

Предисловие

Объектами исследования данной монографии являются транзисторные усилительно-ограничительные устройства, в основе работы которых лежат принципы усиления, ограничения и стабилизации уровня выходной мощности. К усилительно-ограничительным устройствам (кроме усилителей-ограничителей (УО)) вполне можно отнести генераторы с внешним возбуждением (ГВВ), усилители мощности (УМ), автогенераторы (АГ), генераторы гармоник (ГГ) и, как следствие, умножители частоты, так как все эти устройства так или иначе работают либо с усилением, либо с ограничением, либо со стабилизацией выходной мощности. Совместное рассмотрение перечисленных устройств является методологически вполне обоснованным по следующим причинам. Часто термины «усилитель мощности» и «генератор с внешним возбуждением» вообще используются как синонимы. А термином «генератор гармоник» широко пользуются при описании работы ГВВ и усилителей-ограничителей. Под автогенераторами часто понимают автономные генераторы гармонических колебаний или генераторы с внутренним возбуждением. Перечисленные устройства объединяет одно: все они являются транзисторными преобразователями мощности постоянного тока источника питания в мощность выходного высокочастотного колебания основной или гармонической частоты либо при помощи входного возбуждающего сигнала, либо без него.

Вопросам теории и проектирования транзисторных усилительно-ограничительных устройств, включающих (с учетом сделанных ранее замечаний) усилители мощности, генераторы с внешним возбуждением, автогенераторы, генераторы гармоник, посвящено достаточное число работ, например [1–5]. Вместе с тем особенности разработки усилителей-ограничителей рассмотрены лишь в одной книге [6], результаты которой получены сорок лет назад и изрядно устарели. При помощи предлагаемой монографии предпринята попытка восполнить данный пробел.

Для удобства изложения материала первая глава посвящена общим сведениям о транзисторных усилителях-ограничителях сначала напряжений, а затем и мощности. Во второй и третьей главах рассмотрены вопросы проектирования транзисторных усилителей-ограничителей мощности, которые работают в различных (недонапряженном, перенапряженном и ключевых) режимах. Четвертая гла-

ва посвящена вопросам проектирования транзисторных усилителей-ограничителей мощности, которые обеспечивают подавление слабых побочных (гармонического или узкополосного) колебаний. В пятой главе предложены методики проектирования транзисторных генераторов гармоник, а также автогенераторов, выполненных на основе усилителей-ограничителей мощности. В последней главе продемонстрированы способы и отдельные примеры проектирования различных усилительно-ограничительных устройств.

Все использованные в монографии материалы получены в результате научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, которые в течение тридцати лет проводилась докторами технических наук А.В. Барановым в ОАО «НПП «Салют» и ООО «Эльдорадо» (г. Нижний Новгород) и С.Л. Моругиным на кафедре «Компьютерные технологии в проектировании и производстве» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Материалы монографии являются частью курса «Проектирование устройств СВЧ», который в НГТУ читается студентам, обучаемым по специальности «Проектирование и технология электронных средств».

Предисловие, заключение и глава 1 написаны авторами совместно. Разделы 2.2, 2.3, 3.2–3.4, 4.1, 4.4 и 4.3.2–4.3.4 написаны С.Л. Моругиным, остальные разделы глав 2–4 и главы 5, 6 — А.В. Барановым.

Монография одобрена к опубликованию решением XIX Координационного научно-технического семинара по СВЧ технике, состоявшегося 5–7 сентября 2017 года в поселке Хахалы Нижегородской области.

Г л а в а 1

Общие сведения о транзисторных усилителях-ограничителях мощности

В качестве вводного материала главы использовано содержание отдельных разделов монографии [6], где даются общие сведения об усилителях-ограничителях напряжений. Дополнительно в данной главе приводятся также общие сведения об усилителях-ограничителях мощности.

1.1. Разновидности ограничителей напряжений

Ограничитель напряжения представляет собой радиотехническое устройство, предназначенное для выполнения нелинейного преобразования электрического колебания. В результате этого преобразования напряжение сигнала на выходе ограничителя не превышает определенного значения при изменении амплитуды входного сигнала в широком диапазоне. В зависимости от воздействия, которое оказывается на форму проходящего через ограничитель сигнала, традиционно, еще с пятидесятых годов прошлого столетия [6], различают два основных типа ограничителей:

- ограничители мгновенных значений напряжений;
- ограничители амплитуды синусоидального напряжения.

