

И. Г. МАМОНКИН

ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

И. Г. МАМОНКИН

ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА

1958

ЛЕНИНГРАД

В книге излагаются основные вопросы теории и расчета импульсных усилителей различного назначения. Помимо строгих методов, существенное внимание уделено приближенным методам оценки искажений в многокаскадных схемах. Рассмотрены многочисленные способы увеличения площади усиления, включая использование обратных связей, распределенного усиления, корректирующих элементов, запаздывающей коррекции и др. Излагается методика расчета всех основных и вспомогательных элементов усилительных схем, основанная на допустимой величине искажений в этих цепях, даются оценки устойчивости и выбор оптимальных параметров многокаскадных схем.

Книга рассчитана на широкие инженерно-технические круги и студентов радиотехнических факультетов высших учебных заведений.

А в т о р — Игорь Григорьевич Мамонкин
ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Редактор *А. М. Николаев*

Технич. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 6/III 1958 г.

Подписано к печати 25/VI 1958 г.

Т-06173.

Бумага 70×108¹/₁₆.

17,81 печ. л.

Уч.-изд. л. 18,8.

Тираж 36 000 экз.

Цена 10 р. 40 к.

Зказ 1096

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Из многообразных задач, стоящих в настоящее время перед техникой импульсного усиления, следует выделить две основные:

1) создание устройств с большой площадью усиления, пригодных для воспроизведения коротких импульсов;

2) разработка инженерных методов расчета многокаскадных схем.

Общее направление книги в значительной степени подчинено цели оказания помощи в решении таких задач.

Решение первой задачи обычно ищется в разработке новых методов построения усилительных устройств. Помимо этого, идут по пути усложнения схем (введение обратных связей, корректирующих устройств и т. д.). И то и другое приводит к тому, что свойства применяемых схем описываются дифференциальными уравнениями все более высоких порядков. Естественно, что нахождение их решений, дающее непосредственный ответ о временных свойствах систем, усложняется с возрастанием порядка уравнений. Трудности часто оказываются столь существенными, что привлечение обычного аппарата анализа (преобразование Лапласа, интеграл Фурье) становится мало эффективным, а иногда и просто невозможным.

Это приводит к тому, что приобретают значение методы анализа, опи-рающиеся на частотно-фазовые характеристики устройств. Поэтому в книге существенное внимание уделяется установлению различных сторон связи

между частотными и временными характеристиками систем, и в особенности приближенным способам оценки временного процесса.

Другой путь преодоления этих трудностей лежит в ином подходе к оценке импульсных искажений. Для этого можно привлечь к анализу переходных процессов аппарат теории вероятностей, что заметно упростит оценку временных свойств многокаскадных усилителей. Существенно, что благодаря этому оценка импульсных искажений может производиться непосредственно по уравнению частотной характеристики без нахождения переходного процесса. Естественно, что это значительно упрощает как выбор параметров, так и анализ свойств усилительных схем.

Точное временное решение наиболее просто находится при использовании преобразования Лапласа. Ввиду того, что оно широко применяется во всех разделах книги, автор счел целесообразным привести основные положения преобразования Лапласа, для того чтобы сделать изложение доступным более широкому кругу читателей.

В основу книги положены лекции, читанные автором в течение ряда лет на радиотехническом факультете МЭИ по курсу «Усилители низкой частоты». Этим в некоторой степени определяется круг затронутых в ней вопросов и направление их развития.

Материал по главам распределяется следующим образом.

Первая глава дает общее знакомство с импульсными усилителями, параметрами, характеризующими их свойства, и работой ламп в усилительных схемах.

Во второй — кратко излагаются основные теоремы теории цепей и преобразования Лапласа. Более подробно обсуждаются выводы, которые можно сделать на основе этих теорем для оценки временных процессов. Показывается возможность привлечения для оценки временного процесса аппарата теории вероятности и эффективность глобальных оценок.

Схемы импульсных усилителей и способы увеличения площади усиления подробно рассмотрены в гл. 3 (без обратной связи) и 4 (с обратной связью). Анализ дополнен графиками, облегчающими выбор параметров схемы по заданным искажениям импульсов.

В гл. 5 дается методика определения параметров различных вспомогательных цепей усилительных схем, базирующаяся на требовании, чтобы искажения, создаваемые ими, не превосходили допустимой величины.

Вопросы суммирования импульсных искажений в многокаскадных схемах рассмотрены в гл. 6, где даются многочисленные графики, облегчаю-

щие оценку результирующих искажений.

В гл. 7 на основе преобразования Фурье подробно рассматриваются многочисленные приближенные способы оценки переходного процесса. Привлекаются интегральные оценки временных процессов и показываются их возможности.

Ограниченный объем книги не позволил остановиться на особенностях работы импульсных усилителей большого динамического диапазона, усилении импульсов очень большой длительности (усилители постоянного тока) и некоторых других вопросах.

Издание книги задержалось. За это время несколько изменились взгляды автора на отдельные вопросы импульсного усиления и методику их изложения. В настоящее время автор считает возможным единообразное рассмотрение полупроводниковых и ламповых усилителей. Однако включение этих вопросов и рассмотрение полупроводниковых усилителей потребовало бы существенного увеличения объема книги.

Автор приносит глубокую благодарность доц. В. Л. Лебедеву за ценные замечания, сделанные им при просмотре рукописи и А. М. Николаеву за внимательное редактирование книги.

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

Устройства для усиления электрических импульсов находят очень широкое применение в различных областях народного хозяйства, науки и техники. Достаточно, например, указать на телевидение, многоканальную связь, технику счетно-решающих устройств, радиолокацию, атомную технику и т. д.

Исключительное разнообразие задач, выполняемых усилительными устройствами в многочисленных отраслях техники, привело к возникновению усилителей самых разнообразных типов, различающихся принципом действия, рабочим диапазоном частот, величиной усиления и мощностью. Необходимо поэтому в первую очередь произвести классификацию усилителей и ознакомиться с их основными характеристиками, которые позволяют оценивать свойства усилителей безотносительно к возможному применению.

