

## Глава 1

### ВВЕДЕНИЕ

#### § 1.1. Нелинейные сопротивления

В современной радиотехнике широко применяются электронные лампы и другие нелинейные сопротивления. С их помощью осуществляются генерирование, усиление, преобразование формы и частоты электрических колебаний, а также модуляция и детектирование.

Для уяснения роли, которую играют указанные выше процессы в радиотехнике, рассмотрим блок-схему радиотелефонной связи с амплитудной модуляцией (АМ) и упрощенную блок-схему радиолокатора.

Блок-схема радиотелефонной связи распадается на блок-схемы радиопередатчика и радиоприемника. Начнем с блок-схемы радиопередатчика, изображенной на рис. 1.1. На этом же рисунке изображены временные диаграммы напряжений в разных частях блок-схемы <sup>1)</sup>.

Генератор высокой частоты генерирует высокочастотные синусоидальные колебания. Эти колебания усиливаются усилителем высокой частоты и подаются на модулируемую ступень. На эту ступень, кроме того, подаются от микрофона колебания звуковой частоты, предварительно усиленные усилителем низкой частоты. В модулируемой ступени осуществляется амплитудная модуляция — происходит изменение амплитуды колебаний высокой частоты в соответствии с изменением напряжения, полученного от микрофона. Далее АМ колебания снова усиливаются и затем излучаются антенной.

Таким образом, в радиотелефонном передатчике мы сталкиваемся с *генерированием синусоидальных колебаний, усилением модулированных и немодулированных колебаний высокой частоты, усилением колебаний звуковой частоты и модуляцией.*

Перейдем к приемнику. На рис. 1.2 изображены блок-схема так называемого супергетеродинного приемника АМ колебаний и временные диаграммы напряжений в различных частях схемы.

Колебания, наведенные электромагнитным полем передатчика в приемной антенне, сначала усиливаются усилителем высокой частоты, настроенным на несущую частоту принимаемых колебаний. Для того, чтобы осуществить высококачественный прием, усиление

---

<sup>1)</sup> Номера диаграмм на рис. 1.1, 1.2 и 1.3 указывают точки блок-схем, к которым относятся эти диаграммы.

