей в рабочем интервале напряжений, то есть коэффициент перекрытия по емкости представляет собой отношение максимальной и минимальной емкостей варикапа.

Значение максимальной рабочей частоты определяет граничную частоту, при превышении которой основные параметры варикапа перестают соответствовать паспортным данным. Добротность конденсатора, роль которого выполняет варикап, рассчитывается как отношение реактивного сопротивления на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданной емкости варикапа или обратном напряжении. Особого внимания заслуживает температурный коэффициент варикапа, который характеризует зависимость величины его емкости от температуры окружающей среды.

Помимо указанных параметров при выборе варикапа для каскада модуляции миниатюрного радиопередатчика следует обратить внимание на такие параметры, как максимальная рассеиваемая мощность, максимально допустимое обратное постоянное напряжение, а также постоянный обратный ток при этом напряжении.

## **Основные схемы включения варикапа**

Одним из основных способов осуществления модуляции в транзисторных микропередатчиках является воздействие модулирующего НЧ-сигнала на параметры селективного элемента ВЧ-генератора. Селективный элемент обычно представляет собой резонансный контур, образованный параллельно включенными катушкой индуктивности и конденсатором. Изменение параметров входящей в состав контура катушки индуктивности в миниатюрных радиопередатчиках довольно затруднительно, поскольку соответствующие схемотехнические решения весьма сложны, а их реализация трудоемка. В то же время применение варикапа, доступного и дешевого полупроводникового элемента, емкость которого можно изменять, непосредственно подавая на его выводы модулирующее напряжение, значительно упрощает решение задачи. Поэтому схемотехнические решения модуляторов на варикапах, обеспечивающие частотную модуляцию ЧМ-сигнала с весьма приемлемыми параметрами, пользуются особой популярностью.

В транзисторных LC-генераторах варикап в качестве элемента с емкостным характером комплексного сопротивления может быть подключен к резонансному контуру как параллельно, так и последовательно.

Упрощенные принципиальные схемы включения варикапа параллельно резонансному контуру (без цепей формирования напряжения смещения варикапа) приведены на рис. 4.1. Отличительной особенностью схемотехнического решения, изображенного на рис. 4.1б, является включение варикапа вместо конденсатора параллельного резонансного контура.

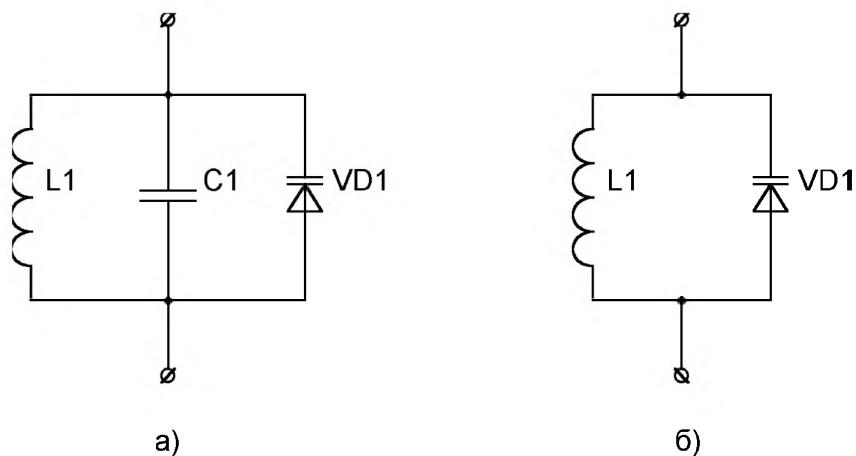


Рис. 4.1. Принципиальные схемы включения варикапа параллельно резонансному контуру (а) и вместо конденсатора резонансного контура (б)

При разработке модулятора на варикапе не следует забывать о том, что для функционирования этого полупроводникового прибора в штатном режиме на его выводы следует подавать напряжение смещения определенной величины. Поэтому в состав модулирующего каскада необходимо включить соответствующую цепь формирования напряжения смещения варикапа. Такая цепь в миниатюрных транзисторных передатчиках обычно выполняется на резисторах. Принципиальная схема параллельного колебательного контура с цепью формирования напряжения смещения варикапа приведена на рис. 4.2.

Параллельный колебательный контур образован катушкой индуктивности L1 и емкостью варикапа VD1. Резонансная частота контура может изменяться при изменении величины обратного напряжения на варикапе, которое зависит от положения движка потенциометра R2. Для того чтобы уменьшить шунтирующее влияние потенциометра R2 на добротность контура, в цепь включен резистор

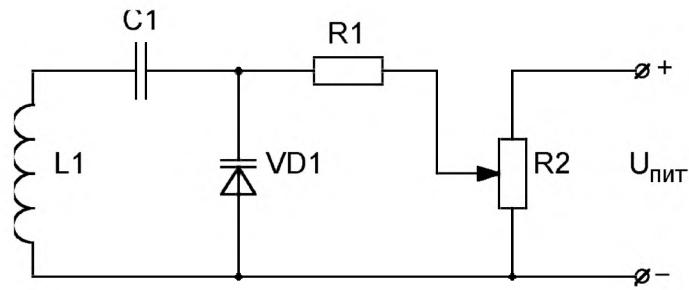


Рис. 4.2. Принципиальная схема параллельного колебательного контура с цепью формирования напряжения смещения варикапа

R1, имеющий сравнительно большое сопротивление. Также в состав цепи включен разделительный конденсатор C1, без которого варикап VD1 оказался бы замкнут накоротко через катушку L1.

Упрощенные принципиальные схемы включения варикапа последовательно с элементами резонансного контура (без цепей формирования напряжения смещения варикапа) приведены на рис. 4.3. При этом варикап может быть включен как последовательно с конденсатором контура, так и последовательно с катушкой индуктивности.

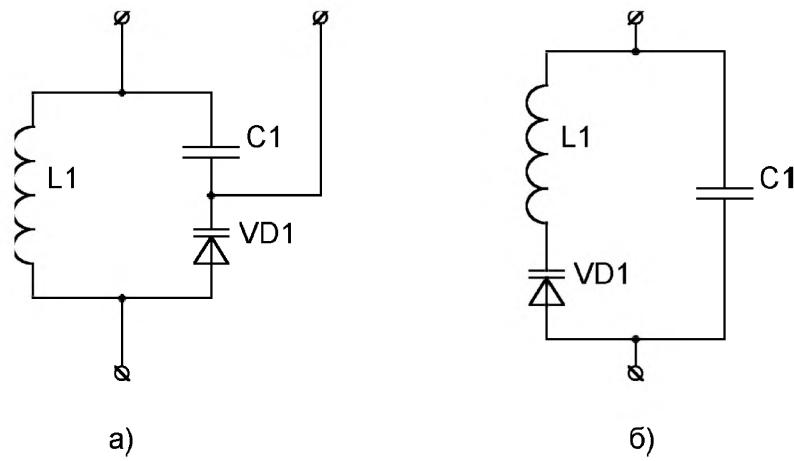


Рис. 4.3. Принципиальные схемы включения варикапа последовательно с конденсатором (а) и последовательно с катушкой индуктивности (б) контура

Помимо этого известны схемотехнические решения, в которых варикап подключается комбинированно, с частичным включением. Упрощенная принципиальная схема такого контура приведена на рис. 4.4.

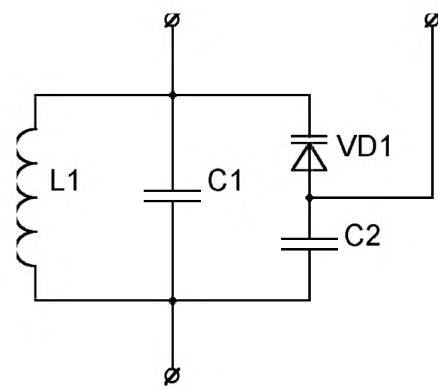


Рис. 4.4. Принципиальная схема комбинированного включения варикапа

Аналогичные схемы включения варикапа используются и в транзисторных трехточечных LC-генераторах. Широкое распространение получили схемотехнические решения, в которых варикап подключается параллельно катушке индуктивности (в индуктивных трехточках), а также параллельно одному из конденсаторов емкостного делителя ВЧ-генератора (в емкостных трехточках).

Весьма разнообразны схемотехнические решения модуляторов с применением варикапа, предназначенные для модуляции сигнала генераторов с кварцевой стабилизацией частоты. При создании таких конструкций приходится, с одной стороны, добиваться высокой стабильности частоты генератора с помощью кварцевого резонатора, а с другой – обеспечивать возможность изменения этой частоты по закону модулирующего сигнала. Обычно при разработке транзисторных микропередатчиков для ВЧ-генератора с кварцевой стабилизацией частоты выбираются осцилляторные схемы, в которых кварцевый резонатор используется в качестве элемента с индуктивным характером комплексного сопротивления в резонансном контуре. В этом случае варикап, как элемент с изменяющейся по закону модуляции емкостью, может быть подключен как последовательно, так и параллельно кварцевому резонатору.

Более подробную информацию о способах включения варикапа в контурах LC-генераторов и генераторов с кварцевой стабилизацией частоты заинтересованный читатель может найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

### 4.3. Модуляция сигнала LC-генераторов

В настоящее время в транзисторных микропередатчиках и радиомикрофонах широкое распространение получили схемотехнические решения модуляторов, в которых в процессе модуляции в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего сигнала изменяются параметры и режимы работы активного элемента ВЧ-генератора, то есть биполярного или полевого транзистора. Отдельную группу составляют схемы модуляторов с использованием варикапов, изменение емкости которых по закону модулирующего сигнала приводит к соответствующему изменению параметров селективного элемента, то есть резонансного контура. В связи с ограниченным объемом данной книги в следующих разделах будут рассмотрены лишь некоторые из наиболее популярных схемотехнических реше-

ний модуляторов ВЧ-сигнала LC-генераторов, применяемые при разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств.

## **Модуляция сигнала LC-генераторов с индуктивной и ёмкостной связью**

В применяемых в миниатюрных радиопередатчиках LC-генераторах с индуктивной положительной обратной связью для модуляции ВЧ-сигнала обычно используется простое схемотехническое решение, основанное на подаче модулирующего НЧ-сигнала непосредственно в цепь базы транзистора активного элемента. Принципиальная схема одного из вариантов подачи модулирующего сигнала на LC-генератор с индуктивной положительной обратной связью приведена на рис. 4.5.

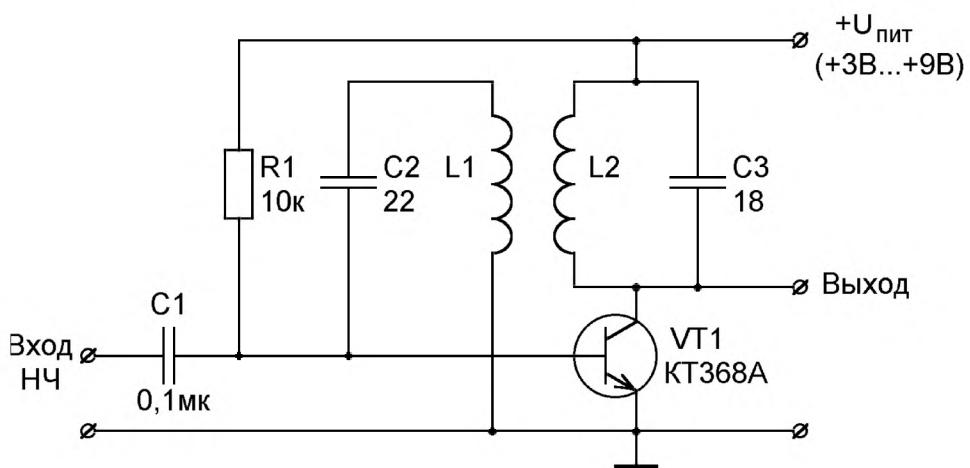


Рис. 4.5. Принципиальная схема модулятора для LC-генератора с индуктивной обратной связью

В рассматриваемой схеме транзистор VT1, на котором выполнен активный элемент ВЧ-генератора, по постоянному и переменному току включен по схеме с общим эмиттером. Положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивления резистора R1. Модулирующий НЧ-сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на базу транзистора VT1. При этом мгновенное значение модулирующего сигнала изменяет величину напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора VT1, то есть влияет на положение рабочей точки транзистора. Усиленный НЧ-сигнал, формируемый на коллекторе транзистора VT1, инициирует изменение падения напряжения на резонансном контуре, что приводит к соответствующему изменению как амплитуды, так и частоты сигнала ВЧ-генератора.

Аналогичные схемотехнические решения, основанные на подаче модулирующего НЧ-сигнала на базу транзистора активного элемента ВЧ-генератора, широко применяются для модуляции сигнала LC-генераторов с емкостной положительной обратной связью. Принципиальная схема одного из вариантов такого схемотехнического решения приведена на рис. 4.6.