В настоящее время наиболее распространенными являются усилители, в которых используются, электронные лампы — так называемые ламповые усилители. Причины преобладающего использования электронных ламп для усиления рассмотрены ниже. Помимо ламповых, существуют и безламповые усилители, к числу которых относятся полупроводниковые, магнитные и диэлектрические. Рассмотрение этих типов усилителей не входит в нашу задачу. Однако следует отметить, что полупроводниковые усилители, обязанные своим возникновением бурному развитию теории полупроводников, уже в ближайшее время станут серьезным конкурентом ламповых усилителей.

Ламповый усилитель можно рассматривать как частный случай четы-

рехполюсника (рис. 1-1), ко входу которого подводится подлежащее усилению напряжение и с выходной нагрузки которого усиленное напряжение снимается. В связи с тем, что электронная лампа практически позволяет управлять величиной тока в ней без затраты мощности в цепи сетки, мощность колебаний на выходе усилителя обычно больше мощности, потребляемой от источника входного сигнала¹:

$$P_{\text{вых}} > P_{\text{вх}}.$$

Таким образом, усиление сопровождается увеличением мощности полезного сигнала. Несмотря на это, усилители делят на два больших класса — усилители напряжения и усилители мощности. В первом случае доминирующим требованием является условие $U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$ безотносительно к мощности, получаемой на выходе, во втором — условие получения максимальной мощности на выходе при допустимой степени искажения сигнала и в тесной связи с к. п. д. (при этом может оказаться, что $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}}$).

В зависимости от характера усиливаемого сигнала — представляет ли он импульс с высокочастотным заполнением (рис. 1-2,а) или импульс постоянного тока (рис. 1-2,б) — усилители делятся на избирательные (резонансные и полосовые) и аperiодические. Рассмотрение избирательных усилителей не входит в нашу задачу. Следует только указать, что результаты, полученные ниже при анализе аperiодических усилителей, легко распространить на избирательные усилители путем использования метода линейного

¹ Имеется в виду режим работы лампы без захода в область сеточных токов.

преобразования аргумента частотно-фазовых характеристик. В дальнейшем нас будут интересовать главным образом апериодические усилители напряжения, так как именно они находят наибольшее применение при усилении импульсов.

Апериодические усилители напряжения, в свою очередь, можно подразделить на ряд типов по их назначению (телевизионные, локационные и т. д.).



Рис. 1-1.

Однако такое разделение не является рациональным, так как в некоторых случаях усилители обладают совершенно идентичными электрическими и схемными параметрами, несмотря на свое различное назначение. Поэтому в дальнейшем классификация

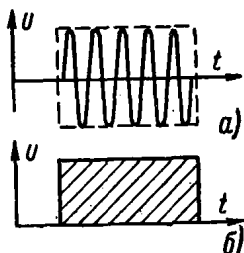


Рис. 1-2.

усилителей производится по видам каскадных анодных нагрузок. Некоторым отступлением от этого является гл. 4, где признаком классификации является схема обратной связи, что позволяет рассмотреть ряд принципиальных особенностей каскадов с обратной связью в более общем виде.

В апериодических усилителях, предназначенных для усиления импульсов постоянного напряжения (называемых в дальнейшем для краткости импульсными усилителями), находят применение следующие схемы каскадов:

1. Каскад усиления на сопротивлениях (реостатный каскад).
2. Каскад на сопротивлениях с различного вида элементами коррекции.
3. Трансформаторный каскад.

4. Каскад, использующий длинные линии (или их эквиваленты).

Усилительное устройство, содержащее электронную лампу, строго говоря, является нелинейным в силу нелинейности ламповых характеристик. Однако в дальнейшем мы рассматриваем его как активный линейный четырехполюсник в связи с тем, что при усилении нелинейность не только не играет принципиальной роли (как при детектировании или модуляции), но и мало существенна при импульсном характере воздействия¹, правильно выбранном режиме лампы и использовании отрицательной обратной связи.

Для характеристики свойств линейного четырехполюсника достаточно знания зависимости его комплексного коэффициента передачи от частоты.

Однако ламповый каскад можно рассматривать как линейное устройство только при не слишком больших амплитудах. Кроме того, усилитель представляет, по существу, преобразователь энергии источников питания в энергию усиленного сигнала. Поэтому требуется введение дополнительных параметров для полной характеристики его свойств. Для этого используют так называемые «электрические показатели усилителей».

1-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Свойства усилителя, определяющие его пригодность для того или иного использования, обычно принято оценивать следующими основными характеристиками и показателями:

1. Амплитудной характеристикой $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$.

2. Коэффициентом усиления $K_0 = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$.

3. Частотной характеристикой $M(\omega) = \frac{K(\omega)}{K_0}$.

4. Фазовой характеристикой $\varphi(\omega) = \varphi_{вых} - \varphi_{вх}$.

¹ Имеются в виду наиболее часто применяемые импульсы, по форме близкие к прямоугольным.

5. Нелинейными искажениями

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_{2вых}^2 + U_{3вых}^2 + \dots}}{U_{1вых}}$$

6. Динамическим диапазоном

$$D = \frac{U_{вых.макс}}{U_{вых.мин}}$$

7. Коэффициентом полезного действия $\eta = \frac{P}{P_0}$

$$\eta = \frac{P}{P_0}$$

8. Наибольшей величиной выходного сигнала $U_{вых.макс}$

9. Площадью усиления $\Pi = K_0 \omega_s$

Перечисленные характеристики имеют определенный смысл только при синусоидальном входном сигнале. Однако коль скоро импульсное воздействие можно представить в виде суммы синусоидальных напряжений, для каждого из которых эти характеристики пригодны, тем самым и для характеристики свойств импульсных усилителей можно воспользоваться серий показателем, применяемых для усилителей обычного вида.