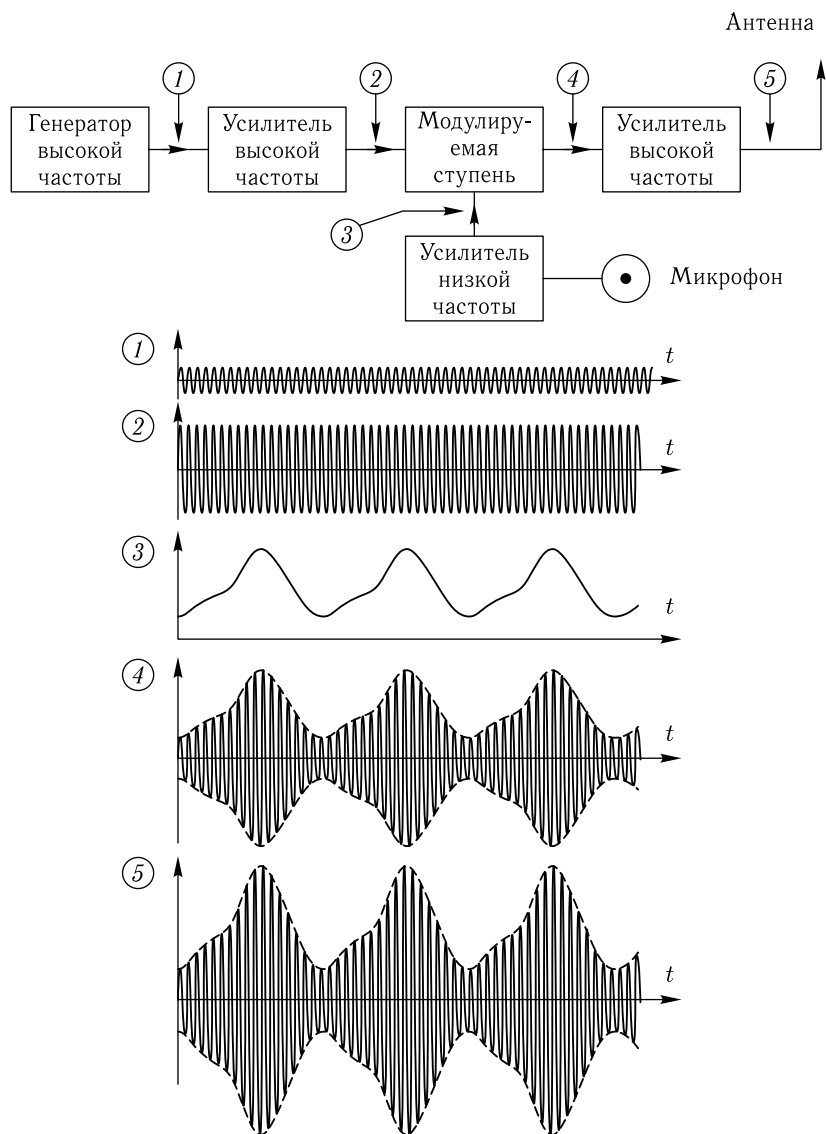


Рис. 1.1

колебаний до подачи их на детектор должно быть очень большим, что требует применения многолампового усилителя высокой частоты. Перестройка многолампового усилителя с одной частоты на другую, что необходимо при переходе от приема одного радиопередатчика к приему другого, связана с перестройкой многих резонансных

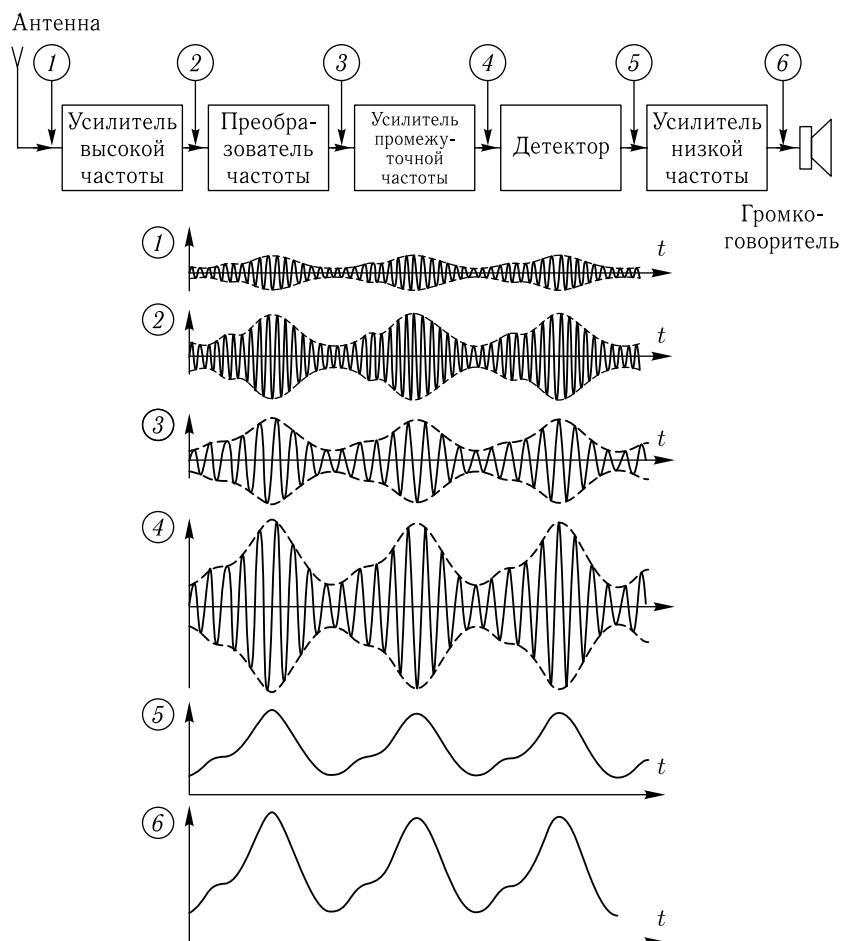


Рис. 1.2

контуров. Это сильно усложняет приемник. Поэтому, независимо от частоты принимаемого сигнала, основное усиление колебаний до подачи их на детектор производится на неизменной частоте, называемой промежуточной (в этом заключается особенность супергетеродинного приемника).