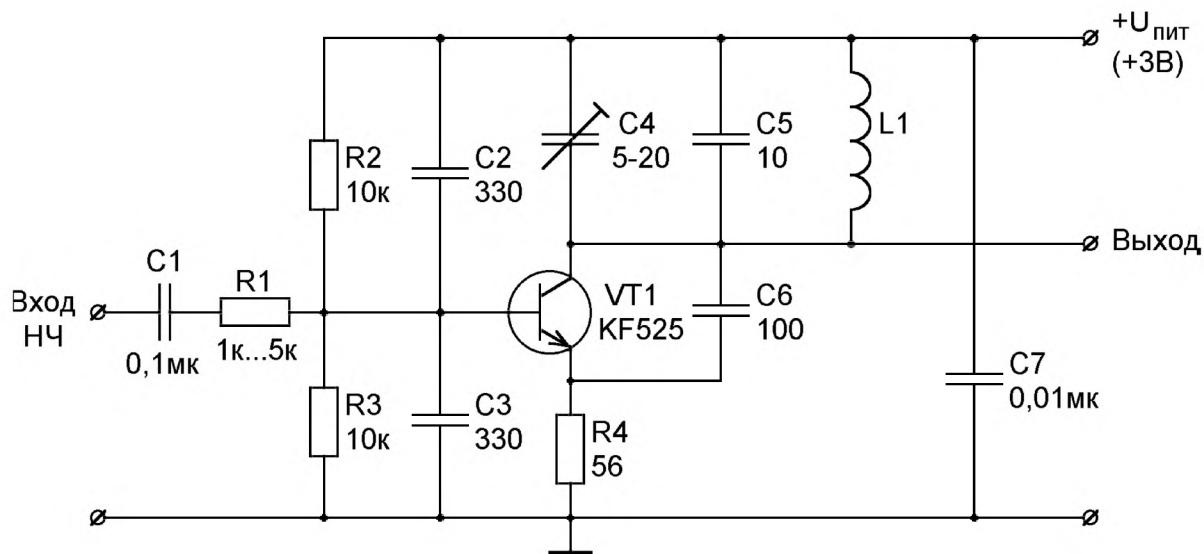


Рис. 4.6. Принципиальная схема модулятора для LC-генератора с емкостной обратной связью (вариант 1)

В данной конструкции транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. Положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений резисторов R2 и R3. В состав мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки помимо резисторов R2 и R3 входит резистор R4, включенный в цепь эмиттера транзистора VT1. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой. При этом база транзистора заземлена по высокой частоте через конденсаторы C2 и C3. Как и в рассмотренной ранее схеме, модулирующий НЧ-сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на базу транзистора VT1. Модулированный сигнал формируется на коллекторе транзистора VT1.

Принципиальная схема еще одного варианта подачи модулирующего сигнала на LC-генератор с емкостной ПОС приведена на рис. 4.7.

В отличие от рассмотренной ранее конструкции положение рабочей точки транзистора VT1 определяется величиной сопротивления резистора R1, а модулированный сигнал снимается с точки подключения конденсатора C4 цепи ОС к эмиттеру транзистора.

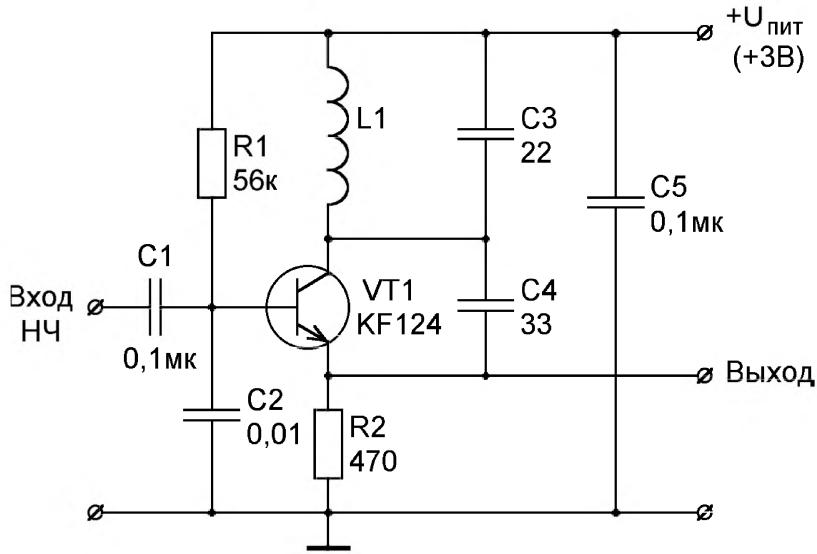


Рис. 4.7. Принципиальная схема модулятора для LC-генератора с емкостной обратной связью (вариант 2)

## **Модуляция сигнала трехточечных LC-генераторов**

Схемотехнические решения, основанные на подаче модулирующего НЧ-сигнала непосредственно в цепь базы транзистора активного элемента, широко применяются при разработке модуляторов для ВЧ-генераторов, выполненных по трехточечным схемам. Однако в миниатюрных транзисторных радиопередающих устройствах на биполярных транзисторах LC-генераторы, выполненные по индуктивной трехточечной схеме, применяются сравнительно редко. Поэтому в данном разделе рассмотрены лишь схемотехнические решения модуляторов для LC-генераторов с емкостным делителем, выполненных по схеме емкостной трехточки.

Принципиальная схема одного из вариантов подачи модулирующего сигнала на LC-генератор с емкостным делителем приведена на рис. 4.8.

В данном случае положение рабочей точки транзистора VT1, по постоянному току включенного по схеме с общим эмиттером, определяется величиной сопротивления резистора R1. По переменному току транзистор включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C2.

Модулирующий НЧ-сигнал подается на базу транзистора VT1 через разделительный конденсатор C1. В соответствии с мгновенным значением этого сигнала изменяется величина напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора VT1, то есть изменяет-

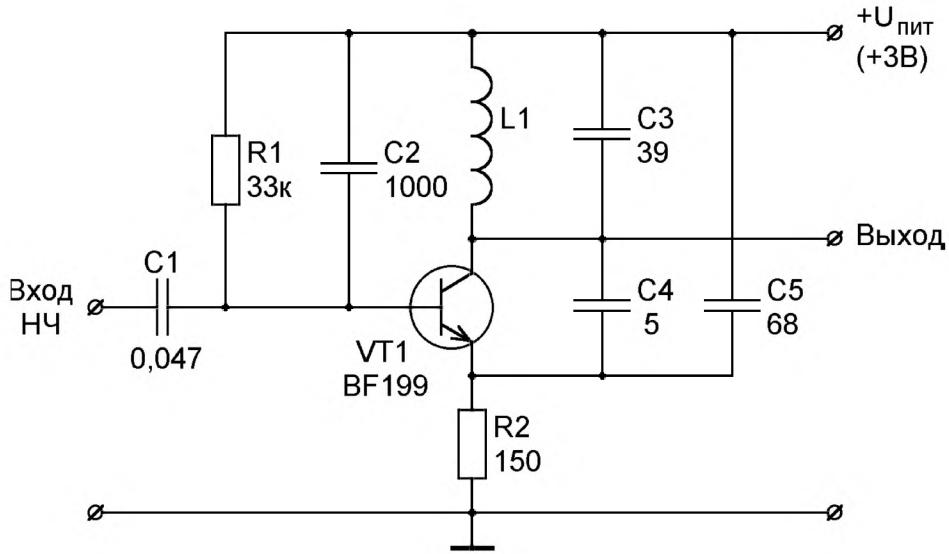


Рис. 4.8. Принципиальная схема модулятора для LC-генератора с ёмкостным делителем (вариант 1)

ся положение рабочей точки транзистора. В результате НЧ-сигнал, формируемый на коллекторе транзистора VT1, инициирует изменение падения напряжения на резонансном контуре, при этом по закону модулирующего сигнала происходит изменение амплитуды и частоты сигнала ВЧ-генератора. Таким образом, на коллекторе транзистора VT1 формируется модулированный сигнал.

Принципиальная схема еще одного варианта подачи модулирующего сигнала на LC-генератор с ёмкостным делителем приведена на рис. 4.9.

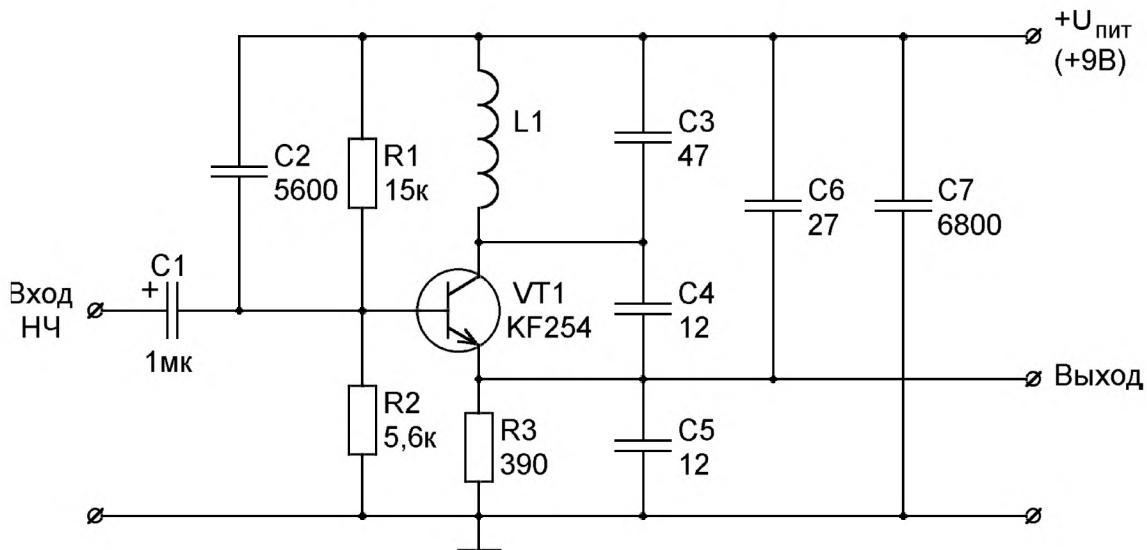


Рис. 4.9. Принципиальная схема модулятора для LC-генератора с ёмкостным делителем (вариант 1)

В этой конструкции транзистор VT1 по постоянному току включен также по схеме с общим эмиттером. Однако, в отличие от рассмотренной ранее схемы, положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R1 и R2. Эти же резисторы совместно с резистором R3 образуют схему стабилизации положения рабочей точки транзистора. Модулированный сигнал снимается с эмиттера транзистора VT1.

## **Варикапы в модуляторах LC-генераторов**

Основу рассмотренных в предыдущих разделах цепей, обеспечивающих модуляцию сигнала LC-генератора, составляют схемотехнические решения, в которых модулирующий НЧ-сигнал подается непосредственно в цепь базы транзистора активного элемента. В результате в процессе модуляции в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего сигнала изменяются параметры и режимы работы активного элемента ВЧ-генератора.

На практике при разработке миниатюрных радиопередатчиков и радиомикрофонов широко используются схемотехнические решения, основанные на модуляции высокочастотного сигнала посредством соответствующего изменения параметров селективного элемента. При этом предпочтение отдается схемам, в которых по закону модулирующего сигнала изменяется емкость варикапа, входящего в состав резонансного контура.

Принципиальная схема одного из вариантов модулятора на варикапе, обеспечивающего частотную модуляцию сигнала LC-генератора, выполненного по схеме емкостной трехточки на биполярном транзисторе р-п-р-проводимости, приведена на рис. 4.10.

В рассматриваемой схеме активный элемент LC-генератора выполнен на транзисторе VT1. Этот транзистор по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером, а по переменному току – по схеме с общей базой, поскольку электрод базы подключен к шине корпуса через конденсатор C2. Положение рабочей точки транзистора VT1 определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R3 и R4. Эти же резисторы совместно с резистором R5 образуют схему стабилизации положения рабочей точки.

Варикап VD1 подключен параллельно катушке индуктивности L1 и подстроечному конденсатору C5, которые входят в состав резонансно-

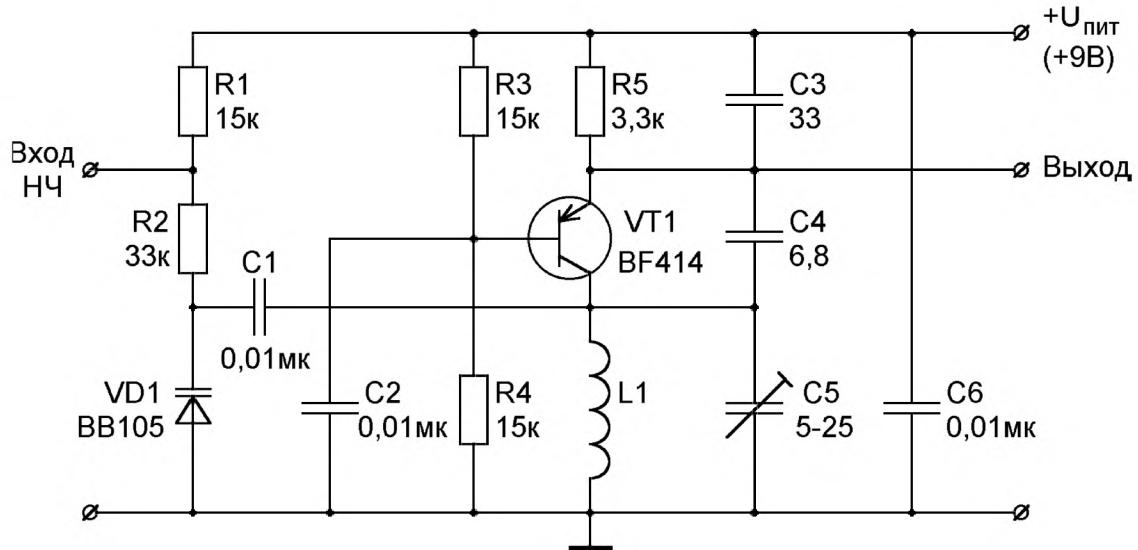


Рис. 4. 10. Принципиальная схема модулятора на вариакапе для LC-генератора, выполненного по схеме ёмкостной трехточки на биполярном транзисторе р-п-р-проводимости

го контура. Напряжение смещения подается на вариакап через резисторы R1 и R2. Конденсатор C1 большой емкости обеспечивает развязку вариакапа VD1 и коллектора транзистора VT1 по постоянному току. Модулирующий НЧ-сигнал подается на вариакап через резистор R2. Модулированный сигнал снимается с эмиттера транзистора VT1.