Специфические искажения импульсного сигнала, связанные с переходными процессами, указанными характеристиками в явном виде не оцениваются. Однозначность связи частотных, фазовых и переходных характеристик (§ 7-2), вообще говоря, снимает необходимость такой дополнительной оценки, ибо задание определенных искажений, вызванных переходными процессами, полностью определяет ход фазовой и частотной характеристик схемы.

При расчете импульсных усилителей практически удобнее опираться на его переходные характеристики. Этим однозначно, хотя большей частью в неявном виде, формулируются требования к частотно-фазовым характеристикам. Ниже указанные характеристики рассматриваются подробно с целью выяснения требований, предъявляемых к ним в импульсном усилителе.

1. Амплитудная характеристика каскада (рис. 1-3) обычно приводится для одной из частот, лежащих в диапазоне, где усиление практически не зависит от частоты.

Реальные амплитудные характеристики существенно отличаются от иде-

альной (пунктир на рис. 1-3). Наличие на выходе напряжения $U_{ш}$ даже при входном сигнале, равном нулю (собственные шумы усилителя), приводит к тому, что характеристика начинается не из нуля. При больших амплитудах сигнала заметно сказывается нелинейность ламповых характеристик. Она вызывает падение средней крутизны, а следовательно, и уменьшение усиления. При дальнейшем воз-

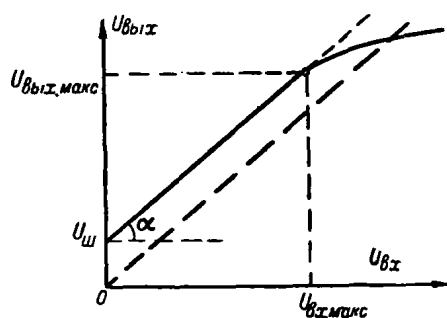


Рис. 1-3.

растании сигнала наступает резкое ограничение выходного напряжения благодаря возникновению отсечки тока в анодной или сеточной цепях ламп.

В пределах $0 < U_{вх} < U_{вх.макс}$ усилитель можно считать линейной системой, для которой существует прямая пропорциональность между уровнями выходного и входного напряжений. Таким образом, амплитудная характеристика дает возможность определить пределы изменения $U_{вх}$ и $U_{вых}$, для которых усилитель с необходимой точностью можно рассматривать как линейное устройство. Изменение допуска на отклонение от линейности изменяет и пределы «линейной» области работы усилителя.

При усилении импульсов, по форме близких к прямоугольной, линейность амплитудной характеристики не играет существенной роли. Более того, резкий загиб этой характеристики, вызванный, например, отсечкой анодного тока, позволяет в некоторых случаях улучшить форму импульса, срезав искаженную вершину импульса или значительно ослабив эти искажения.

2. Коэффициент усиления представляет собой отношение выходного эффекта ко входному. В зависимости от назначения усилителя полезным эф-

фактом является напряжение, ток или мощность.

В соответствии с этим разделяют коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности.

В большинстве случаев импульсные усилители являются усилителями напряжений. Поэтому в дальнейшем используется преимущественно коэффициент усиления по напряжению, представляющий отношение выходного напряжения ко входному. В пределах линейной части амплитудной характеристики он не зависит от величины сигнала.

Наличие реактивных элементов в схеме приводит к зависимости усиления от частоты. Чтобы не оговаривать каждый раз, для какой частоты определяется усиление, принято под коэффициентом усиления понимать усиление устройства в том диапазоне частот, в пределах которого оно практически не зависит от частоты (средние частоты). Следовательно,

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad (1-1)$$

при таком определении он не зависит от частоты усиливаемого сигнала.

Такое же определение усиления справедливо не только для всего усилителя, но и для каждого его каскада. Выходное напряжение первого каскада является входным напряжением для второго, выходное напряжение второго — входным напряжением для третьего каскада и т. д. Следовательно, усиление всего устройства, состоящего из n каскадов¹,

$$K_0 = \prod_{i=1}^n K_{0i}, \quad (1-2)$$

где K_{0i} — коэффициент усиления i -того каскада.

Величина коэффициента усиления импульсных усилителей зависит от их

¹ Это распространенное определение коэффициента усиления справедливо только для каскадов со строго разделенными нагрузками. Можно предложить схемы усилителей, где нагрузка одного каскада складывается из части нагрузок остальных каскадов. В этом случае усиление всего устройства определяется не только произведением усиления каждого каскада, но и некоторой их суммой.

назначения и может меняться в очень широких пределах; от нескольких сотен тысяч до значений, меньших единицы. Чаще всего приходится иметь дело с усилителями, имеющими коэффициент усиления порядка нескольких десятков или сотен.

3. *Частотная характеристика.* Наличие в схемах усилителей специально выбранных или паразитных, принципиально не устранимых реактивных элементов приводит к зависимости коэффициента усиления от частоты. Эта зависимость называется частотной характеристикой.

Нормированная частотная характеристика² представляет отношение

$$M(\omega) = \frac{K(\omega)}{K_0}, \quad (1-3)$$

где $K(\omega)$ — модуль коэффициента усиления на рассматриваемой частоте.

Она одновременно может являться мерой количественной оценки искажений. В этом случае часто эту величину выражают в децибелах. Тогда

$$M(\omega)_{\text{дб}} = 20 \lg \frac{K(\omega)}{K_0}.$$

При этом рост абсолютного числа децибел соответствует увеличению частотных искажений.

Примерный вид частотной характеристики дан на рис. 1-4. Полосу пропускания усилителя принято оценивать по спаданию усиления на ее краях до 0,707, т. е. на 3 дб; таким образом, полоса пропускания усилителя равна $\Omega = \omega_s - \omega_n$.