Преобразование колебаний частоты принимаемого сигнала в колебания промежуточной частоты происходит в преобразователе частоты. Закон модуляции при преобразовании сохраняется неизменным.

Колебания промежуточной частоты усиливаются усилителем промежуточной частоты и попадают на детектор. Колебания звуковой

частоты, полученные на выходе детектора, усиливаются усилителем низкой частоты и подаются на громкоговоритель.

В приемнике мы встречаемся, следовательно, с двумя новыми процессами: *преобразованием частоты и детектированием*.

Рассмотрим, наконец, упрощенную блок-схему радиолокатора (рис. 1.3).

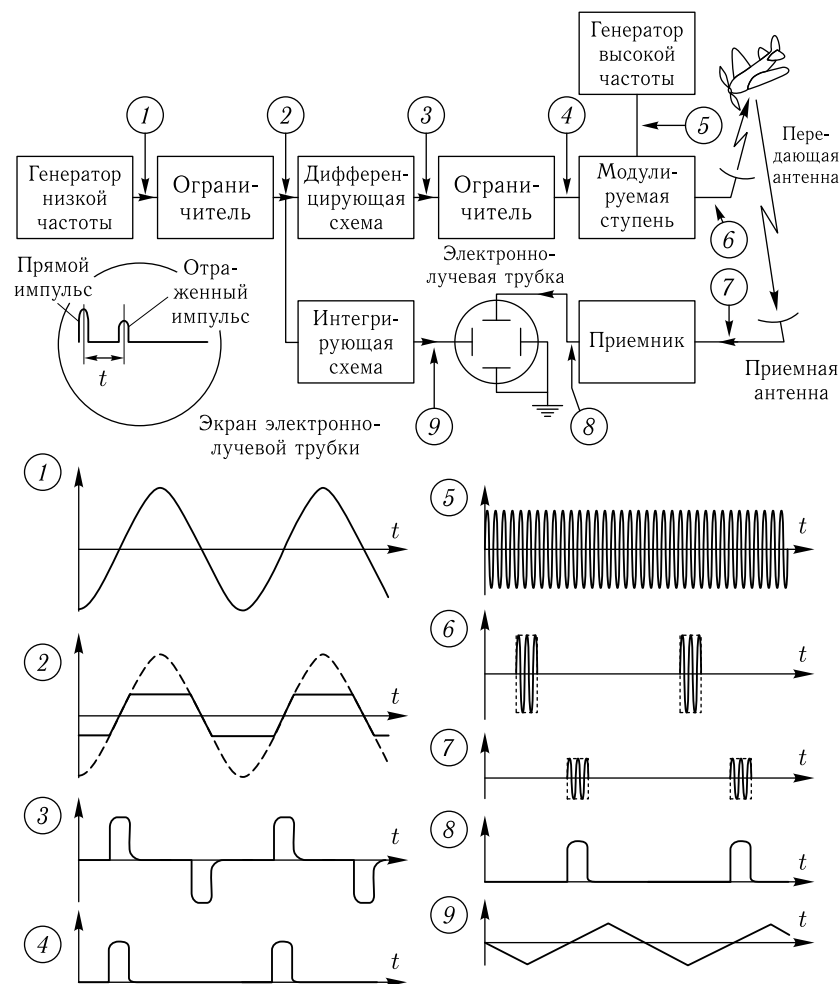


Рис. 1.3

Генератор низкой частоты генерирует синусоидальные колебания постоянной частоты. Далее это синусоидальное напряжение поступает на *ограничитель*, который ограничивает поданное на него напряжение

по максимуму и минимуму и превращает, таким образом, колебания синусоидальной формы в трапецевидные. С выхода ограничителя трапецевидное напряжение поступает одновременно на *дифференцирующую* и *интегрирующую* схемы. Дифференцирующая схема позволяет получить на выходе напряжение, примерно пропорциональное производной от входного напряжения по времени, т. е. она превращает напряжение трапецевидной формы в короткие импульсы, форма которых близка к прямоугольной. Полярность импульсов определяется знаком производной входного напряжения.