Ограничители мгновенных значений напряжений широко используются в радиотехнических устройствах различного назначения, например для выполнения следующих задач:

- формирования импульсов прямоугольной формы из синусоидального (или искаженного) колебания;
- устранения импульсных помех, уровень которых превышает уровень полезного сигнала;
- отделения синхронизирующих импульсов от сигнала телевизионного изображения.

В ограничителях мгновенных значений напряжений выходное напряжение по форме существенно отличается от входного. Об этом свидетельствуют формы сигналов на входе $u_{\text{вх}}(t)$ и выходе $u_{\text{вых}}(t)$ ограничителя мгновенных значений напряжений, которые представлены на рис. 1.1.

Ограничители мгновенных значений напряжений в зависимости от формы характеристик ограничения подразделяются на следующие типы:

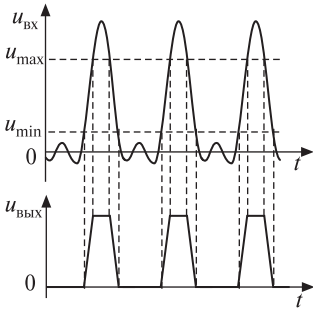


Рис. 1.1. Формы сигналов на входе и выходе ограничителя мгновенных значений напряжений

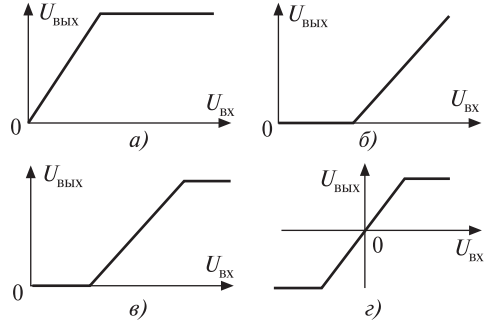


Рис. 1.2. Амплитудные характеристики ограничителей: а — для ограничителя по максимуму; б — для ограничителя по минимуму; в — для ограничителя по максимуму и минимуму; г — для двустороннего ограничителя

- ограничители по максимуму или по-другому — ограничители сверху;
- ограничители по минимуму (называемые также ограничителями снизу);
- ограничители по максимуму и минимуму (или так называемые ограничители сверху и снизу);
- двусторонние ограничители.

Идеализированные амплитудные характеристики $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ ограничителей мгновенных значений напряжений для перечисленных типов ограничителей приведены на рис. 1.2.

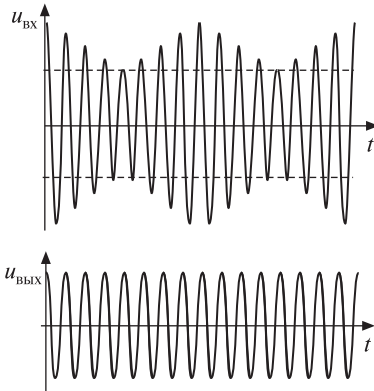


Рис. 1.3. Типовые формы сигналов амплитудного ограничителя

В ограничителях амплитуды синусоидального напряжения выходное колебание имеет практически синусоидальную форму. При прохождении через них претерпевает изменение лишь форма огибающей амплитуды преобразуемого колебания в отличие от ограничителей мгновенных значений напряжений. Именно по этой причине ограничители амплитуды синусоидального напряжения часто называют амплитудными ограничителями (АО).

На рис. 1.3 изображены типовые формы сигнала на входе $u_{\text{вх}}(t)$ и выходе $u_{\text{вых}}(t)$ ограничителя синусоидального напряжения. Пунктирными линиями на графике отмечена пороговая амплитуда ограничения $E_{\text{пор}}$.

В общем случае амплитудный ограничитель состоит из усиительного прибора (транзистора), частотно-избирательных цепей и нелинейного элемента, параметры которого зависят от уровня входного колебания. В некоторых разновидностях АО функции нелинейного элемента выполняет сам транзистор. Частотно-избирательные цепи АО настраиваются на основную частоту входного колебания и осуществляют эффективную фильтрацию побочных (высших) гармоник несущей частоты. Другими словами, амплитудный ограничитель представляет собой разновидность нелинейного усилителя.