Обычно $\omega_n \ll \omega_s$, поэтому практически полоса определяется частотой ω_s . Частоты ω_n и ω_s называются соответственно низшей и высшей частотами пропускания усилителя. Такое определение ω_n и ω_s , несмотря на всю его условность³, имеет существенное преимущество из-за простой связи параметров каскада со значениями

² В дальнейшем мы будем иметь дело только с нормированными частотными характеристиками, опуская для сокращения записей термин "нормированная".

³ В действительности с соответственно большими ослаблениями усилителем пропускаются частоты $\omega < \omega_n$ и $\omega > \omega_s$.

этих частот. Указанные точки частотной характеристики соответствуют уменьшению в 2 раза выходной мощности на этих частотах. Идеальной частотной характеристикой будет полубесконечная прямая, параллельная оси абсцисс. При такой частотной характеристике, каков бы ни был спектр входного импульса, все его компоненты усиливаются одинаково. Тогда огибающие спектра входного и выходного сигналов не отличаются друг от друга, следовательно, сигналы имеют одинаковую форму, отличаясь только величиной.

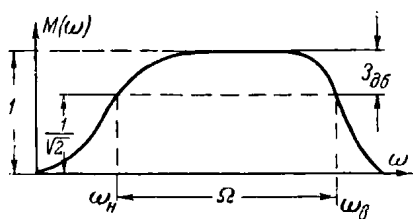


Рис. 1-4.

Ограничение полосы на низких частотах приводит к искривлению вершины идеального импульса; ограничение полосы на высоких частотах приводит к уменьшению скорости возрастания напряжения на выходе, т. е. к образованию конечной длительности фронта усиленного импульса. Между граничными значениями частот ω_n и ω_v и величиной искажений импульса существуют определенные связи. Установление этих связей является одной из задач теории импульсных усилителей.

Для многокаскадного усилителя результирующая частотная характеристика является произведением частотных характеристик отдельных каскадов. Таким образом,

$$M(\omega) = \prod_{i=1}^n M_i(\omega) \quad (1.4)$$

или

$$M(\omega)_{\delta\phi} = \sum_{i=1}^n M_i(\omega)_{\delta\phi}.$$

То обстоятельство, что на краях диапазона каждого каскада $M(\omega) < 1$, приводит к тому, что полоса пропускания многокаскадного усилителя уменьшается с возрастанием числа каскадов.

Величина частотных искажений оценивается в процентах или децибелах. Последней оценкой в импульсных усилителях пользуются реже, так как чаще всего оконечная аппаратура реагирует на абсолютные значения сигналов, а не на отношения их логарифмов¹. Поэтому частотные искажения в импульсных усилителях обычно определяются в процентах.

4. *Фазовая характеристика.* Реактивные элементы в схемах каскадов, изменяя с частотой величину выходного напряжения, создают одновременно фазовый сдвиг между напряжением, поданным на вход усилителя, и усиленным напряжением на его выходе. Зависимость этого фазового сдвига от частоты называется фазовой характеристикой усилителя

$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega)_{\text{вых}} - \varphi(\omega)_{\text{вх}}.$$

В принципе достаточно знания только частотной $M(\omega)$ или только фазовой $\varphi(\omega)$ характеристики, так как задание одной однозначно определяет другую (§ 7-2 и 7-3)*. Однако практически бывает удобнее для оценки свойств системы иметь обе эти характеристики, причем для импульсных усилителей сведения, даваемые фазовой характеристикой, иногда даже более существенны. В связи с этим выясним, каким требованиям должна удовлетворять фазовая характеристика для идеального воспроизведения импульсов².

Пусть спектр импульса на выходе имеет вид:

$$\begin{aligned} U(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin[\omega_i t - \varphi(\omega_i)] = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin \omega_i [t - t_z(\omega_i)], \end{aligned} \quad (1.5)$$

где $t_z(\omega_i) = \frac{\varphi(\omega_i)}{\omega_i}$ — запаздывание сигнала для i -компонента спектра.

¹ Распространенная оценка в децибелах для вещательных усилителей связана с логарифмическим законом восприятия громкости слуховым аппаратом человека.

* См. примечание на стр. 174.

² Допуская для большей наглядности частотную характеристику идеальной.

Фазовая характеристика системы учитывается членом $\varphi(\omega_i)$, дающим фазовый сдвиг усилителя на частоте ω_i .



Рис. 1-5.

Усилитель с бесконечной полосой не может содержать сосредоточенных реактивных элементов, следовательно, его фазовая характеристика должна описываться уравнением

$$\varphi(\omega) \equiv 0 \quad (0 \leq \omega \leq \infty).$$

У такого усилителя выходное напряжение, в точности повторяя форму входного, имеет вид:

$$U(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin \omega_i t.$$

Форма выходного напряжения, очевидно, не изменится, если каждая ком-

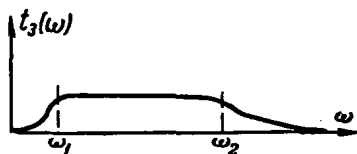


Рис. 1-6.

понента спектра запаздывает на одно и то же время t_g :

$$U(t - t_g) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin \omega_i (t - t_g).$$

При этом выходной сигнал, в точности повторяя по форме входной, запаздывает на время t_g . Следовательно, для того чтобы фазовая характеристика не создавала искажений формы усиливаемых сигналов, необходимо, чтобы

$$\frac{\varphi(\omega_i)}{\omega_i} = t_g(\omega_i) = t_g = \text{const}$$

или

$$\varphi(\omega_i) = t_g \omega_i. \quad (1-6)$$

Таким образом, система, дающая фазовый сдвиг, пропорциональный частоте, также является идеальной.

Обычно крутизна фазовой характеристики непостоянна. В этом случае средняя крутизна определяет запаздывание всего сигнала, а искажения формы вызывают небольшие изменения значений $\frac{\varphi(\omega)}{\omega}$ для каждой составляющей.