При использовании в качестве источника НЧ-сигнала электретного микрофона величина сопротивления резистора R1 выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. После этого подбирается величина сопротивления резистора R2 таким образом, чтобы падение напряжения на вариакапе VD1 было равно выбранному напряжению смещения, обеспечивающему работу в так называемом режиме молчания. При этом параллельно микрофону рекомендуется подключить шунтирующий конденсатор емкостью около 1000 пФ.

Если же на вариакап VD1 предполагается подавать модулирующий сигнал, снимаемый с выхода микрофонного усилителя, то резистор R1 одновременно может использоваться в качестве коллекторной нагрузки транзистора усилительного каскада. При этом величина его сопротивления определяется выбранным режимом работы этого транзистора.

Принципиальная схема одного из вариантов модулятора на вариакапе, обеспечивающего частотную модуляцию сигнала LC-генератора, выполненного по схеме индуктивной трехточки на полевом транзисторе, приведена на рис. 4.11.

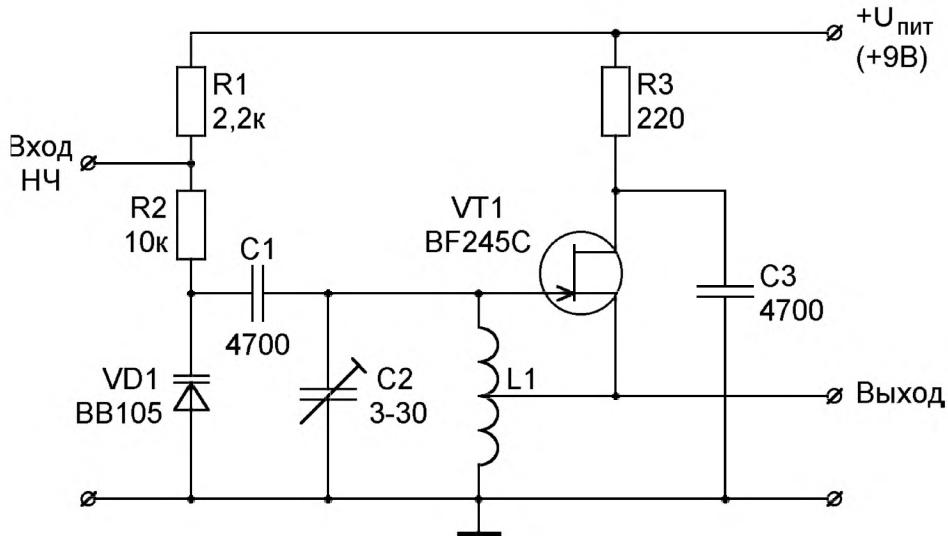


Рис. 4.11. Принципиальная схема модулятора на варикапе для LC-генератора, выполненного по схеме индуктивной трехточки на полевом транзисторе

Особенностью данного схемотехнического решения является включение варикапа VD1 параллельно резонансному контуру, образованному подстроечным конденсатором C2 и катушкой индуктивности L1. Напряжение смещения подается на варикап через резисторы R1 и R2. Конденсатор C1 большой емкости обеспечивает развязку варикапа VD1 и затвора транзистора VT1 по постоянному току. Модулирующий НЧ-сигнал подается на варикап через резистор R2. Модулированный сигнал снимается с электрода истока транзистора VT1. Выбор величин сопротивлений резисторов R1 и R2 определяется с учетом выполнения тех же требований, которые были изложены при описании предыдущей конструкции.

## 4.4. Модуляция сигнала ВЧ-генераторов с кварцевой стабилизацией частоты

При разработке миниатюрных транзисторных радиопередатчиков и радиомикрофонов с применением генераторов с кварцевой стабилизацией частоты обычно используются схемотехнические решения модуляторов, обеспечивающие амплитудную и частотную модуляцию частоты. При этом реализация амплитудной модуляции чаще всего осуществляется изменением напряжения питания активного элемента генератора в соответствии с модулирующим сигналом. Частотная модуляция сигнала кварцевого генератора обычно обеспе-

чиваются применением различных вариантов схемотехнических решений, основанных на использовании варикапов.

## Амплитудная модуляция

Для обеспечения амплитудной модуляции сигнала, формируемого ВЧ-генератором с кварцевой стабилизацией частоты, в малогабаритных транзисторных радиопередающих устройствах обычно применяются схемы модуляторных каскадов, выполненных на одном транзисторе. Как уже отмечалось, широко используются схемотехнические решения каскадов, которые в процессе модуляции обеспечивают изменение напряжения питания активного элемента генератора в соответствии с мгновенным значением уровня модулирующего сигнала.

Принципиальная схема одного из вариантов такого модулятора, основу которого составляет биполярный п-р-п-транзистор, приведена на рис. 4.12.

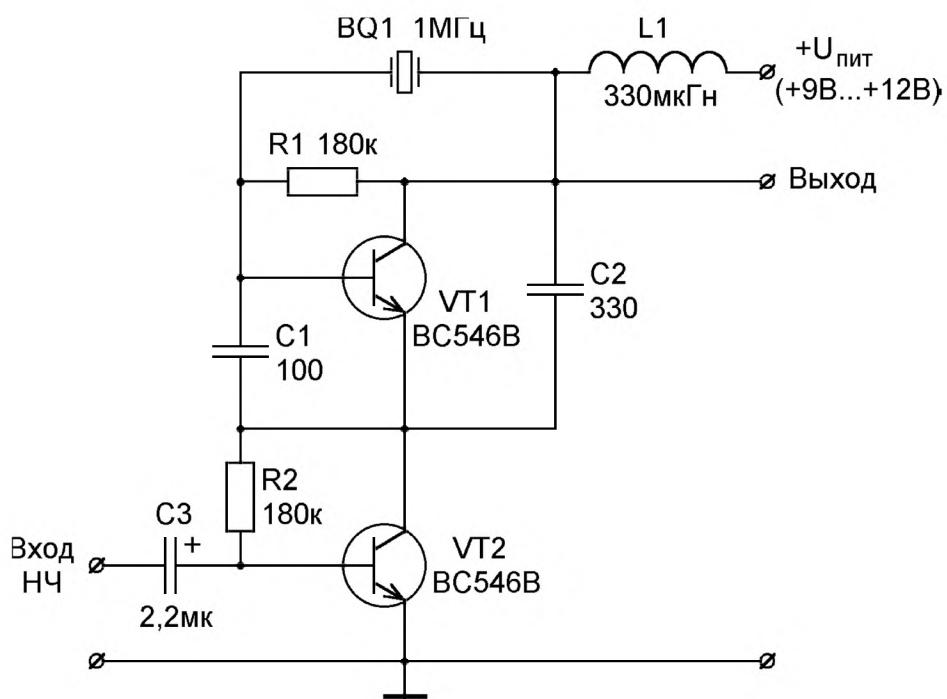


Рис. 4.12. Принципиальная схема амплитудного модулятора на биполярном п-р-п-транзисторе для генератора с кварцевой стабилизацией частоты

В рассматриваемой конструкции на транзисторе VT1 выполнен кварцевый генератор, а на транзисторе VT2 – модулятор радиопередающего устройства. Транзистор VT1 по переменному току включен по схеме с общим эмиттером, стабилизация рабочей точки этого

транзистора обеспечивается с помощью цепи ООС, а режим работы по постоянному току определяется величиной сопротивления резистора R1. Модулирующий низкочастотный сигнал подается на базу транзистора VT2 через разделительный конденсатор C1. Режим работы этого транзистора определяется величиной сопротивления резистора R2.

Особенностью данного схемотехнического решения модулятора является включение перехода коллектор-эмиттер транзистора VT2 между эмиттером транзистора VT1 и шиной корпуса. В соответствии с мгновенным значением модулирующего НЧ-сигнала, поступающего на базу транзистора VT2, происходит запирание или отпирание этого транзистора. При этом изменяется падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер транзистора VT2, что приводит к изменению величины напряжения питания, которое подается на каскад, выполненный на транзисторе VT1. В результате изменяется режим работы транзистора VT1 по постоянному току с соответствующим изменением амплитуды ВЧ-сигнала, формируемого кварцевым генератором. Модулированный по амплитуде сигнал снимается с коллектора транзистора VT1.

Необходимо отметить, что величина сопротивления резистора R2 выбирается так, чтобы с учетом значения потребляемого генератором тока величина напряжения на коллекторе транзистора VT2 была равна приблизительно половине напряжения питания. При необходимости напряжение на коллекторе транзистора модулятора может быть в пределах от  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{3}{4}$  напряжения питания конструкции.

Каскад, обеспечивающий амплитудную модуляцию сигнала кварцевого генератора, может быть выполнен на биполярном транзисторе p-n-p проводимости. Принципиальная схема одного из вариантов такого модулятора приведена на рис. 4.13.

На транзисторе VT1 выполнен модулятор, а на транзисторе VT2 – кварцевый генератор радиопередающего устройства. Особенностью данного схемотехнического решения модулятора является включение перехода коллектор-эмиттер транзистора VT1 между коллектором транзистора VT2 и положительной шиной источника питания. Положение рабочей точки транзистора VT1 определяется величинами и соотношением сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R1 и R2.

Транзистор активного элемента генератора по переменному току включен по схеме с общим эмиттером, при этом положение рабочей точки транзистора VT2 определяется величинами и соотношением

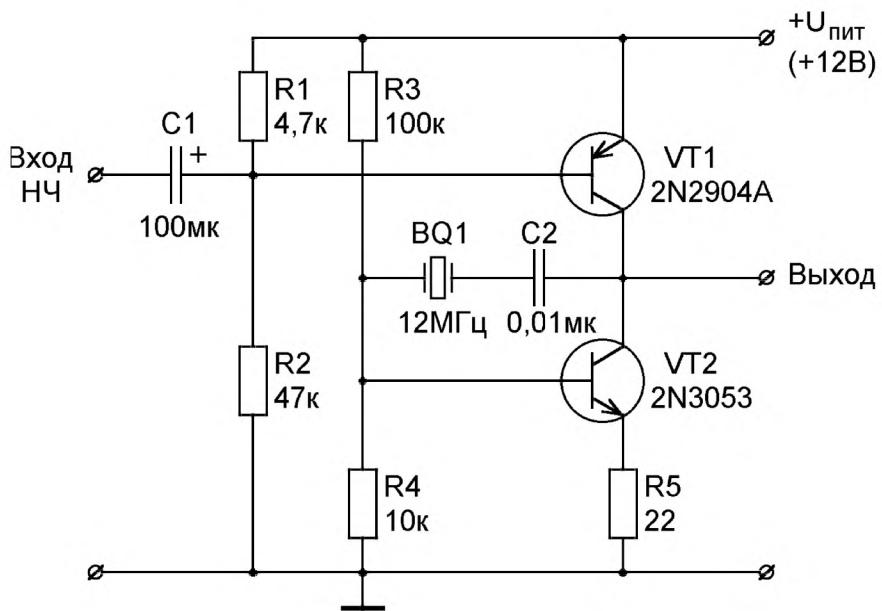


Рис. 4.13. Принципиальная схема амплитудного модулятора на биполярном р-п-р-транзисторе для генератора с кварцевой стабилизацией частоты

сопротивлений делителя, в состав которого входят резисторы R3 и R4. Эти же резисторы совместно с резистором R5 образуют схему стабилизации положения рабочей точки. Кварцевый резонатор BQ1 включен последовательно с конденсатором C2 в цепь обратной связи между коллектором и базой транзистора VT2.

Модулирующий низкочастотный сигнал подается на базу транзистора VT1 через разделительный конденсатор C1. В соответствии с мгновенным значением модулирующего НЧ-сигнала происходит запирание или отпирание этого транзистора и, как следствие, изменяется падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер. В результате по закону модулирующего сигнала изменяется величина напряжения питания, подаваемого на транзистор VT2, на котором выполнен активный элемент генератора. Изменение режима работы транзистора VT2 по постоянному току приводит к соответствующему изменению амплитуды формируемого кварцевым генератором ВЧ-сигнала. Модулированный по амплитуде сигнал снимается с коллектора транзистора VT2.

## Частотная модуляция

Основу рассмотренных в предыдущем разделе конструкций каскадов, обеспечивающих амплитудную модуляцию сигнала ВЧ-генераторов с кварцевой стабилизацией частоты, составляют схемотехни-

ческие решения, в которых в соответствии с модулирующим сигналом изменяется напряжение питания активного элемента. Однако на практике при разработке миниатюрных радиопередатчиков и радиомикрофонов широко используются модуляторы, позволяющие реализовать частотную модуляцию высокочастотного сигнала кварцевого генератора.

Необходимо отметить, что при конструировании таких устройств разработчики вынуждены решать две, казалось бы, взаимоисключающие задачи. С одной стороны, следует добиться достаточного уровня стабилизации частоты ВЧ-генератора, а с другой – необходимо обеспечить приемлемое изменение этой частоты по закону модулирующего сигнала. Результатом решения этих задач является определенный компромисс, достигаемый, например, посредством применения схемотехнических решений каскадов модуляции на варикапах.

Особенностью любительских конструкций транзисторных микропередатчиков с частотной модуляцией является частое применение схемотехнических решений осцилляторных ВЧ-генераторов с кварцевой стабилизацией частоты, в которых кварцевый резонатор используется в качестве элемента с индуктивным характером комплексного сопротивления в резонансном контуре. При этом варикап, как элемент с изменяемой по закону модуляции емкостью, подключается или последовательно, или параллельно кварцевому резонатору.