1.2. Способы построения амплитудных ограничителей

Особенности и пути технической реализации амплитудных ограничителей основаны на нелинейных свойствах усилителей. Традиционно предполагается, что в амплитудных ограничителях транзисторы работают в одном из двух режимов (без учета состояния, соответствующего переходу между ними): линейного усиления или ограничения амплитуды выходного колебания за счет отсечки коллекторного тока. По этой причине ограничение амплитуды в данных нелинейных устройствах достигается путем изменения их коэффициента передачи (усиления) K [6]:

$$K = S_{\text{ср}} R_{\text{экв}}, \quad (1.1)$$

где $S_{\text{ср}}$ — средняя крутизна проходной характеристики транзистора; $R_{\text{экв}}$ — эквивалентное резонансное сопротивление частотно-избирательной нагрузки на выходе транзистора.

Из выражения (1.1) следует, что управление величиной K обеспечивается при помощи изменения либо средней крутизны $S_{\text{ср}}$, либо сопротивления $R_{\text{экв}}$. В соответствии с этим при построении амплитудных ограничителей применяются способы, в основе которых лежат два следующих принципа:

- автоматическое изменение средней крутизны транзистора;
- шунтирование резонансной нагрузки нелинейными элементами.

При использовании любого из указанных методов может быть обеспечено как одностороннее (несимметричное), так и двустороннее (симметричное) ограничение колебания. Одностороннее ограничение в АО с шунтированием нагрузки достигается включением параллельно частотно-избирательной нагрузке одного или нескольких нелинейных элементов (полупроводниковых диодов, транзисторов и др.). В этом случае их общая вольт-амперная характеристика является несимметричной, а ее ветви оказывают существенно различное влияние на положительные и отрицательные полуволны ограничиваемого колебания. Шунтирование нагрузки одной или несколькими парами нелинейных элементов со встречно-параллельным со-

единением их в паре позволяет получить симметричную суммарную вольт-амперную характеристику, обеспечив при этом двустороннее ограничение сигнала.

Требуемая форма зависимости средней крутизны транзистора от уровня входного колебания обеспечивается работой транзистора в режиме отсечки коллекторного тока. Режим переменной отсечки тока обычно достигается введением в состав АО цепей автоматического смещения, напряжение на которых зависит от уровня входного колебания. При этом рабочая точка каскада АО перемещается в область вольт-амперной характеристики, соответствующей отсутствию тока через транзистор на протяжении определенной части периода входного колебания.

Одностороннее ограничение сигнала в каскаде АО, в котором используется управление средней крутизной, обеспечивается при использовании одного транзистора. В этом случае цепь автоматического смещения построена так, что увеличение уровня входного сигнала вызывает перемещение рабочей точки в ту область вольт-амперной характеристики, которая соответствует меньшей средней крутизне. По аналогичному принципу работают некоторые системы автоматической регулировки усиления, которые вполне могут применяться и для амплитудного ограничения.

Двустороннее ограничение колебания за счет управления средней крутизной транзистора может быть получено в каскаде АО с двумя транзисторами, имеющими непосредственную связь по постоянному току. Двухстороннее ограничение сигнала может также обеспечить устройство в виде двух транзисторных каскадов, соединенных между собой таким образом, что их суммарная вольт-амперная характеристика является симметричной. Для реализации режима двухстороннего ограничения требуется широкополосная цепь, передающая на вход второго каскада весь спектр выходного сигнала первого каскада. Кроме того, особенностью проектирования АО с двусторонним ограничением сигнала является стремление обеспечить постоянное положение средней линии рабочих точек на вольт-амперной характеристике транзисторов при изменении входного сигнала.

1.3. Основные технические показатели ограничителей амплитуды

Чтобы дать исчерпывающую оценку работы АО в различных режимах и меняющихся условиях эксплуатации, амплитудные ограничители описываются набором следующих показателей и характеристик:

- амплитудной характеристикой;
- фазо-амплитудной характеристикой;
- амплитудно-частотной характеристикой;
- фазо-частотной характеристикой;
- входными и выходными характеристиками КСВН или отражения;
- уровнем вносимых шумов;
- стабильностью параметров в различных условиях эксплуатации;
- надежностью.

В силу специфики назначения и работы большинство технических показателей усилителя-ограничителя определяется его амплитудной характеристикой. Идеальная и типовая амплитудные характеристики усилителя-ограничителя представлены на рис. 1.4.