Возьмем составляющие с частотами ω и $\omega + d\omega$ и фазами $\varphi(\omega)$ и $\varphi(\omega) + d\varphi(\omega)$. Векторы этих колебаний сдвинуты по фазе на $d\varphi(\omega)$. Для пробега этого угла необходимо время $\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$

и амплитудные значения огибающей результирующего колебания получатся позднее на это время. Время

$$t_g = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (1-6a)$$

дает более наглядное представление об искажении формы сигнала, чем t_g , определяемое выражением (1-5). Им мы будем часто пользоваться в дальнейшем.

Типичная фазовая характеристика усилителя показана на рис. 1-5. Ее особенностью являются конечные фазовые сдвиги на нулевой и бесконечно большой частотах. Связано это с наличием конечного числа реактивных элементов в каскадах. Таким образом, в реальных системах с сосредоточенными постоянными добиться идеальной фазовой характеристики принципиально невозможно.

Суждению непосредственно по фазовой характеристике, насколько она отличается от идеальной и в каком диапазоне частот это отличие не существенно, в сильной степени препятствует изображение фазовой характеристики в логарифмическом масштабе¹. В этом случае идеальной характеристике соответствует уже не прямая линия, а логарифмическая кривая. Эта трудность с масштабами полностью снимается, если вместо $\varphi(\omega)$ откладывать $t_g(\omega) = \frac{\varphi(\omega)}{\omega}$ (рис. 1-6). В той области, где $t_g(\omega) = \text{const}$, данное устройство может быть использовано для не-

¹ Распространенный логарифмический масштаб по оси частот для частотной и фазовой характеристик вызывается практической необходимостью показать с одинаковой подробностью ход этих зависимостей при изменении частоты в больших пределах ($\omega_g/\omega_n = 10^5 \div 10^8$).

искаженного усиления импульсов со спектром, лежащим в пределах от ω_1 до ω_2 .

В заключение выясним, как влияет на искажение формы импульсов наличие в усилителях постоянного фазового сдвига.

Электронные лампы создают фазовый сдвиг в 180° между напряжениями на их управляющих сетках и анодах, не зависящей от частоты¹. Таким образом, их наличие в усилителе создает постоянный фазовый сдвиг $n\pi$. Очевидно, что это не может привести к искажению формы импульса, так как $\sin[\omega t - \varphi(\omega) + n\pi] = \pm \sin[\omega t - \varphi(\omega)]$.

Следовательно, форма импульса не претерпит каких-либо изменений, если не считаться с изменением его полярности на обратную при нечетном числе каскадов. Естественно, что при определении $t_g(\omega)$ постоянный фазовый сдвиг, даваемый самими лампами и приводящий только к изменению полярности сигнала, не должен приниматься во внимание.

Наличие в системе устройства, дающего независящий от частоты фазовый сдвиг, но не кратный целому числу π , приведет уже к нарушению формы импульса. В этом проще всего убедиться на простейшем примере, когда сигнал содержит только два компонента (рис. 1-7), а не зависящий от частоты фазовый сдвиг равен $\frac{\pi}{2}$ *. Когда он отсутствует, $U(t) = \sin \omega t + \sin 2\omega t$ и колебание имеет вид, изображенный на рис. 1-7,а. В другом случае

$$U(t) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos \omega t + \cos 2\omega t,$$

и форма колебания изменяется, приобретает вид, изображенный на рис. 1-7,б.

Таким образом, фазовые характеристики, представляющие прямые линии, идущие не только из начала координат, но и из любых точек на оси ординат, смещенных на величины, кратные целому числу π (рис. 1-8), харак-

теризуют идеальное устройство. Пунктирная прямая на рис. 1-8 не соответствует идеальному устройству, так как не зависящий от частоты фазовый сдвиг для нее $0 < \varphi_0 < \pi$.

Сигнал, проходя несколько каскадов, приобретает фазовый сдвиг в соответствии с фазовым сдвигом, даваемым каждым каскадом. Таким образом, фазовая характеристика много-

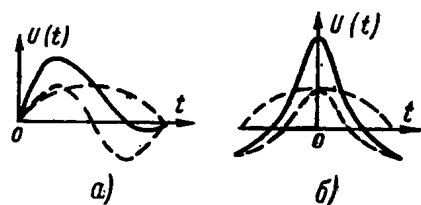


Рис. 1-7.

каскадного усилителя представляет собой сумму фазовых характеристик каждого каскада:

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega) \quad (1-7)$$

При анализе свойств импульсных усилителей необходим одновременный,

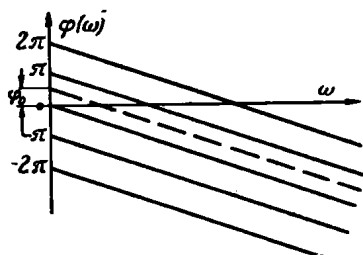


Рис. 1-8.

учет их частотных и фазовых характеристик. Поэтому широкое использование находит понятие о комплексной частотной характеристике, учитывающей и частотные и фазовые свойства каскада,

$$M(j\omega) = \frac{K(j\omega)}{K_0} = \frac{K(\omega)}{K_0} e^{j\varphi(\omega)} = M(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-8)$$

В некоторых случаях представляет интерес комплексный коэффициент усиления каскада

$$K(j\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}.$$

Конец вектора комплексного коэффициента усиления при изменении час-

¹ Имеются в виду частоты, для которых пролетное время еще достаточно мало.

* Идеальная дифференцирующая или интегрирующая цепь.