Не следует забывать о том, что последовательное включение варикапа и кварцевого резонатора приводит к повышению частоты последовательного резонанса и соответствующему уменьшению разности частот параллельного и последовательного резонанса кварцевого резонатора. При параллельном включении варикапа и кварцевого резонатора частота параллельного резонанса понижается, а разность частот параллельного и последовательного резонанса кварцевого резонатора также уменьшается.

Упрощенная принципиальная схема одного из вариантов модулятора на варикапе (без цепей формирования напряжения смещения варикапа) для генератора с кварцевой стабилизацией частоты, выполненного по схеме Пирса, приведена на рис. 4.14.

Принцип действия генератора с кварцевой стабилизацией частоты, выполненного по схеме Пирса, то есть по схеме емкостной трехточки с включением кварцевого резонатора между базой и коллектором транзистора активного элемента, был подробно рассмотрен

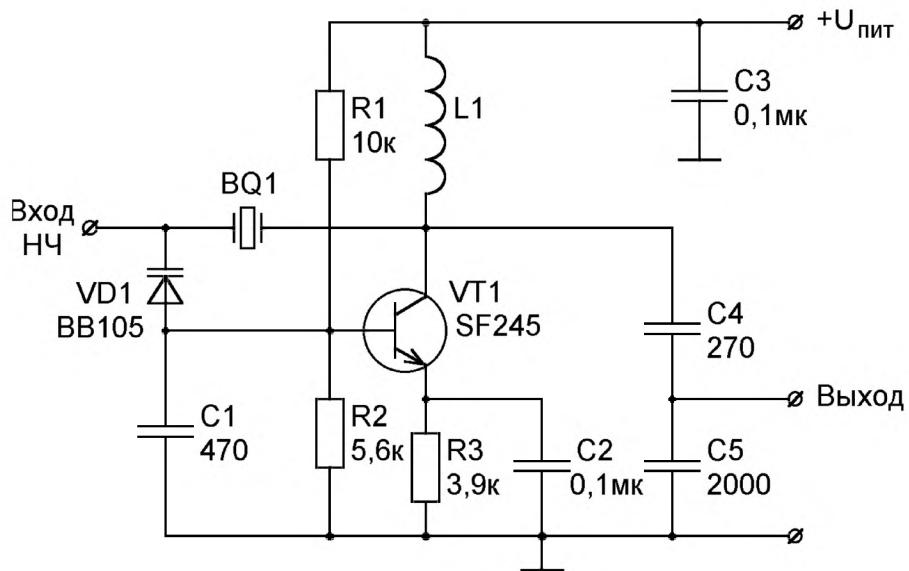


Рис. 4.14. Упрощенная принципиальная схема модулятора на вариакапе для генератора по схеме Пирса

ранее. Напомним, что в данной схеме используется индуктивная составляющая комплексного сопротивления кварцевого резонатора BQ1, который работает в режиме, близком к режиму параллельного резонанса. При этом резонансную частоту в незначительных пределах можно регулировать изменением емкости элемента, который включен последовательно с кварцевым резонатором BQ1. Особенностью рассматриваемого схемотехнического решения является включение вариакапа VD1 последовательно с кварцевым резонатором BQ1 в цепь ОС между коллектором и базой транзистора VT1. При изменении емкости вариакапа по закону модулирующего сигнала обеспечивается частотная модуляция сигнала ВЧ-генератора.

Упрощенная принципиальная схема одного из вариантов модулятора на вариакапе (без цепей формирования напряжения смещения вариакапа) для генератора с кварцевой стабилизацией частоты, выполненного по схеме Колпитца, приведена на рис. 4.15.

Принцип действия генератора с кварцевой стабилизацией частоты, выполненного по схеме Колпитца, был подробно рассмотрен ранее. В данном случае речь идет о трехточечном кварцевом генераторе, в котором транзистор активного элемента по переменному току включен по схеме с общим коллектором. При этом кварцевый резонатор BQ1, имеющий индуктивный характер реактивного сопротивления, образует индуктивную ветвь параллельного резонансного контура. Емкостная ветвь этого контура состоит из двух включенных последовательно конденсаторов C1 и C2, в точку соединения

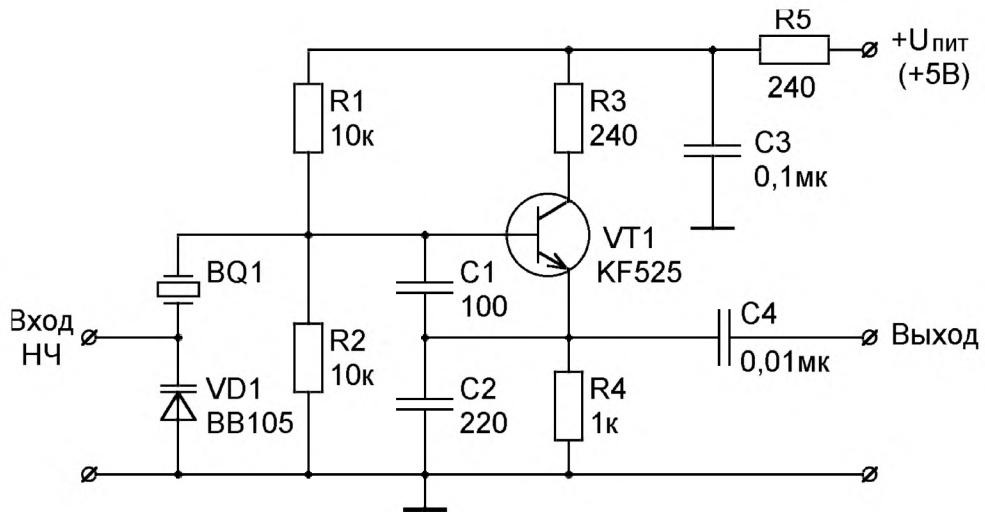


Рис. 4.15. Упрощенная принципиальная схема модулятора на вариакапе для генератора по схеме Колпитца

которых подается сигнал с выхода активного элемента (эмиттер транзистора VT1). В результате конденсаторы C1 и C2 образуют емкостной делитель в цепи положительной обратной связи.

Резонансную частоту контура, и, соответственно, частоту генерируемых колебаний, в незначительных пределах можно регулировать изменением емкости элемента, который включен последовательно с кварцевым резонатором BQ1 в цепь ОС между базой транзистора VT1 и шиной корпуса. Особенностью данной схемы является то, что в качестве такого элемента с изменяемой емкостью используется вариакап VD1. В результате при изменении емкости вариакапа по закону модулирующего сигнала обеспечивается частотная модуляция сигнала ВЧ-генератора.

При разработке миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств используются и другие, часто весьма интересные и оригинальные схемотехнические решения модуляторов. Однако ограниченный объем предлагаемого издания, к сожалению, не позволяет их рассмотреть. Необходимую дополнительную информацию заинтересованные читатели могут найти в специализированной литературе и в сети Интернет.

<b>1</b>	Микрофоны	9
<b>2</b>	Микрофонные усилители	24
<b>3</b>	Генераторы сигнала высокой частоты	54
<b>4</b>	Модуляторы высокочастотного сигнала	105

# **5** Простые транзисторные радиопередающие устройства

Ознакомившись с основами схемотехники миниатюрных транзисторных радиопередающих устройств, заинтересованные читатели, вполне вероятно, пожелают проверить и закрепить полученные знания на практике. Поэтому в разделах данной главы рассматриваются принципиальные схемы простых радиопередающих устройств, выполненных на одном или двух транзисторах. Такие радиопередатчики могут использоваться в составе систем связи в доме или квартире, например, для прослушивания детской комнаты. Помимо этого миниатюрные радиопередающие устройства часто применяются в составе системы сигнализации для получения звукового сигнала из охраняемого помещения, а также используются в домах и на дачных участках в качестве беспроводного звонка или интеркома. Радиомикрофоны, отличающиеся от простых микропередатчиков более качественной передачей звукового сигнала, применяются, например, при озвучивании презентаций, дискотек и других массовых мероприятий.

**Внимание!** Использование любой из описываемых в данной главе конструкций в качестве специального технического средства для негласного получения информации или несанкционированного прослушивания, а также ее производство, сбыт и/или приобретение (в том числе и в целях сбыта), ввоз и вывоз для осуществления указанных деяний преследуется в соответствии с действующим административным и уголовным законодательством Российской Федерации.

## 5.1. Радиопередатчики на одном транзисторе

---

Большинство схемотехнических решений простейших миниатюрных радиопередающих устройств предполагает использование однокаскадных конструкций, основу которых составляет высокочастотный транзисторный генератор. Простейшее радиопередающее устройство с частотной модуляцией может быть собрано всего лишь на одном биполярном или полевом транзисторе и нескольких пассивных элементах. Конечно же, такие конструкции не отличаются высокими качественными характеристиками, однако навыки, полученные при их сборке и налаживании, могут послужить начинающим радиолюбителям, решившим осваивать секреты радиоэлектро-

ники, хорошей базой для проведения более сложных экспериментов с высокочастотной техникой.

## **Радиопередатчики на биполярном транзисторе**

Основу большинства простейших транзисторных радиопередающих устройств составляет высокочастотный генератор, активный элемент которого выполнен на биполярном транзисторе. Преобразование акустического сигнала в низкочастотный электрический сигнал осуществляется, как правило, электретным микрофоном. Сформированный на выходе микрофона НЧ-сигнал без какой-либо дополнительной обработки используется в качестве модулирующего сигнала и подается непосредственно на ВЧ-генератор. Модуляция сигнала, формируемого генератором, обеспечивается за счет изменения режима работы или параметров транзистора активного элемента. Сформированный на выходе ВЧ-генератора модулированный сигнал поступает в антенну.

Принципиальная схема простейшего радиопередающего устройства, сигнал которого можно принимать на любой имеющий FM-диапазон вещательный радиоприемник, расположенный на расстоянии нескольких десятков метров, приведена на рис. 5.1.

Входной акустический сигнал преобразуется электретным микрофоном ВМ1, с выхода которого НЧ-сигнал подается непосред-

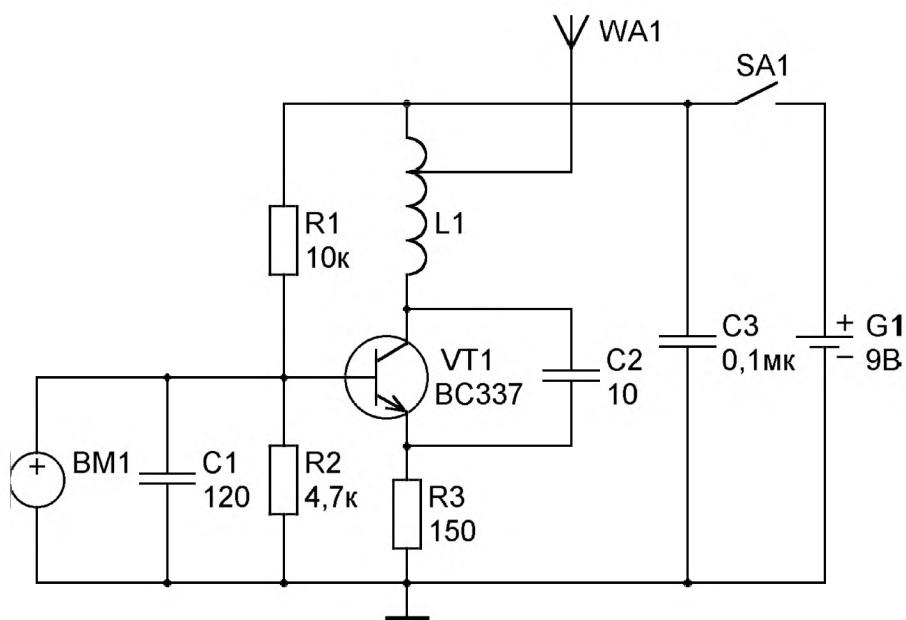


Рис. 5. 1. Принципиальная схема простого радиопередатчика на биполярном транзисторе (вариант 1)

ственno на базу биполярного транзистора VT1, имеющего n-p-n-проводимость. На этом транзисторе собран обычный LC-генератор с емкостной связью, формирующий ВЧ-колебания на частоте в пределах от 106 МГц до 107 МГц. По постоянному току транзистор VT1 включен по схеме с общим эмиттером. Положение рабочей точки этого транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений резисторов R1, R2 и выбирается с учетом частоты, на которой предполагается эксплуатировать рассматриваемую конструкцию. В состав мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки помимо резисторов R1 и R2 входит резистор R3, включенный в цепи эмиттера транзистора VT1.

По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой. При этом база транзистора заземлена по высокой частоте через конденсатор C1. Входным электродом активного элемента по высокой частоте в данном случае является эмиттер транзистора VT1, а выходным электродом – его коллектор. Цепь положительной обратной связи образована конденсатором C2, который включен между коллектором и эмиттером транзистора VT1. При достаточной глубине обратной связи каскад переходит в режим генерации высокочастотных колебаний, модуляция которых осуществляется изменением положения рабочей точки транзистора VT1 по закону модулирующего сигнала.

Катушка L1 наматывается на каркасе диаметром 5 мм и содержит 5 витков медного посеребренного или просто луженого провода диаметром 0,8 мм. Длина катушки должна составлять около 8 мм. Вывод антенны припаивается между первым и вторым витками, считая от верхнего по схеме края катушки.

Транзистор типа BC337 зарубежного производства можно заменить, например, отечественным транзистором типа КТ660А. Величина сопротивления резистора R1 выбирается в зависимости от типа примененного электретного микрофона и должна быть такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от обычной батарейки типа «Крона» или от аккумулятора напряжением 9 В. При этом потребляемый ток не должен превышать 12 мА. Параллельно контактам источника питания включен керамический конденсатор С3, шунтирующий его по высокой частоте и обеспечивающий в определенной мере нейтрализацию как внутренних, так и внешних факторов, влияющих на стабильную работу радиопередатчика.