Идеальная амплитудная характеристика усилителя-ограничителя описывается следующими соотношениями:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} K_0 U_{\text{ВХ}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{ВХН}}; \\ U_{\text{ВЫХ ОГР}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} \geq U_{\text{ВХН}}, \end{cases}$$

где $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ — амплитуды входного и выходного напряжения; $U_{\text{ВЫХ ОГР}}$ — выходное напряжение усилителя-ограничителя в режиме ограничения.

Аналогичным образом можно описать типовую амплитудную характеристику усилителя-ограничителя соотношениями:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} K_0 U_{\text{ВХ}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} \leq U_{\text{ВХН}}; \\ K U_{\text{ВХ}} & \text{при } U_{\text{ВХ}} \geq U_{\text{ВХН}}, \end{cases}$$

где коэффициент K находится из выражения (1.1).

На основании анализа приведенных на рис. 1.4 характеристик определим следующие технические показатели усилителя-ограничителя:

- $U_{\text{ВХН}}$ — входное напряжение, при котором начинается горизонтальный участок амплитудной характеристики, т. е. начинается работа режима ограничения выходного напряжения;
- $U_{\text{ВХК}}$ — входное напряжение, при котором горизонтальный участок амплитудной характеристики и режим ограничения выходного напряжения заканчиваются;

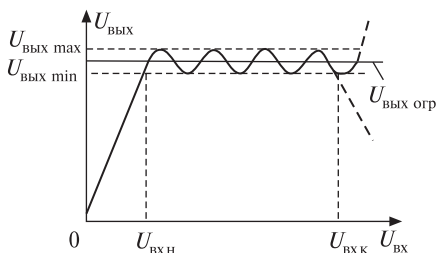


Рис. 1.4. Идеальная и типовая амплитудные характеристики усилителя-ограничителя

- динамический диапазон ограничения по входному напряжению, выраженный в относительных логарифмических единицах (децибелах):

$$D_{\text{вх}} = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{вхк}}}{U_{\text{вхн}}} \right);$$

- K_0 — коэффициент усиления при работе усилителя-ограничителя в линейном режиме, т. е. при $U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вхн}}$;
- точность характеристики (эффективность) ограничения усилителя-ограничителя, определяемая выражением

$$\delta_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх max}} - U_{\text{вх min}}}{U_{\text{вх ср}}},$$

где $U_{\text{вх max}}, U_{\text{вх min}}$ — максимальная и минимальная амплитуды выходного напряжения в динамическом диапазоне $D_{\text{вх}}$; $U_{\text{вх ср}}$ — средняя амплитуда выходного напряжения $U_{\text{вх ср}} = U_{\text{вх орг}}$;

- коэффициент подавления амплитудной модуляции, показывающий, во сколько раз уменьшилась глубина амплитудной модуляции выходного высокочастотного сигнала $m_{\text{вых}}$ по сравнению с глубиной модуляции сигнала $m_{\text{вх}}$ на входе:

$$\beta = \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх}}}.$$

Амплитудно-частотная характеристика, отражающая зависимость модуля коэффициента передачи усилителя-ограничителя от частоты и уровня входного сигнала на каждой из частот, позволяет определить следующие технические показатели:

- полосу рабочих частот ΔF_0 и резонансную частоту f_p высокочастотного усилителя-ограничителя при работе в линейном режиме $U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вхн}}$;
- максимальные относительные изменения полосы пропускания $\Delta F_{\text{max}}/\Delta F_0$ и резонансной частоты $\Delta f_p/f_p$ при изменении уровня входного сигнала во всем диапазоне $D_{\text{вх}}$.

Фазо-частотная и фазо-амплитудная характеристики отражают соответственно зависимости угла сдвига фазы φ между выходными и входными напряжениями от частоты и уровня входного сигнала на каждой из этих частот и позволяют определить следующие технические показатели:

- максимальный фазовый сдвиг φ_{max} в полосе пропускания ΔF_0 либо максимальное отклонение фазовой характеристики от идеальной (линейной);
- время группового запаздывания сигнала τ_0 на резонансной частоте f_p , минимальное τ_{min} и максимальное τ_{max} — в полосе пропускания ΔF_0 усилителя-ограничителя;