тоты от 0 до ∞ описывает кривую, называемую годографом. Примерный вид годографа показан на рис. 1-9. Вектор OM дает величину усиления на частоте ω_1 , а угол φ_1 — значение фазового сдвига на этой частоте. Использование годографов находит широкое применение при анализе устой-

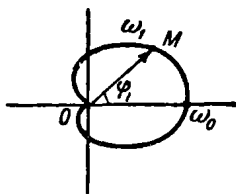


Рис. 1-9.

чивости усилителя и влияния обратной связи на его параметры.

5. *Нелинейные искажения.* Помимо линейных искажений сигнала, рассмотренных выше, в усилителе могут иметь место нелинейные искажения. Их появление обязано наличию в уси-

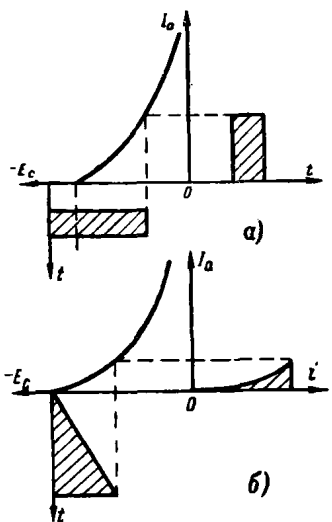


Рис. 1-10.

лителе нелинейных элементов. Для импульсных усилителей основными нелинейными элементами являются электронные лампы и в меньшей степени индуктивности с железом при использовании их до насыщения. Наличие нелинейных элементов вызывает образование новых компонентов спектра сигнала на выходе, отсутствующих в спектре входного сигнала.

В вещательных усилителях величину нелинейных искажений принято

оценивать коэффициентом нелинейных искажений ν , представляющим собой квадратный корень из отношения суммы мощностей всех гармоник, созданных нелинейным элементом, к мощности полезного сигнала:

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} P_i}{P_1}}.$$

При активной нагрузке величина ν представляет собой отношение эффективного значения напряжения всех высших гармоник к напряжению основной частоты на выходе усилителя:

$$\nu = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1}. \quad (1-9)$$

Часто наличие нелинейности приводит к степенной зависимости амплитуды выходного сигнала от входного:

$$U_{вых} = K_0 U_{вх}^{\alpha}, \quad (1-10)$$

где α — постоянная величина.

На рис. 1-11 кривой 1 соответствует $\alpha < 1$, кривой 2 — $\alpha = 1$ и кривой 3 — $\alpha > 1$. В этом случае количественно величину нелинейных искажений можно оценивать абсолютным значением отклонения коэффициента α от единицы:

$$\nu = |1 - \alpha|.$$

Значение α находится из амплитудной характеристики усилителя после аппроксимации ее на интересующем участке показательной функцией вида (1-10).

Для импульсных усилителей такие оценки нелинейных свойств устройства практически ничего не дают. Связано это с тем, что влияние нелинейности по-разному сказывается при импульсах различной формы. На рис. 1-10, а показано искажение импульсов прямоугольной и пилообразной формы. Если в первом случае наличие даже очень большой нелинейности (отсечка тока в лампе) совершенно не влияет на форму импульса, то пилообразные импульсы даже при небольшой нелинейности могут существенно исказиться.

В этом случае оценка величины искажений может производиться по

осциллограммам линейно-возрастающего (пилообразного) напряжения (рис. 1-12):

$$\nu_0/\% = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\kappa} - \operatorname{tg} \varphi_{\kappa}}{\operatorname{tg} \varphi_{\kappa}} 100\%, \quad (1-10a)$$

где φ_{κ} и φ_{κ} — углы наклона действительной кривой в начале и конце процесса.

Нормы на допустимые величины нелинейных искажений определяются назначением усилителя и формой усиливаемых колебаний. Обычно величина нелинейных искажений в усилителях импульсов допускается большей, чем в усилителях звуковых частот. Для импульсов, по форме близких к прямоугольным, с нелинейными искажениями обычно можно не считаться.

6. *Динамический диапазон.* Изменение входного сигнала от некоторой минимальной величины $U_{вх.мин}$ до максимального значения $U_{вх.макс}$, обусловленное природой источника сигналов, создает динамический диапазон изменения входного напряжения $D_{вх} = \frac{U_{вх.макс}}{U_{вх.мин}}$.

Наличие на выходе усилителя напряжения собственных шумов или фона, а также нелинейность его амплитудной характеристики приводят к тому, что динамический диапазон выходных напряжений $D_{вых} = \frac{U_{вых.макс}}{U_{вых.мин}}$ отличается

от $D_{вх}$. Сохранение усилителем динамического диапазона входного сигнала, т. е. соблюдение условия $D_{вых} = D_{вх}$, требуется от импульсных усилителей сравнительно редко и при большой величине $D_{вх}$ представляет трудновыполнимую задачу. Обычно нормальная работа окончательных устройств, на которые работают импульсные усилители, происходит при $D_{вых} \ll D_{вх}$. В этих случаях принимают специальные меры для сужения динамического диапазона усилителя. Простейшим способом уменьшения $D_{вых}$ является применение в усилителе каскадов-ограничителей. Недостатком такого метода уменьшения $D_{вых}$ является присущее ограничителям искажение формы сигнала (кроме импульсов идеальной прямоугольной формы). Если искажение формы им-

пульсов нежелательно, то сужение $D_{вых}$ осуществляется применением автоматической регулировки усиления.

7. *Коэффициент полезного действия* отдельного каскада определяется отношением

$$\eta = \frac{P_{\sim}}{P_0},$$

где $P_{\sim}$ — полезная мощность, развиваемая на нагрузке каскада;

P_0 — мощность, потребляемая каскадом от источников питания.

Величина η играет особо существенную роль при питании усилителя от сухих батарей или аккумуляторов, когда стоимость электроэнергии высока и расход тока имеет существенное

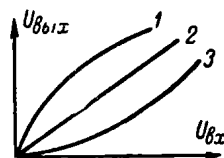


Рис. 1-11.