При налаживании радиопередатчика рабочая частота ВЧ-генератора должна быть выбрана в верхней части FM-диапазона. Ее точное значение устанавливается изменением количества витков катушки L1 и/или изменением расстояния между ее витками. При желании в каркасе катушки можно установить сердечник. В этом случае точное значение рабочей частоты ВЧ-генератора выбирается за счет изменения положения этого сердечника по отношению к виткам катушки L1. Использование сердечника из ферромагнитного материала приводит к уменьшению значения рабочей частоты. Если же применить сердечник из меди или алюминия, то рабочая частота увеличится. В качестве антенны рекомендуется использовать отрезок медного провода диаметром 1 мм и длиной примерно 30 см.

Принципиальная схема еще одного варианта радиопередающего устройства, выполненного на биполярном транзисторе, приведена на рис. 5.2.

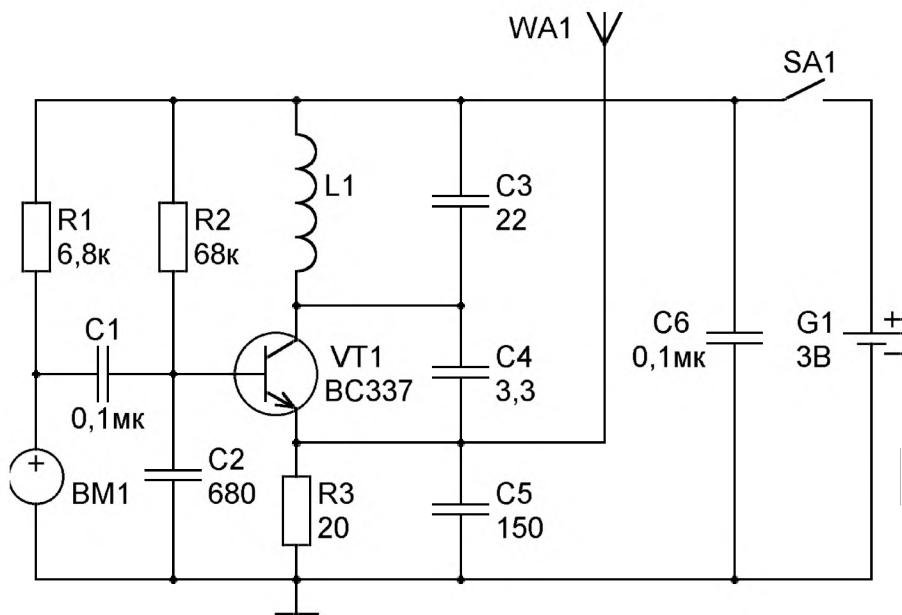


Рис. 5.2. Принципиальная схема простого радиопередатчика на биполярном транзисторе (вариант 2)

В рассматриваемой конструкции акустический сигнал преобразуется электретным микрофоном BM1, с выхода которого электрический НЧ-сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на базу биполярного транзистора VT1. На этом п-р-п транзисторе собран LC-генератор с емкостным делителем, формирующий ВЧ-колебания на частоте в пределах от 104 МГц до 108 МГц. По постоянному току транзистор VT1 включен по схеме с общим эмиттером.

Положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивления резистора R2.

По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C2. Высокочастотные колебания возникают в резонансном контуре, включенном по переменному току между коллектором и базой транзистора VT1. Снимаемое с емкостного делителя напряжение подается во входную цепь активного элемента, а именно на эмиттер транзистора VT1, в результате чего каскад оказывается охваченным положительной обратной связью.

Модулирующий НЧ-сигнал поступает на базу транзистора VT1 через разделительный конденсатор C1. В соответствии с мгновенным значением этого сигнала изменяется величина напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора VT1, то есть изменяется положение рабочей точки транзистора. В результате НЧ-сигнал, формируемый на коллекторе транзистора VT1, инициирует изменение падения напряжения на резонансном контуре, при этом происходит изменение амплитуды и частоты сигнала ВЧ-генератора по закону модулирующего сигнала. Таким образом, на коллекторе транзистора VT1 формируется модулированный сигнал.

Катушка L1 наматывается на каркасе диаметром 5 мм и содержит 4-5 витков медного посеребренного или просто луженого провода диаметром 0,5 мм. В качестве антенны рекомендуется использовать отрезок медного провода диаметром 1 мм и длиной 80 см. Для приема сигналов, формируемых на выходе радиопередатчика, можно использовать любой вещательный радиоприемник, имеющий FM-диапазон.

Как и в рассмотренной ранее конструкции, транзистор типа BC337 зарубежного производства можно заменить, например, отечественным транзистором типа КТ660А. Величина сопротивления резистора R1 выбирается в зависимости от типа примененного электретного микрофона и должна быть такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от двух пальчиковых батареек типа AAA или от аккумулятора напряжением 3 В. При этом потребляемый ток не должен превышать 2 мА.

В процессе налаживания точное значение рабочей частоты ВЧ-генератора устанавливается изменением количества витков катушки L1 и/или изменением расстояния между ее витками. Уменьшение

расстояния между витками катушки приводит к уменьшению значения рабочей частоты генератора, а с увеличением расстояния между витками рабочая частота ВЧ-генератора увеличивается.

На рис. 5.3 приведена принципиальная схема еще одного простого радиопередающего устройства на биполярном транзисторе. Особенностью данной конструкции является схемотехническое решение высокочастотного генератора, который выполнен по схеме емкостной трехточки.

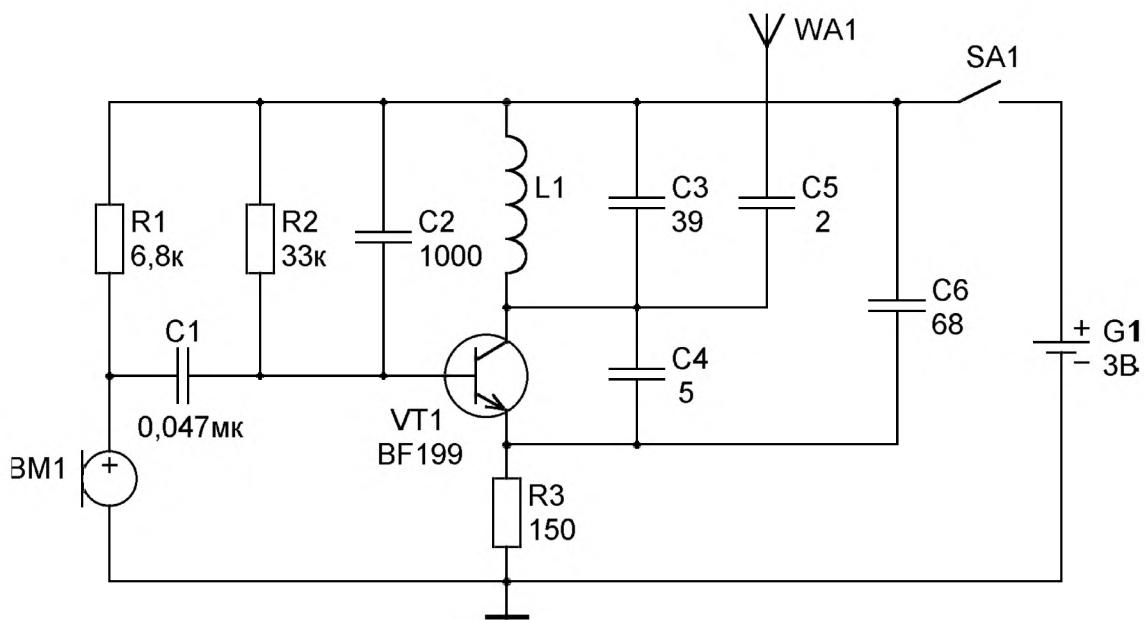


Рис. 5.3 Принципиальная схема простого радиопередатчика на биполярном транзисторе (вариант 3)

Как и в рассмотренных ранее конструкциях, входной акустический сигнал преобразуется в электрический НЧ-сигнал электретным микрофоном BM1. Низкочастотный сигнал поступает на базу транзистора VT1 через конденсатор C1, который обеспечивает развязку цепи питания электретного микрофона BM1 и цепи формирования напряжения смещения транзистора VT1 по постоянному току.

Транзистор VT1 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. При этом положение рабочей точки транзистора определяется величиной сопротивления резистора R2. По переменному току транзистор VT1 включен по схеме с общей базой, поскольку по высокой частоте его база заземлена через конденсатор C2. Резонансный контур, образованный конденсаторами C3, C4, C6 и катушкой L1, включен на выходе активного элемента, то есть в коллекторной

цепи транзистора VT1. Снимаемое с емкостного делителя напряжение подается во входную цепь активного элемента, то есть на эмиттер транзистора VT1. Величина указанного напряжения, и, соответственно, глубина обратной связи, определяется соотношением величин емкостей конденсаторов C4 и C6.

Мгновенное значение модулирующего сигнала, формируемого микрофоном BM1, изменяет величину напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора VT1, то есть влияет на положение рабочей точки транзистора. НЧ-сигнал, формируемый на коллекторе транзистора VT1, инициирует изменение падения напряжения на резонансном контуре, что приводит к соответствующему изменению частоты сигнала ВЧ-генератора. Модулированный сигнал формируется на коллекторе транзистора VT1 и через конденсатор C5 подается на антенну,

Катушка L1 наматывается на каркасе диаметром 5-6 мм и содержит 3-6 витков медного посеребренного или просто луженого провода диаметром 0,5 мм. В качестве антенны используется отрезок провода диаметром 1 мм и длиной около 25 см.

Вместо транзистора типа BF199 можно использовать транзисторы типа BF314 или типа BF240, а также отечественные транзисторы типа КТ339А или КТ312В. При замене транзистора следует выбрать оптимальный режим его работы подбором величин сопротивлений резисторов R2 и R3, что позволяет добиться максимальной выходной мощности устройства, которая может достигать 20 мВт.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от двух пальчиковых батареек типа ААА или от аккумулятора напряжением 3 В. Можно использовать, например, литиевый аккумулятор типа CR2032 или «компьютерный» аккумулятор 3,6В/60 мАч. При необходимости напряжение питания может быть уменьшено до 1,5 В или увеличено до 4,5 В и даже до 12 В. При изменении напряжения питания необходимо подобрать величину сопротивления резистора R1 так, чтобы напряжение, подаваемое на электретный микрофон, соответствовало его номинальному напряжению питания. Например, в авторской конструкции при напряжении питания 1,5 В величина сопротивления резистора R1 составляла 3 кОм, при напряжении 6 В – 9,1 кОм, а при напряжении 12 В сопротивление резистора R1 составляло 11 кОм. При этом дальность действия данного радиопередатчика при напряжении питания 1,5 В от источника типа L736 достигала почти 30 м, а при напряжении питания 6 В – около 100 м.

В данной схеме коллектор транзистора VT1 подключен непосредственно к нижнему по схеме выводу катушки L1. В этом случае глубина положительной обратной связи определяется лишь соотношением величин емкостей конденсаторов C4 и C6. Поэтому настройка резонансного контура при регулировке частоты генерируемых колебаний осуществляется преимущественно изменением индуктивности катушки L1 и емкости конденсатора C3, поскольку изменение емкостей конденсаторов C4 и C6 приведет к изменению параметров цепи положительной обратной связи. Помимо этого изменение индуктивности катушки при увеличении частоты колебаний повышает добротность резонансного контура.

При налаживании точное значение рабочей частоты ВЧ-генератора устанавливается изменением расстояния между ее витками. Уменьшение расстояния между витками катушки приводит к уменьшению значения рабочей частоты генератора, а с увеличением расстояния между витками рабочая частота ВЧ-генератора увеличивается.

## **Радиопередатчики на полевом транзисторе**

Простые радиопередающие устройства могут быть выполнены не только на биполярном, но и на полевом транзисторе. В радиолюбительской практике широкое распространение получили, например, схемотехнические решения передатчиков, основу которых составляет высокочастотный LC-генератор по схеме Хартли. При этом модуляция ВЧ-сигнала обеспечивается с помощью варикапа. Принципиальная схема одного из вариантов такого радиопередатчика приведена на рис. 5.4.

Низкочастотный сигнал в данной конструкции формируется электретным микрофоном BM1 и через резистор R2 в качестве модулирующего сигнала подается на варикап VD1. Необходимость использования резистора R2 объясняется различиями между величинами напряжения питания микрофона и напряжения смещения варикапа. Конденсатор C1 большой емкости обеспечивает развязку варикапа VD1 и затвора транзистора VT1 по постоянному току.