Положительные и отрицательные импульсы, полученные на выходе дифференцирующей схемы, поступают на ограничитель по минимуму, который «обрезает» импульсы отрицательной полярности. Описанный способ получения коротких импульсов не единственный — в дальнейшем будут рассмотрены и другие. Периодическая последовательность положительных импульсов поступает на модулируемую ступень, куда одновременно подаются высокочастотные колебания от генератора высокой частоты. В этой ступени образуются импульсы колебаний высокой частоты, огибающая которых определяется формой кривой напряжения, поданного на модулятор с ограничителя. Импульсы колебаний высокой частоты поступают на передающую антенну, которая излучает их узким направленным лучом.

Если на пути распространения этих импульсов встречается препятствие, например самолет, то они отражаются от него. Часть отраженной энергии возвращается к радиолокатору и попадает на приемную антенну, а затем в приемник. На выходе приемника получается периодическая последовательность импульсов. Принятые импульсы запаздывают относительно излучаемых на время  $t$ , которое необходимо для того, чтобы электромагнитные колебания прошли путь от радиолокатора до препятствия и обратно. Измерив это время и зная скорость распространения электромагнитной энергии, можно определить расстояние до препятствия.

Измерение времени производится следующим образом. Трапецевидное напряжение с выхода первого ограничителя подается на интегрирующую схему, позволяющую получить на выходе напряжение, примерно пропорциональное интегралу от входного напряжения. Следовательно, напряжение на выходе интегрирующей схемы будет иметь форму, близкую к пилообразной. Оно подается на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки и заставляет луч равномерно двигаться по экрану трубки слева направо и справа налево и прочерчивать на экране светящуюся горизонтальную линию. Заметим, что в тот самый момент, когда передающая антенна излучает высокочастотный импульс, светящееся пятно на экране трубки находится в крайнем левом положении. На вертикально отклоняющие пластины подается напряжение с выхода приемника.

Так как отраженные от препятствия импульсы, принятые приемником, запаздывают относительно излучаемых импульсов на время  $t$ ,

то изображение их на экране электронно-лучевой трубки находится не в начале горизонтальной линии, а будет смещено вправо. Это смещение тем больше, чем больше расстояние до препятствия. Зная скорость перемещения луча, можно прокалибровать экран трубки в единицах времени или, что удобнее, расстояния. Направление на отражающий предмет определяют по положению передающей и приемной антенн.

Рассмотренная блок-схема радиолокатора не является единственно используемой, на практике применяется еще и много других.

Как видно из сказанного, процессы в схеме радиолокатора очень многообразны.

Все рассмотренные процессы осуществляются с помощью схем, содержащих электронные лампы и другие приборы, которые являются *нелинейными сопротивлениями*.

*Нелинейными сопротивлениями называют такие элементы цепей, для которых зависимость тока от приложенного напряжения (вольтамперная характеристика), построенная в декартовых координатах, не является прямой линией.*

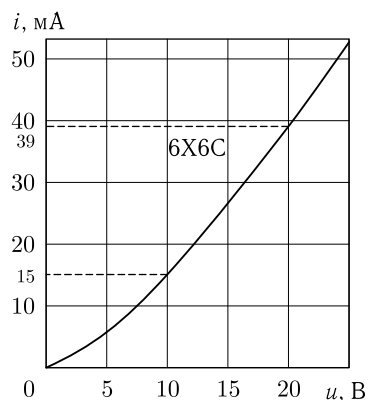


Рис. 1.4

Примеры вольтамперных характеристик некоторых нелинейных сопротивлений: диода, триода и газоразрядной лампы изображены на рис. 1.4, 1.5 и 1.6.

Нелинейные сопротивления в виде двухполюсника, ток через который зависит только от напряжения, приложенного к его зажимам, называются *неуправляемыми* нелинейными сопротивлениями. Примером такого нелинейного сопротивления является диод<sup>1)</sup>.

Если ток через двухполюсник, представляющий нелинейное сопротивление, зависит, помимо напряжения, приложенного к его зажимам,

еще и от других параметров, то такое нелинейное сопротивление называется *управляемым*, а эти параметры *управляющими параметрами*.

Примером управляемого нелинейного сопротивления является фотоэлемент, ток через который зависит как от приложенного напряжения, так и от освещенности фотоэлемента.

*Многоэлектродные электронные лампы являются также управляемыми нелинейными сопротивлениями*, так как их можно

<sup>1)</sup> Вообще говоря, анодный ток через диод зависит и от других параметров, например, от напряжения накала. Однако эти параметры обычно можно считать во время работы постоянными.