значение. Эта величина также существенна для оценки эксплуатационных свойств мощных усилителей, потребляющих от источников питания большую мощность.

Для импульсных усилителей небольшой мощности (до нескольких де-



Рис. 1-12.

сятков ватт), питающихся от осветительной сети, к. п. д. является менее важным показателем вследствие относительно малого расхода электроэнергии и ее небольшой стоимости.

Различают электрический к. п. д. и полный или промышленный к. п. д. В первом случае P_0 — мощность, потребляемая от источника анодного питания, во втором P_0 — общая мощность, потребляемая каскадом от всех источников питания.

Применительно к импульсным усилителям оценка величины электрического к. п. д. чаще всего необходима для правильного выбора режима лампы, обеспечивающего допустимую величину мощности P_a , рассеиваемой на аноде лампы,

Особенностью импульсных усилителей является зависимость P_a от ха-

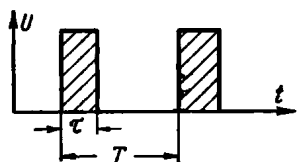


Рис. 1-13.

рактера усиливаемого сигнала. Для пояснения этого рассмотрим случай односторонних импульсов прямоугольной формы (рис. 1-13). При усилении таких импульсов рабочая точка выбирается в начале ламповой характе-

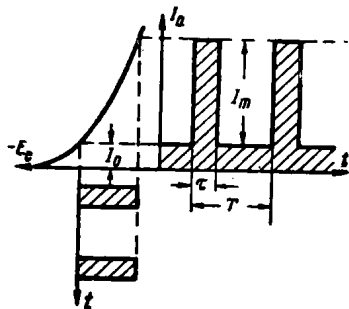


Рис. 1-14.

ристики, когда на сетку подаются положительные импульсы (рис. 1-14), или в ее верхней части для импульсов отрицательной полярности (рис. 1-15).

Среднее значение анодного тока

$$I'_0 = I_0 \pm I_m \frac{\tau}{T}.$$

Здесь знак плюс соответствует усилению положительных, а минус — отрицательных импульсов.

Мощность, рассеиваемая на аноде лампы,

$$P_a = P_0 - P_{\sim} = P_0(1 - \eta). \quad (1-11)$$

Изменение скважности, представляющей собой отношение периода повторения импульсов T к их длительности τ , изменяет мощность, рассеиваемую на аноде лампы. Для импульсов с изменяемой скважностью режим ра-

боты лампы должен выбираться так, чтобы при наименее благоприятной скважности $P_a \leq P_{a, \text{дон}}$. Из сравнения рис. 1-14 и 1-15 видно, что усиление импульсов положительной полярности при выборе рабочей точки вблизи нижнего загиба характеристики сопровождается меньшей затратой энергии источника питания, т. е. оно более экономично. Такой режим особенно целесообразен для выходных каскадов импульсных усилителей.

8. Величина выходного напряжения. Импульс тока, требуемый от выходной

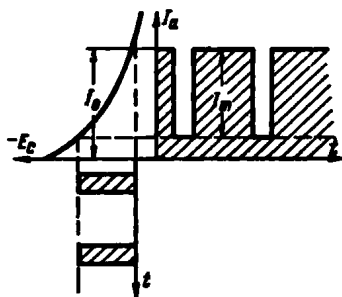


Рис. 1-15.

лампы, определяется величиной нагрузки и значением $U_{\text{вых. макс}}$.

$$I_m = \frac{U_{\text{вых. макс}}}{R_a}.$$

Крайне желательно уменьшить необходимый импульс тока, так как это позволит использовать менее мощные лампы. При заданном $U_{\text{вых}}$ это можно сделать только путем увеличения R_a . Однако этому препятствует шунтирующее действие емкостей нагрузки и лампы. Применение схем коррекции в некоторой степени ослабляет шунтирующее действие емкостей, позволяя увеличить R_a , поэтому схемы коррекции часто используются в выходных каскадах.

Когда применение коррекции оказывается недостаточным, необходимо использовать более мощную лампу, дающую соответственно большой импульс тока I_m . Таким образом, задание $U_{\text{вых. макс}}$ весьма существенно, так как определяет тип лампы и схемные особенности выходного каскада импульсного усилителя.

9. Площадь усиления. Для оценки свойств импульсных усилителей суще-

ственное значение имеет еще один показатель, называемый площадью усиления Π .

Площадь усиления каскада принято называть площадью прямоугольника, ограниченного частотой ω_0 (находится по спадающему усилению до 0,707) и неизменным усилением $K(\omega) = K_0$ (рис. 1-16),

$$\Pi = K_0 \omega_0. \quad (1-12)$$

Завися от свойств лампы и характера анодной нагрузки каскада, эта величина не может быть получена

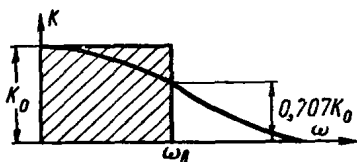


Рис. 1-16.

произвольно большой. Конечность Π накладывает ограничения на возможность получить от каскада нужное усиление при заданной полосе или нужной полосе при заданном усилении. Очевидно, что

$$K_{0 \max} = \frac{\Pi}{\omega_0}$$

или

$$\omega_{0 \max} = \frac{\Pi}{K_0}.$$

Развитие понятия площади усиления и способы ее увеличения дается в последующих разделах.

1-3. РАБОТА ЛАМПЫ В УСИЛИТЕЛЬНОЙ СХЕМЕ

До настоящего времени электронная лампа являлась основным прибором, позволяющим путем преобразования энергии источников питания осуществлять усиление сигналов в широком диапазоне частот. В последнее время с ней успешно конкурируют полупроводниковые приборы. Однако рассмотрение их работы в усилительных схемах выходит из рамок настоящей книги.