Активный элемент LC-генератора выполнен на полевом транзисторе VT1, который по переменному току включен по схеме истокового повторителя, то есть с общим стоком. Электрод стока транзистора замкнут на шину корпуса через конденсатор C3. Резонансный контур подключен в цепь затвора полевого транзистора VT1 и образован включенными параллельно подстроечным конденсатором C2

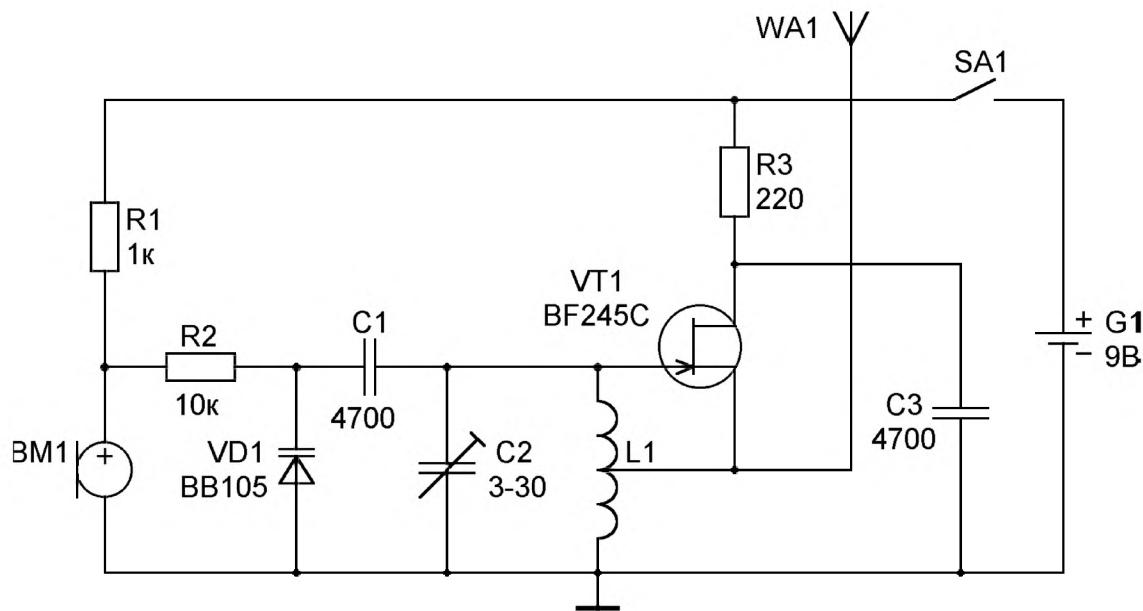


Рис. 5.4 Принципиальная схема простого радиопередатчика на полевом транзисторе с модулятором на варикапе (вариант 1)

и катушкой индуктивности L1. Возникшие в резонансном контуре колебания подаются на затвор транзистора VT1. Снимаемое с электрода истока транзистора VT1 напряжение поступает в резонансный контур, а именно на вывод катушки L1, которая по отношению к истоку транзистора включена по схеме повышающего автотрансформатора. Частота генерируемого сигнала может изменяться с помощью подстроичного конденсатора C2.

При поступлении на варикап модулирующего НЧ-сигнала происходит соответствующее изменение его емкости. Поскольку варикап VD1 включен параллельно резонансному контуру, образованному конденсатором C2 и катушкой L1, то по закону модулирующего сигнала изменяется и частота формируемого ВЧ-генератором сигнала. Модулированный сигнал, формируемый на выходе генератора, снимается с электрода истока полевого транзистора VT1. Для приема сигналов данного радиопередатчика можно использовать любой вещательный радиоприемник, имеющий FM-диапазон.

Катушка L1 наматывается на каркасе с ферритовым сердечником диаметром 4 мм и содержит 5 витков медного посеребренного провода диаметром 1 мм с выводом от середины. В зарубежных источниках встречаются варианты рассматриваемой конструкции, в которых катушка L1 выполнена на печатной плате.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от обычной батарейки типа «Крона» или от аккумулятора напряжением 9 В. Напряжение питания электретного микрофона снимается

с резистора R1. Цепочка, образованная резисторами R1 и R2, обеспечивает формирование напряжения смещения варикапа VD1.

Налаживание данной конструкции рекомендуется начать с подбора сопротивления резистора R1. При использовании в качестве источника НЧ-сигнала электретных микрофонов различных типов величина сопротивления этого резистора выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. После этого подбирается величина сопротивления резистора R2 таким образом, чтобы падение напряжения на варикапе VD1 было равно выбранному напряжению смещения, обеспечивающему работу в так называемом режиме молчания.

Грубая настройка рабочей частоты ВЧ-генератора осуществляется изменением расстояния между витками катушки L1. Точная настройка обеспечивается с помощью подстроичного конденсатора C2, а также перемещением сердечника катушки L1.

Принципиальная схема еще одного варианта простого радиопередатчика на полевом транзисторе с модулятором на варикапе приведена на рис. 5.5.

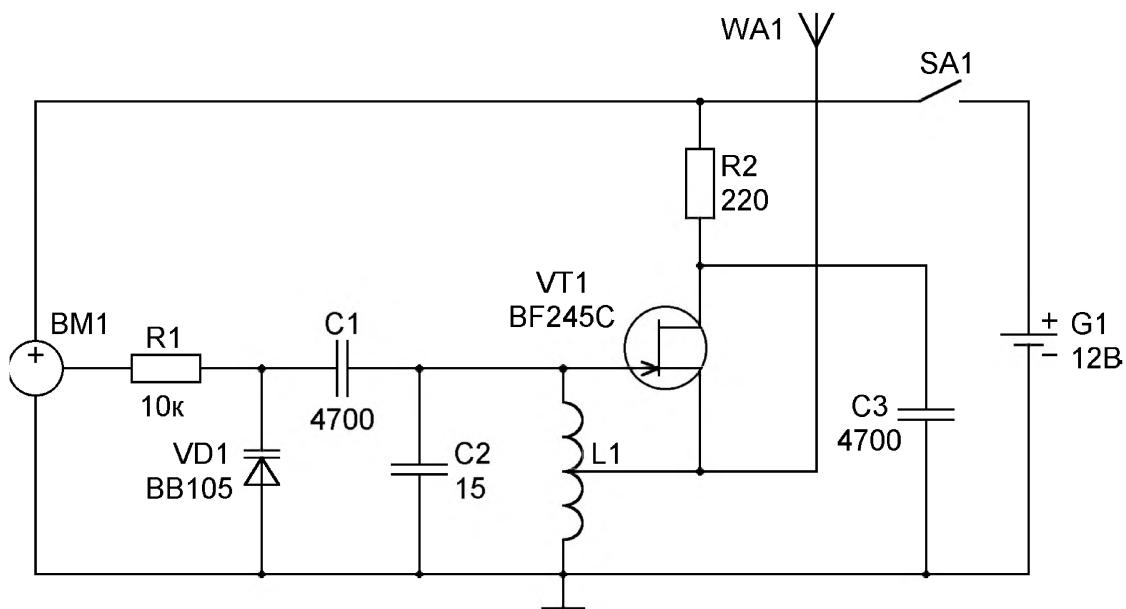


Рис. 5.5. Принципиальная схема простого радиопередатчика на полевом транзисторе с модулятором на варикапе (вариант 2)

Отличительными особенностями этой конструкции от рассмотренной ранее являются повышенное напряжение источника питания (12 В) и применение электретного микрофона типа Мe061 с тремя выводами. Выходная мощность устройства может достигать 20 мВт, а дальность действия обычно не превышает 20–50 м.

При использовании электретных микрофонов других типов в цепь подачи напряжения питания микрофона следует включить дополнительный резистор. Величина сопротивления этого резистора выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. После этого необходимо подобрать величину сопротивления резистора R1 таким образом, чтобы падение напряжения на варикапе VD1 было равно напряжению смещения, обеспечивающему работу в так называемом режиме молчания.

Рабочая частота рассматриваемого передатчика при емкости конденсатора C2, равной примерно 15 пФ, находится в пределах от 65 МГц до 75 МГц. В этом случае для приема сигналов данного радиопередатчика можно использовать любой вещательный радиоприемник, имеющий ЧМ-диапазон. Если же данную конструкцию предполагается использовать в диапазоне частот от 80 МГц до 108 МГц (FM-диапазон), то емкость конденсатора C2 следует уменьшить до 4,7 пФ.

В качестве источника питания данного радиопередающего устройства может использоваться, например, алкалиновая батарейка типа L1028/12В.

## 5.2. Простые радиомикрофоны

---

Параметры простых транзисторных радиопередатчиков можно значительно улучшить, введя в их состав дополнительные каскады. Такими каскадами могут быть, например, усилители НЧ- и/или ВЧ-сигналов. Рассматриваемые далее конструкции радиопередающих устройств отличаются от микромощных передатчиков, описанных в предыдущем разделе, в первую очередь применением микрофонных усилителей, что позволяет повысить качественные характеристики передаваемых сигналов.

### **Радиомикрофоны на двух биполярных транзисторах**

Принципиальная схема простого радиомикрофона, выполненного на двух биполярных транзисторах, приведена на рис. 5.6. В рассматриваемой конструкции, представляющей собой двухкаскадное радиопередающее устройство, на транзисторе VT1 выполнен микро-

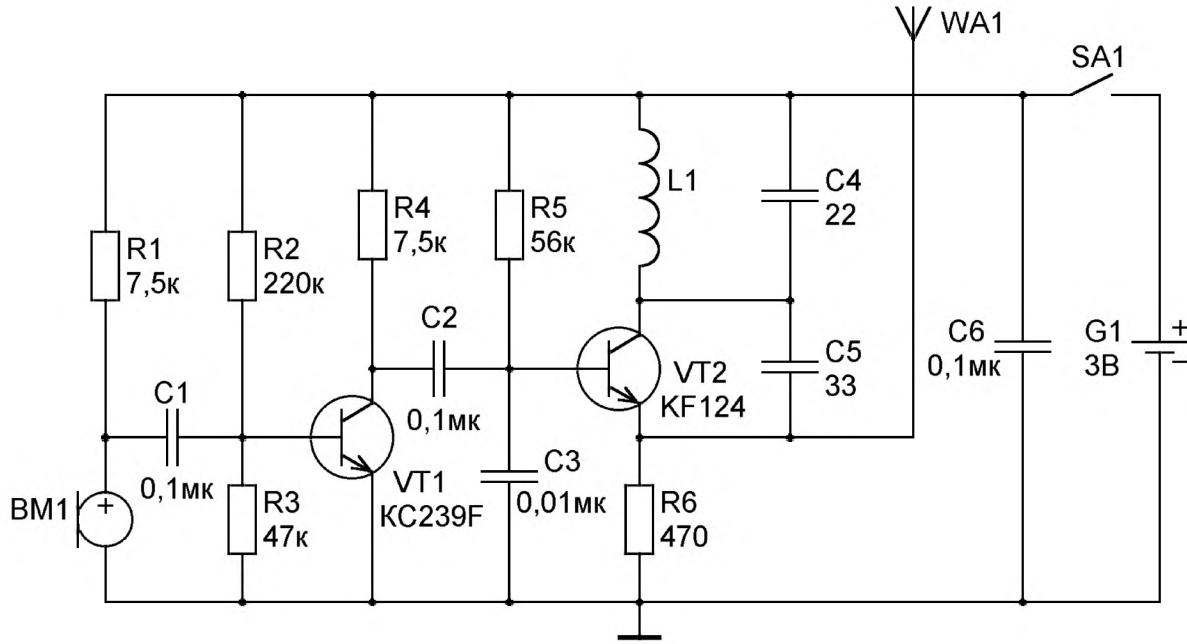


Рис. 5.6. Принципиальная схема простого радиомикрофона на двух биполярных транзисторах (вариант 1)

фонный усилитель, а на транзисторе VT2 – генератор высокочастотных колебаний.

Низкочастотный сигнал, сформированный на выходе электretного микрофона BM1, через разделительный конденсатор C1 поступает на вход однокаскадного микрофонного усилителя, выполненного на транзисторе VT1. Особенностью данного усилительного каскада является использование делителя напряжения, образованного резисторами R2 и R3, для формирования напряжения смещения, подаваемого на базу транзистора VT1, включенного по схеме с общим эмиттером. С коллекторной нагрузки транзистора, образованной резистором R4, усиленный НЧ-сигнал через разделительный конденсатор C2 проходит на базу транзистора VT2, на котором выполнен генератор высокочастотных колебаний.

Транзистор VT2 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером, а по переменному току – по схеме с общей базой, которая по высокой частоте подключена к шине корпуса через конденсатор C3. Положение рабочей точки транзистора VT2 определяется величиной сопротивления резистора R5. Резонансный контур образован конденсатором C4 и катушкой L1 и включен в цепь коллектора транзистора. Значение рабочей частоты генератора находится в диапазоне от 100 МГц до 108 МГц и зависит от параметров катушки индуктивности L1 и величины емкости конденсатора C4. Цепь положительной обратной связи образована конденсатором C5, кото-

рый включен между коллектором и эмиттером транзистора VT2. Модулированный сигнал снимается с точки подключения конденсатора С5 цепи ОС к эмиттеру транзистора. Антenna WA1 подключается к эмиттеру транзистора VT2, поэтому ее комплексное сопротивление оказывает минимальное влияние на частоту ВЧ-генератора. В качестве антенны можно использовать отрезок медного провода диаметром 1 мм или же телескопическую antennу длиной 30 см.

Питание рассматриваемого радиопередатчика осуществляется от источника постоянного напряжения 3 В, например, от двух включенных последовательно пальчиковых батареек типа АА или ААА. В качестве элемента питания можно использовать и аккумуляторы. Напряжение питания на электретный микрофон BM1 подается через резистор R1.

К деталям, используемым при изготовлении данной конструкции, не предъявляются какие-либо особые требования. Все зависит от габаритов конструкции, которые определяют и размеры применяемых элементов. Транзистор типа КС239F можно заменить, например, импортным транзистором типа BC239B или транзистором типа КТ3102Д отечественного производства. Высокочастотный транзистор типа KF124 можно заменить транзистором типа BF240. Номиналы резисторов R1 и R4 могут быть уменьшены до 6,8 кОм.

Катушка L2 наматывается на каркасе без сердечника диаметром 4,5 мм и содержит 5 витков медного посеребренного или просто луженого провода диаметром 0,7 мм.