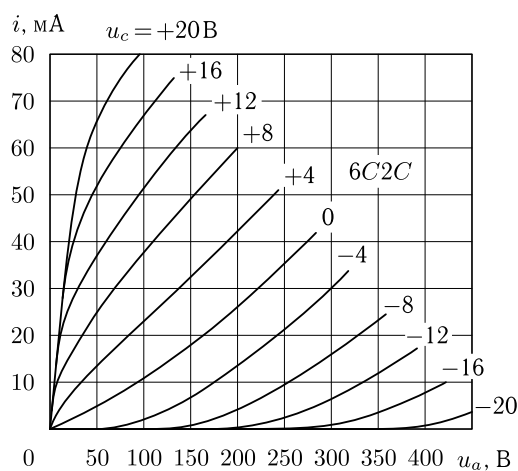


Рис. 1.5

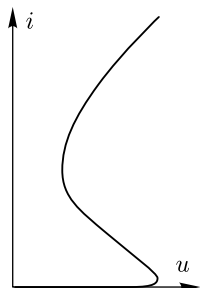


Рис. 1.6

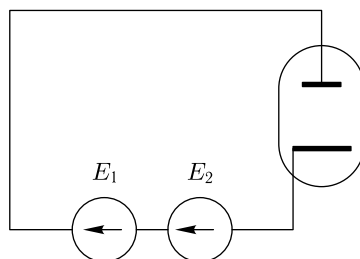


Рис. 1.7

представить как двухполюсники с зажимами, соответствующими катоду и аноду, а напряжения, приложенные к сеткам, считать управляющими параметрами. Управляемые нелинейные сопротивления характеризуются семейством вольтамперных характеристик (например, рис. 1.5).

Анализ схем, содержащих нелинейные сопротивления, много сложнее, чем анализ линейных схем с постоянными параметрами, изучавшихся в первой части курса. Причинами этого является то, что для схем с нелинейными сопротивлениями неприменим принцип наложения (суперпозиции) и то, что под действием синусоидального напряжения ток в таких схемах получается несинусоидальным.

В справедливости сказанного нетрудно убедиться на простейших примерах.

В схеме рис. 1.7 на диод действуют две последовательно включенные эдс  $E_1 = E_2 = 10$  В. В соответствии с характеристикой диода (рис. 1.4) под действием каждой из эдс в отдельности ток через диод

должен быть равным 15 мА. Таким образом, по принципу наложения, под действием двух эдс одновременно ток должен бы равняться  $15 + 15 = 30$  мА. В действительности же при одновременном действии двух эдс напряжение на диоде равно 20 В, и ток через диод равен 39 мА, как это следует из рис. 1.4.

Неприменимость принципа наложения к схемам с нелинейными сопротивлениями не позволяет находить токи и напряжения, вызванные в них действием сложных эдс, путем разложения этих эдс на отдельные синусоидальные составляющие и решения задачи отдельно для каждой из составляющих, как это широко применялось в первой части курса.

На рис. 1.8 изображена временная диаграмма тока, протекающего через этот диод под действием приложенной к нему эдс, равной

$$E = 25 \cos \omega t \text{ В.}$$

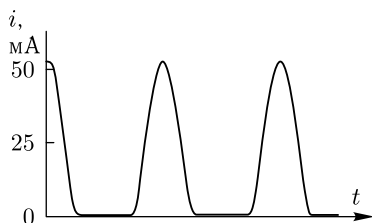


Рис. 1.8

Эта временная диаграмма построена графически на основании характеристики рис. 1.4. Из рисунка видно, что при действии синусоидальной эдс ток оказывается несинусоидальным. Последнее обстоятельство делает неприменимым положение, широко используемое в теории переменных токов и говорящее, что под действием синусоидальной эдс токи во всех цепях в установившемся режиме синусоидальны и имеют ту же частоту, что и эдс.

Указанные особенности схем с нелинейными сопротивлениями не позволяют безоговорочно применять к ним рассмотренные ранее методы теории переменных токов, операционный метод, а также метод спектральных функций.