Усиление сигналов принципиально возможно и без использования электронных ламп. Широкому применению ламп способствовали следующие их особенности:

1. Усиление производится практически без затраты мощности от источника усиливаемых сигналов.

2. Безынерционность в диапазоне частот, простирающемся до десятков миллионов герц.

3. Практическая линейность усиления при большом диапазоне изменения амплитуд.

4. Сравнительно высокий к. п. д. лампы как преобразователя энергии источников питания в энергию полезного сигнала¹.

Параметры лампы: крутизна характеристики анодного тока S , внутреннее сопротивление по анодной цепи для переменного тока R_i , статический коэффициент усиления от сетки до анода μ — зависят от режима работы лампы, т. е. от значения напряжений на ее электродах. Для каждого режима, пользуясь семейством статических характеристик лампы: $I_a = \varphi(E_a)$ при $E_c = \text{const}$ (семейство анодных характеристик) или $I_a = \varphi(E_c)$ при $E_a = \text{const}$ (семейство сеточных характеристик), — можно определить эти параметры графически, учитывая, что они связаны соотношением

$$\mu = SR_i.$$

Наличие нагрузки в анодной цепи для постоянного тока приводит к тому, что режим работы лампы (ее рабочая точка) становится зависимым от величины этой нагрузки. Определение режима работы лампы с учетом нелинейности ее характеристик проще всего производить графическим способом.

Если статическая характеристика лампы описывается зависимостью

$$I_a = \varphi(E_a), \quad (E_c = \text{const}),$$

то с учетом падения напряжения на анодной нагрузке R_a

$$I_a = \varphi(E_a) = \varphi(E_n - I_a R_a), \quad (E_c = \text{const}),$$

где E_n — напряжение источника анодного питания.

Графическое построение на семействе ламповых характеристик, дающее решение этого уравнения, показано на рис. 1-17.

¹ В отношении к. п. д. электронная лампа уступает кристаллическим триодам, что и обуславливает в значительной мере тот интерес, который они вызывают.

Нагрузочная прямая, соответствующая сопротивлению R_a , проводится под углом

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_a}.$$

Ее пересечение со статическими характеристиками лампы $E_c = \text{const}$ дает

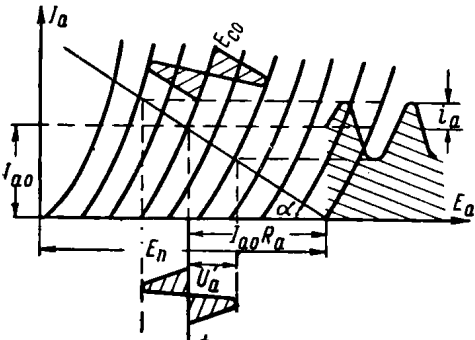


Рис. 1-17.

действительные значения тока при наличии нагрузки, т. е. является решением рассматриваемого уравнения относительно I_a^* .

При синусоидальном изменении напряжения на сетке изменение анодного

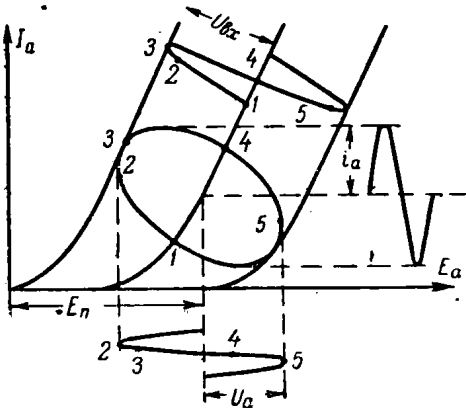


Рис. 1-18.

тока и анодного напряжения находят-ся по точкам пересечения линии нагрузки (в данном случае прямой) с соответствующими статическими характеристиками лампы. Из рис. 1-17 следует, что анодный ток совпадает

* Практически угол α никогда не определяется, а нагрузочная прямая проводится через точки E_n и $\frac{E_n}{R_a}$, лежащие соответ-

ственно на оси абсцисс и оси ординат. Однако для краткости записи здесь и далее мы будем указывать угол, под которым проводится нагрузочная прямая.

по фазе с напряжением, приложенным к сетке лампы, а напряжение на аноде противофазно ему.

При комплексном характере анодной нагрузки сдвиг фаз между U_c и U_a отличается от π и линия нагрузки превращается в некоторую замкнутую кривую. Характер кривой определяется видом нагрузки и формой воздействующего напряжения.

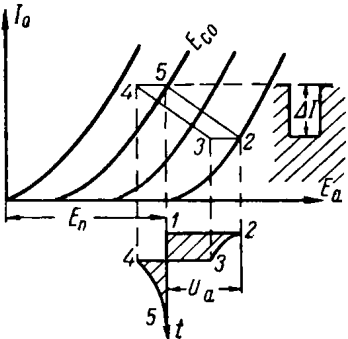


Рис. 1-19.

В качестве примера на рис. 1-18 дано построение нагрузочной кривой для линейной части ламповых характеристик при синусоидальном входном напряжении и индуктивном характере нагрузки. Одинаковые цифры на чертеже соответствуют одному моменту времени. На рис. 1-19 для той же нагрузки проведено построение при импульсном входном напряжении¹. Превышение мгновенным значением напряжения на аноде величины E_n обусловлено в этих случаях образованием противо-э. д. с. в индуктивности анодной нагрузки.

В настоящее время, особенно при анализе импульсных усилителей, указанные громоздкие построения для нахождения связи между мгновенными значениями анодного тока и напряжениями используются редко. Чаще всего лампа замещается эквивалентным генератором тока или напряжения и анализ усилительных схем производится обычными приемами исследования электрических цепей.

Вспомогательные цепи лампы, обеспечивающие ее нормальную работу в выбранном режиме (цепи анодного

¹ Для большей наглядности предполагается лампа с большим R_p , когда импульс тока в анодной цепи практически повторяет форму входного напряжения.