Прием сигнала, формируемого рассмотренным радиопередатчиком, осуществляется на любой стационарный или переносной радиоприемник, который может принимать частотно-модулированные сигналы на частотах в диапазоне от 100 МГц до 108 МГц. Для данной цели рекомендуется использовать обычный вещательный радиоприемник с FM-диапазоном. Дальность действия радиопередатчика составляет примерно 25 м.

При налаживании рассмотренной конструкции могут возникнуть некоторые трудности. Например, правильный выбор рабочей точки транзистора VT1 микрофонного усилителя требует установки напряжения на базе этого транзистора в довольно узких границах от 2,9 В до 3,2 В. При меньшем напряжении транзистор VT1 полностью закрывается, а при большем – полностью открывается.

Проблемы могут возникнуть и при настройке высокочастотного генератора, выполненного на транзисторе VT2. В некоторых случаях, несмотря на то, что генератор работает вполне устойчиво, каче-

ство модуляции оставляет желать лучшего. Дело в том, что у ВЧ-генераторов, выполненных по такой схеме, при определенном положении рабочей точки транзистора частота генератора практически не зависит от малых изменений коллекторного тока, инициированных модулирующим напряжением, поступающим на базу транзистора. Иными словами, положение рабочей точки транзистора, при котором обеспечивается оптимальный с точки зрения стабильности частоты режим его работы, является самым неблагоприятным с точки зрения обеспечения качественной модуляции сигнала. Поэтому при налаживании радиомикрофонов с ВЧ-генератором данного типа режим работы следует особое внимание уделить правильному выбору положения рабочей точки транзистора. Необходимо отметить, что для каждого типа транзистора указанное неблагоприятное положение рабочей точки будет иным.

Для того чтобы упростить процесс настройки предлагаемой конструкции, в ее схему рекомендуется внести незначительные изменения. Принципиальная схема усовершенствованного варианта простого радиомикрофона на двух биполярных транзисторах приведена на рис. 5.7.

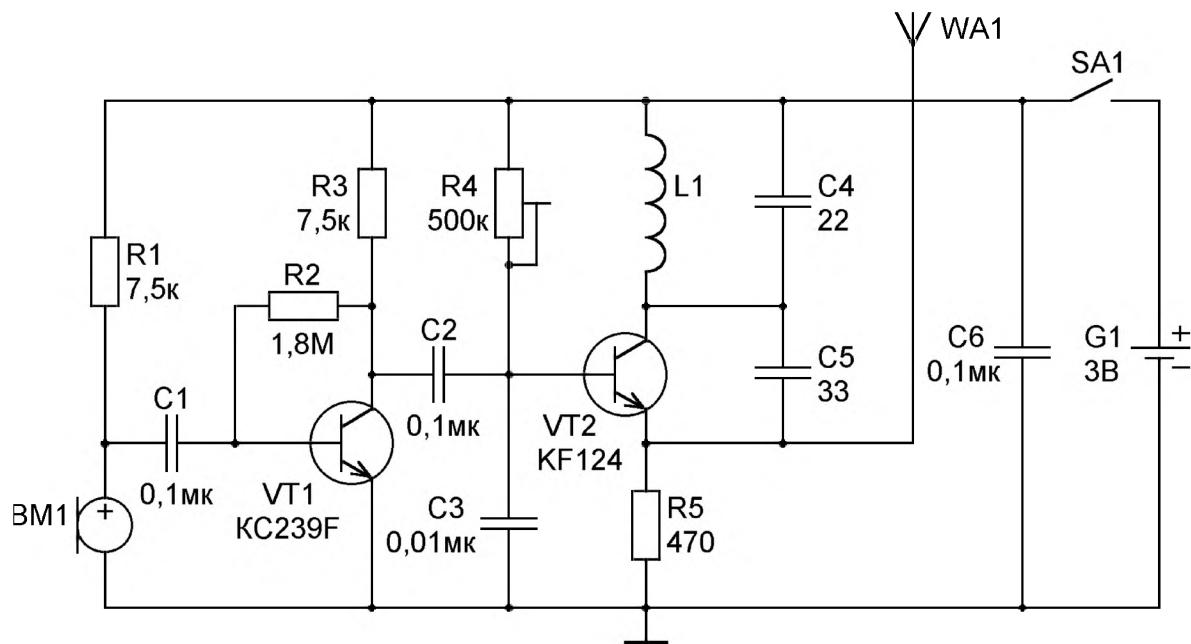


Рис. 5.7. Принципиальная схема усовершенствованного варианта простого радиомикрофона на двух биполярных транзисторах

Одна из особенностей усовершенствованной схемы заключается в том, что для формирования напряжения смещения транзистора VT1 и стабилизации положения его рабочей точки используется

цепь отрицательной обратной связи по напряжению. Эта цепь ОС образована резистором R2, который включен между коллектором и базой транзистора VT1. Принцип действия цепи ООС по напряжению был рассмотрен в соответствующем разделе одной из предыдущих глав.

Второе усовершенствование заключается в использовании подстроичного потенциометра R4, с помощью которого обеспечивается возможность выбора положения рабочей точки транзистора VT2 активного элемента ВЧ-генератора. В процессе налаживания радиомикрофона перемещением движка этого потенциометра следует добиться наиболее качественной модуляции высокочастотного сигнала.

Принципиальная схема еще одного варианта простого радиомикрофона, выполненного на двух биполярных транзисторах п-р-п-проводимости, приведена на рис. 5.8.

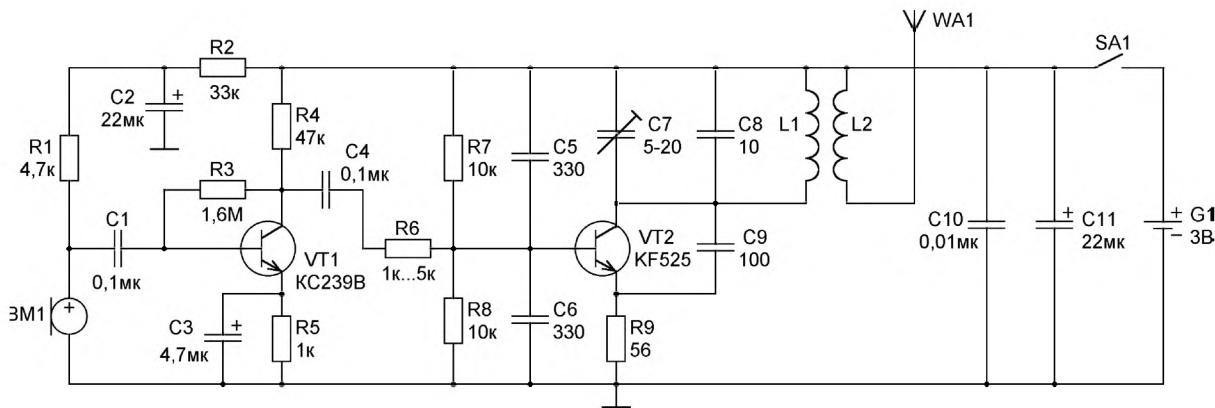


Рис. 5.8. Принципиальная схема радиомикрофона на двух биполярных транзисторах (вариант 2)

Входной акустический сигнал преобразуется электретным микрофоном BM1, с выхода которого НЧ-сигнал через разделительный конденсатор C1 подается на базу транзистора VT1, на котором выполнен микрофонный усилитель. Для получения максимальной амплитуды неискаженного усиленного сигнала на выходе микрофонного усилителя необходимо, чтобы напряжение на коллекторе транзистора VT1 составляло примерно половину от величины напряжения питания каскада. Для стабилизации положения рабочей точки транзистора VT1 в данном случае используется схемотехническое решение, предусматривающее применение цепи отрицательной обратной связи по напряжению. Резистор R3, образующий цепь ООС, подключен между коллектором и базой транзистора VT1.

Принцип действия такой схемы стабилизации был подробно рассмотрен в соответствующем разделе одной из предыдущих глав.

Усиленный низкочастотный сигнал снимается с коллекторной нагрузки транзистора VT1 (резистор R4) и через конденсатор C4 и резистор R6 подается на базу транзистора VT2. Величина сопротивления резистора R6 выбирается в зависимости от характеристик примененного микрофона, поскольку со временем чувствительность электретных микрофонов ухудшается.

На транзисторе VT2 выполнен ВЧ-генератор, представляющий собой один из вариантов LC-генератора с емкостной связью. Транзистор VT2 по постоянному току включен по схеме с общим эмиттером. Положение рабочей точки транзистора определяется величинами и соотношением сопротивлений резисторов R7 и R8. В состав мостовой схемы стабилизации положения рабочей точки также входит резистор R9. По переменному току транзистор VT2 включен по схеме с общей базой, так как база транзистора заземлена по высокой частоте через конденсаторы C5 и C6. Резонансный контур, образованный конденсаторами C7, C8 и катушкой L1, включен в цепь коллектора транзистора VT2. Цепь положительной обратной связи образована конденсатором C9, который включен между коллектором и эмиттером транзистора VT2. При указанных на схеме номиналах элементов на выходе LC-генератора формируются высокочастотные колебания с частотой около 100 МГц. Таким образом, для приема сигналов данного радиопередатчика можно использовать любой вещательный радиоприемник, имеющий FM-диапазон.

Модулирующий низкочастотный сигнал поступает с выхода микрофонного усилителя на базу транзистора VT2, что приводит к изменению положения его рабочей точки по закону модулирующего сигнала. В результате аналогичным образом изменяется рабочая частота ВЧ-генератора, то есть на его выходе формируется частотно-модулированный сигнал. Этот сигнал через катушку связи L2 подается на антенну.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от двух включенных последовательно батареек типа ААА или от аккумуляторов напряжением 3 В, например, типа CR2032 (Ш20×3,2 мм) или типа CR2330 (Ш23×3,0 мм). Потребляемый ток не превышает 5 мА. Напряжение питания электретного микрофона формируется цепочкой, образованной резисторами R1, R2 и конденсатором C2. Параллельно источнику питания подключены конденсаторы C11 и C12, обеспечивающие шунтирование источника по высокой частоте.

Катушка L1 наматывается на каркасе без сердечника диаметром 5 мм и содержит 7 витков медного посеребренного провода диаметром 1 мм. Непосредственно на катушку L1 наматывается катушка L2, содержащая 3 витка изолированного провода. К нижнему по схеме выводу катушки L2 подключается антenna, представляющая собой отрезок провода длиной около 60 см.

Транзистор типа КС239С можно заменить, например, импортным транзистором типа ВС239В или транзистором типа КТ3102Д отечественного производства. Высокочастотный транзистор типа КF525 выполнен в металлическом корпусе с выводом, который необходимо припаять к шине корпуса. Вместо транзистора типа КF525 можно использовать транзисторы типа КF524, BF199, BF224, SF240, SF245, KSY71 или KSY72.

При налаживании грубая настройка обеспечивается изменением расстояния между витками катушки L1. Уменьшение расстояния между витками этой катушки приводит к уменьшению значения рабочей частоты генератора, а с увеличением расстояния между витками рабочая частота ВЧ-генератора увеличивается. Точная настройка значения частоты ВЧ-генератора осуществляется с помощью конденсатора С7.

При необходимости в каркасе катушки L1 можно установить сердечник. В этом случае точное значение рабочей частоты ВЧ-генератора выбирается за счет изменения положения этого сердечника по отношению к виткам катушки L1. Использование сердечника из ферромагнитного материала приводит к уменьшению значения рабочей частоты. Если же применить сердечник из меди или алюминия, то рабочая частота увеличится. В процессе налаживания не следует забывать о том, что при перемещении сердечника катушки L1 изменяется степень связи между этой катушкой и катушкой L2.

## **Радиомикрофоны с модулятором на варикапе**

В простых радиомикрофонах, выполненных на двух транзисторах, широко используются схемотехнические решения, в которых по закону модулирующего сигнала изменяется емкость варикапа, входящего в состав резонансного контура. Принципиальная схема одного из вариантов такого радиомикрофона, выполненного на двух биполярных транзисторах разной проводимости, приведена на рис. 5.9.

В рассматриваемой конструкции преобразование акустического сигнала в электрический НЧ-сигнал осуществляется электрет-

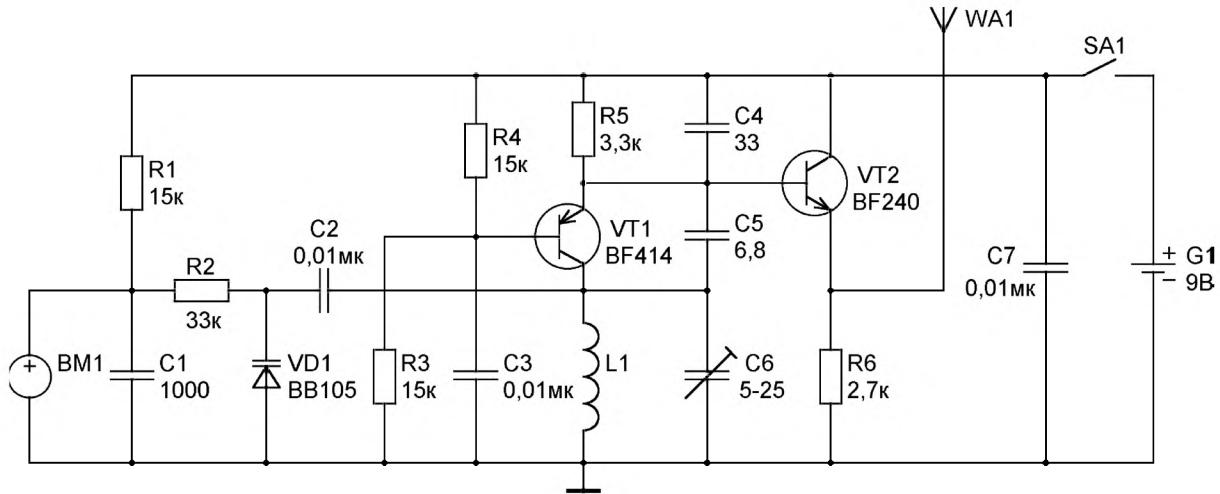


Рис. 5.9. Принципиальная схема радиомикрофона на биполярных транзисторах разной проводимости с модулятором на варикапе

ным микрофоном BM1, который по высокой частоте шунтируется конденсатором C1. Напряжение питания на микрофон подается через резистор R1. Сформированный на выходе электретного микрофона BM1 низкочастотный сигнал через резистор R2 поступает на варикап VD1 и инициирует изменение емкости варикапа по закону модулирующего сигнала. Напряжение смещения подается на варикап через резисторы R1 и R2. Необходимость использования резистора R2 объясняется различиями между величинами напряжения питания микрофона и напряжения смещения варикапа. Конденсатор C2 сравнительно большой емкости обеспечивает развязку варикапа VD1 и коллектора транзистора VT1 по постоянному току.