## § 1.2. Основные методы исследования схем с нелинейными сопротивлениями

Обычно не представляет большого труда составить с помощью уравнений Кирхгофа дифференциальные уравнения для токов и напряжений в схемах, содержащих нелинейные сопротивления. Однако методика решения получаемых при этом так называемых нелинейных дифференциальных уравнений разработана лишь для отдельных частных



случаев, далеко не охватывающих всех задач, с которыми приходится сталкиваться радиоинженерам. Кроме того, некоторые методы решения нелинейных дифференциальных уравнений настолько сложны, что ими для решения технических задач не пользуются.

Наиболее полно в настоящее время разработана методика решения нелинейных дифференциальных уравнений первого и второго порядка, описывающих процессы в ламповых генераторах, содержащих один или два реактивных элемента. Особенно много в разработке этого вопроса было сделано советскими математиками и физиками Л.И. Мандельштамом, Н.Д. Папалекси, А.А. Андроновым и др. С такими уравнениями мы встречаемся в гл. 5, 6 и 13.

Трудности решения нелинейных дифференциальных уравнений заставили разработать ряд приближенных упрощенных методов расчета, нашедших широкое распространение.

Задачи, которые приходится решать в радиотехнике при анализе и расчете схем с нелинейными сопротивлениями, можно в основном разбить на следующие группы:

1. *Анализ безинерционных схем*, т.е. схем, не содержащих реактивных элементов. Это — схемы, в которых напряжения и токи постоянны или меняются настолько медленно, что емкостями и индуктивностями можно пренебречь.

Этот случай сравнительно прост и сводится к решению (чаще всего графическому) обычных алгебраических уравнений. Он будет рассмотрен во 2-й главе при анализе ограничителей, служащих для преобразования формы напряжений, и усилителей постоянного напряжения (так называют усилители, могущие усиливать сколь угодно медленные изменения напряжения).

2. *Анализ схем, в которых переменные составляющие напряжений, действующих на нелинейные сопротивления, достаточно малы* (постоянные составляющие могут быть любыми). Метод, применяемый для анализа этого случая, можно назвать методом *линейных схем замещения*. Он сводится к отысканию постоянных составляющих напряжения или тока способом, применяемым в предыдущем случае (переменными составляющими при этом пренебрегают), после чего схема с нелинейными сопротивлениями приводится к линейной схеме, которая может быть проанализирована одним из известных методов (методом дифференциальных уравнений, комплексным методом теории переменных токов, операционным методом и т. д.).

Этот метод в основном применяется при анализе различных усилительных схем, если они работают при достаточно малых напряжениях, а также при анализе устойчивости равновесия. Он будет рассмотрен в гл. 3 и 7.

В этих вопросах многое сделано отечественными учеными А.М. Ляпуновым, А.И. Бергом, А.В. Михайловым, Я.З. Цыпкиным и Ю.И. Неймарком.

3. *Анализ схем, в которых на нелинейное сопротивление действует синусоидальное колебание с большой амплитудой и постоянная или медленно меняющаяся составляющая.* К этому случаю обычно приводит анализ работы детекторов, модуляторов и генераторов синусоидальных колебаний (гл. 8–13). Метод, применяемый при анализе этих схем, мы будем называть *методом первой гармоники*. В его разработке сыграли большую роль советские ученые: М.В. Шулейкин, А.И. Берг, Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов, А.Л. Минц, И.Г. Кляцкин, Ю.Б. Кобзарев, Л.Б. Слепян и др.

4. *Анализ схем, в которых на нелинейные сопротивления, помимо известных синусоидальных колебаний, действуют еще достаточно малые добавочные колебания.* Здесь при отыскании добавочных колебаний задача сводится к рассмотрению линейных систем с периодически меняющимися параметрами, т. е. таких систем, в которых токи через сопротивления пропорциональны напряжениям, но коэффициенты пропорциональности периодически меняются во времени. Для таких систем справедлив принцип наложения, что упрощает анализ; однако в них частоты эдс и токов, ими вызванных, могут не совпадать. К этому случаю обычно приводит анализ работы преобразователей частоты и так называемых синхронных детекторов (гл. 11), а также анализ устойчивости работы схем с синусоидальными колебаниями (гл. 13). Глубокая разработка этих вопросов была проведена А.М. Ляпуновым (устойчивость колебаний), В.И. Сифоровым (преобразователи частоты) и др.