Одной из особенностей предлагаемого радиомикрофона является схемотехническое решение активного элемента ВЧ-генератора, выполненного по схеме емкостной трехточки на транзисторе VT1, имеющем р-п-р проводимость. По переменному току этот транзистор включен по схеме с общей базой, которая подключена к шине корпуса через конденсатор C3. Положение рабочей точки транзистора VT1 определяется параметрами делителя напряжения, в состав которого входят резисторы R3 и R4. Эти же резисторы совместно с резистором R5 образуют схему стабилизации положения рабочей точки. Резонансный контур LC-генератора включен в цепь коллектора транзистора VT1 и представляет собой параллельный колебательный контур, который образован катушкой индуктивности L1 и подстроенным конденсатором C6. Варикап VD1 подключен параллельно резонансному контуру.

Изменение управляющего напряжения на варикапе VD1, инициированного модулирующим сигналом, приводит к соответствующему изменению емкости варикапа, что приводит к изменению резонансной частоты контура LC-генератора в небольших пределах. Модулированный сигнал снимается с эмиттера транзистора VT1 и подается на базу транзистора VT2, на котором выполнен буферный каскад. К эмиттеру транзистора VT2 подключена антenna радиомикрофона, в качестве которой можно использовать отрезок изолированного провода длиной от 10 см до 30 см.

Катушка L1 наматывается на каркасе без сердечника диаметром 5 мм и содержит 4 витков медного посеребренного провода диаметром 1 мм. В некоторых радиоконструкторах, основанных на рассматриваемой схеме, катушка L1 изготовлена непосредственно на печатной плате. Методики расчета и изготовления так называемых плоских печатных катушек неоднократно приводились в специализированной литературе, например, в статье Ю. Янкина, опубликованной в №11 журнала «РАДИО» в 1976 году, и поэтому в данной книге не рассматриваются.

Тем не менее, необходимо отметить, что в данной конструкции основное влияние на значение рабочей частоты LC-генератора оказывают параметры катушки L1 и подстроечного конденсатора С6. Если значение резонансной частоты контура обозначить как F (МГц), индуктивность катушки L1 как L (мкГ), а емкость конденсатора С6 как C (пФ), то взаимосвязь между этими величинами определяется следующей формулой:

$$F^2 \approx 25300 : (LC).$$

Используя приведенное соотношение можно рассчитать, к примеру, значение индуктивности катушки L1 при использовании подстроечного конденсатора С6 емкостью 5 – 25 пФ для выбранного диапазона рабочих частот в пределах от 66 МГц до 74 МГц. В этом случае сигналы радиомикрофона можно прослушивать на обычный УКВ-радиоприемник.

Дальность действия такого радиомикрофона зависит от величины напряжения питания и может составлять от 10 м до 100 м. В свою очередь, напряжение питания может быть от 3 В до 15 В. При выборе величины напряжения питания следует соответствующим образом откорректировать и номиналы отдельных элементов.

Транзистор типа BF414 можно заменить, например, транзистором типа BF440 или BF441. Вместо транзистора типа BF240 можно

использовать импортный транзистор типа BF241, а также отечественный транзистор типа КТ312В.

Налаживание данной конструкции следует начать с подбора сопротивления резистора R1. При использовании в качестве источника НЧ-сигнала электретных микрофонов различных типов величина сопротивления этого резистора выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. После этого подбирается величина сопротивления резистора R2 таким образом, чтобы падение напряжения на вариакапе VD1 было равно выбранному напряжению смещения, обеспечивающему работу в так называемом режиме молчания.

Грубая настройка рабочей частоты ВЧ-генератора осуществляется изменением расстояния между витками катушки L1, а точная настройка обеспечивается с помощью подстроичного конденсатора C6. При использовании в данной конструкции плоской печатной катушки для настройки частоты используется конденсатор C6.

Необходимо отметить, что одной из особенностей данной конструкции является возможность выбора номиналов большинства входящих в ее состав пассивных элементов в процессе налаживания в сравнительно большом диапазоне. Например, сопротивление резистора R1 может быть от 6,8 кОм до 15 кОм, сопротивление резистора R2 – от 22 кОм до 47 кОм, а сопротивление резисторов R3 и R4 может составлять от 9,1 кОм до 22 кОм. Значение сопротивления резистора R5 следует выбирать в пределах от 3,3 кОм до 4,7 кОм, а резистора R6 – в пределах от 1,5 кОм до 3,3 кОм. Емкость конденсатора C1 может быть от 1000 пФ до 1500 пФ, емкость конденсатора C2 – от 1000 пФ до 0,01 мкФ, а емкость конденсаторов C3 и C7 может составлять от 0,01 мкФ до 0,033 мкФ. Значение емкости конденсатора C4 следует выбирать в пределах от 22 пФ до 33 пФ, а конденсатора C5 – от 6,8 пФ до 8,2 пФ.

Принципиальная схема еще одного варианта радиомикрофона с модулятором на вариакапе приведена на рис. 5.10. Его особенностью является использование биполярного и полевого транзисторов.

В данной конструкции для усиления сигнала, сформированного электретным микрофоном, используется однокаскадный микрофонный усилитель, выполненный на биполярном транзисторе VT1. Низкочастотный сигнал на базу транзистора подается через разделительный конденсатор C1. Максимальная амплитуда неискаженного усиленного сигнала на выходе микрофонного усилителя будет в том случае, когда напряжение на коллекторе транзистора VT1

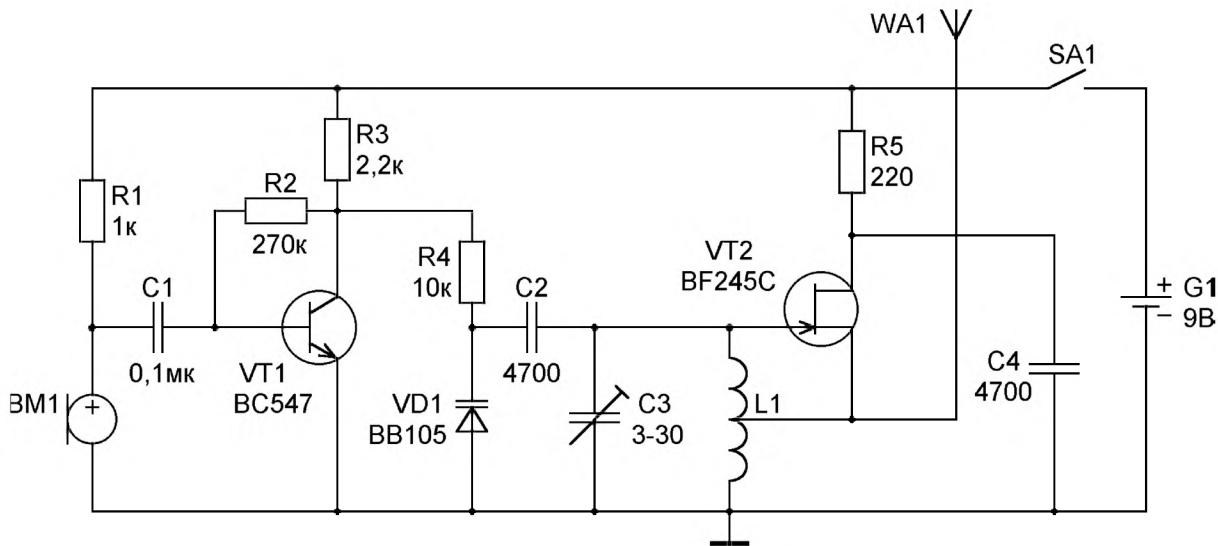


Рис. 5.10. Принципиальная схема радиомикрофона на биполярном и полевом транзисторах с модулятором на варикапе

составляет примерно половину от величины напряжения питания каскада. Для стабилизации положения рабочей точки транзистора VT1 в данном случае используется схемотехническое решение с цепью отрицательной обратной связи по напряжению. Резистор R2, образующий цепь ООС, подключен между коллектором и базой транзистора VT1. Принцип действия такой схемы стабилизации был подробно рассмотрен в соответствующем разделе одной из предыдущих глав.

Усиленный НЧ-сигнал, снимаемый с коллекторной нагрузки транзистора VT1 (резистор R3), через резистор R4 подается на варикап VD1 и инициирует изменение емкости варикапа по закону модулирующего сигнала. Напряжение смещения подается на варикап через резисторы R3 и R4. Необходимость использования резистора R4 объясняется различиями между величинами коллекторного напряжения транзистора VT1 микрофонного усилителя и напряжения смещения варикапа VD1.

Варикап VD1 подключен параллельно резонансному контуру, образованному подстроечным конденсатором С3 и катушкой индуктивности L1. Этот контур входит в состав высокочастотного LC-генератора, выполненного по схеме Хартли на полевом транзисторе VT2, который по переменному току включен по схеме с общим стоком. Конденсатор С2 сравнительно большой емкости обеспечивает развязку варикапа VD1 и затвора транзистора VT2 по постоянному току. Транзистор VT2 по переменному току включен по схеме истокового повторителя, то есть с общим стоком. Электрод стока этого транзистора замкнут на шину корпуса через конденсатор С4. Прин-

цип действия LC-генератора, выполненного на полевом транзисторе по схеме Хартли, был подробно рассмотрен в соответствующем разделе одной из предыдущих глав.

При поступлении на варикап модулирующего НЧ-сигнала происходит изменение его емкости. Поскольку варикап VD1 включен параллельно резонансному контуру, образованному конденсатором С3 и катушкой L1, то по закону модулирующего сигнала изменяется и частота формируемого ВЧ-генератором сигнала. Модулированный сигнал, формируемый на выходе генератора, снимается с электрода истока полевого транзистора VT2. Для приема сигналов данного радиомикрофона можно использовать любой вещательный радиоприемник, имеющий FM-диапазон.

Питание данного радиопередающего устройства осуществляется от обычной батарейки типа «Крона» или от аккумулятора напряжением 9 В. Напряжение питания электретного микрофона снимается с резистора R1, а величина напряжения смещения, подаваемого на варикап VD1, определяется значениями сопротивлений резисторов R3 и R4.

Транзистор типа BC547 зарубежного производства можно заменить, например, отечественным транзистором типа КТ3102Б или КТ645А.

Катушка L1 наматывается на каркасе с ферритовым сердечником диаметром 4 мм и содержит 5 витков медного посеребренного провода диаметром 1 мм с выводом от середины. В зарубежных источниках встречаются варианты рассматриваемой конструкции, в которых катушка L1 выполнена непосредственно на печатной плате.

Налаживание данной конструкции следует начать с подбора сопротивления резистора R1. При использовании в качестве источника НЧ-сигнала электретных микрофонов различных типов величина сопротивления этого резистора выбирается такой, чтобы напряжение питания, подаваемое на микрофон, соответствовало его паспортным данным. Затем подбирается величина сопротивления резистора R3 таким образом, чтобы напряжение на коллекторе транзистора VT1 составляло примерно половину от величины напряжения питания. После этого подбором величины сопротивления резистора R4 устанавливается номинальное напряжение смещения на варикапе VD1, обеспечивающее работу в так называемом режиме молчания.

Грубая настройка рабочей частоты ВЧ-генератора осуществляется изменением расстояния между витками катушки L1, а также перемещением ее сердечника. Точная настройка обеспечивается с помощью подстроечного конденсатора С3.

# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

---

Рассмотренные в данной книге схемотехнические решения, применяемые при разработке узлов и каскадов миниатюрных радиопередающих устройств, а также практические конструкции, естественно, не исчерпывают всего их многообразия, поскольку технический прогресс не стоит на месте. Тем не менее, приведенная в данной книге информация для законопослушных радиолюбителей может послужить отправной точкой в дальнейших самостоятельных изысканиях и экспериментах в области конструирования систем связи малого радиуса действия.

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «АЛЬЯНС-КНИГА» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу: **123242, Москва, а/я 20** или по электронному адресу: **orders@aliants-kniga.ru**.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя. Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в Internet-магазине: **www.aliants-kniga.ru**.

Оптовые закупки: тел. **(495) 258-91-94, 258-91-95**; электронный адрес **books@aliants-kniga.ru**.

Адаменко Михаил Васильевич

## **Шпионские штучки или секреты тайной радиосвязи**

Главный редактор *Мовчан Д. А.*  
*dm@dmk-press.ru*

Редактор *Синяева Г. И.*

Верстка *Чаннова А. А.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 16.11.2009. Формат 70×100  $\frac{1}{16}$ .

Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10. Тираж 1000 экз.

*№*

Web-сайт издательства: [www.dmk-press.ru](http://www.dmk-press.ru)

Internet-магазин: [www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)