

Г.В. Войшвилло

**Усилители низкой частоты на
электронных лампах**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Г11

Г11 **Г.В. Войшвилло**
Усилители низкой частоты на электронных лампах / Г.В. Войшвилло – М.:
Книга по Требованию, 2024. – 761 с.

ISBN 978-5-458-46688-2

В книге рассмотрены теоретические и практические вопросы работы и расчета усилителей низкой частоты на электронных лампах. Приведены практические рекомендации и методика расчета выходных трансформаторов. Книга содержит большое количество примеров расчета.

ISBN 978-5-458-46688-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЯХ

§ 1.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Управление энергией, столь часто встречающееся в современной технике, как правило, характеризуется тем, что управляемая мощность значительно превышает мощность, требующуюся для управления. Вместе с тем формы энергии управляемой и управляющей в одних случаях одинаковы, в других — различны. И, наконец, само управление может быть как резким, скачкообразным, так и постепенным, плавным.

Если, например, в последовательной электрической цепи находятся генератор, выключатель и нагрузка, то управление энергией электрического тока возможно только скачкообразное. При замене выключателя реостатом управление энергией тока в цепи из резкого превращается в постепенное, плавное. В обоих описываемых цепях управляемая электрическая энергия может в огромное число раз превосходить механическую энергию, затрачиваемую на изменение положения выключателя и реостата. Вполне очевидно, что здесь формы управляемой и управляющей энергий различны.

К частному виду управления энергией относится усиление. Отличительными особенностями усиления являются, с одной стороны, превышение управляемой мощности над управляющей и, с другой, плавность процесса управления, независимо от того, одинаковы или различны формы управляемой и управляющей энергий.

При этом *усилитель* представляет собой устройство, предназначенное для осуществления функции плавного управления энергией источника последней, при котором управляемая мощность превышает управляющую.

Широкое применение находят усилители, характеризуемые электрической формой управляемой и управляющей энергий, ко-

торым мы дадим объединяющее название «электрические усилители».

Устройства же, способные осуществлять функции только прерывного, скачкообразного управления, не относятся к категории усилителей; в частности, при электрической форме обеих энергий они получили название «реле».

Назначением усилителя является в конечном счете повышение мощности первичного источника посредством использования его энергии для управления более мощным вторичным источником, питающим нагрузку.

Первичные источники электрической энергии, встречающиеся в установках связи, радиовещания, радиолокации, телеуправления, автоматики и пр., мощность которых требуется

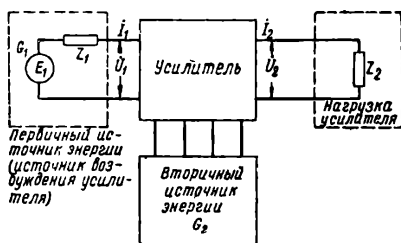


Рис. 1.1. Общая схема усилителя

увеличить, характеризуются тем, что их эдс представляет собой сумму ряда составляющих различных частот, фаз и амплитуд. Мощность такого рода первичных источников в большинстве случаев невелика, она бывает и ничтожно малой величины, например порядка 10^{-15} вт, а требуемое по-

вышение мощности может достигать до 10^{17} и больше. Возможность же увеличения мощности путем объединения нескольких источников или перехода на более мощные источники крайне ограничена, и в подавляющем большинстве случаев она вообще исключена. Единственно возможным методом повышения мощности здесь является усиление, осуществляемое посредством применения усилителей и соответствующих источников их питания.

На основании вышеизложенного мы приходим к заключению, что усилитель представляет собой преобразователь энергии вторичного источника G_2 (рис. 1.1), управляемый первичным источником G_1 и отдающий нагрузке Z_2 требуемую мощность, превышающую мощность первичного источника. Вместе с тем усилитель является генератором с независимым возбуждением, причем роль возбудителя играет первичный источник G_1 . В дальнейшем генератор G_1 мы будем называть источником возбуждения усилителя, а отдаваемую им мощность — мощностью возбуждения.

Усилитель, вообще говоря, должен быть устроен так, чтобы мощность, выделяющаяся в его нагрузке Z_2 , иначе — выходная мощность P_2 , зависела от режима возбуждения, в частности, от напряжения возбуждения U_1 . При отсутствии возбуждения

($U_1=0$) обычно требуется, чтобы P_2 было равно нулю или начальному постоянному значению P_{20} .

В качестве источника возбуждения могут встречаться такие устройства как микрофон, детектор или другой демодулятор, звукосниматель, фотоэлемент, термопара, передающая телевизионная трубка, электрическая линия, предшествующий усилитель и др. Типы нагрузок также разнообразны; в качестве таковых применяются громкоговоритель, телефон, модулируемый каскад, пишущая головка магнитофона, рекордер, электронно-лучевая трубка, неоновая лампа, электронный коммутатор, электрическая линия, последующий усилитель, гальванометр, осциллограф, реле и пр.

Некоторые из перечисленных выше источников возбуждения развивают очень низкое напряжение, например термопара — от десятых долей микровольта и выше, фотоэлемент — порядка единиц микровольт и больше, микрофон — 0,1—0,5 мв, передающая телевизионная трубка — 2—5 мв, — все при ничтожно малой мощности. Такие же источники, как, например, предшествующий усилитель, развивают значительно большее напряжение, достигающее до нескольких десятков и сотен вольт при заметной величине выходной мощности.

Пределы значений напряжения и мощности на выходе усилителя велики. Выходное напряжение в одних случаях может быть порядка долей вольта, в других — оно оказывается порядка десятков и сотен вольт.

Свойством, присущим большинству видов нагрузки, является потребление мощности; эта мощность у одних видов нагрузки, например телефона, составляет сотые доли ватта, у других бывает порядка десятков и даже сотен киловатт (городская сеть проводного вещания, модулируемый каскад мощного радиопередатчика). Все же встречаются типы нагрузок, практически не потребляющих заметной мощности; к их числу относятся: последующая усилительная лампа, работающая при отсутствии электронного сеточного тока, электронно-лучевая трубка и некоторые другие.

§ 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

1.2.1. Виды электрических усилителей

Группу электрических усилителей составляют усилители электронные, электромеханические (например, микротелефонные), электромашинные (амплидины), магнитные и, наконец, диэлектрические.

Преимущества электронных усилителей столь многообразны,

что здесь затруднительно перечислить их полностью. Прежде всего отличительной чертой их является огромное усиление мощности, обусловленное низкими потерями во входной цепи, что особенно характерно для ламповых усилителей. Кроме того, электронные усилители характеризуются широкими возможностями их использования для усиления как чрезвычайно медленных, так и весьма быстрых колебаний, без внесения искажений, т. е. с сохранением формы колебаний; при необходимости эти же усилители могут выполнять функции преобразования усиливаемых колебаний по заданному закону с высокой степенью точности.

В силу своих значительных достоинств и универсальности, именно электронные усилители являются основным, наиболее распространенным видом усилителей в радиотехнических устройствах. Все наше последующее рассмотрение будет относиться только к одной разновидности электронных усилителей — к усилителям на электронных лампах.

1.2.2. Усилители гармонических и импульсных сигналов

Источник возбуждения усилителя характеризуется тем, что его эдс e_1 , а следовательно, и напряжение $u_1 = u_1(t)$, называемое *входным напряжением*, изменяются во времени по сложному закону. Действительно, передача сообщений, посылок, команд и других сигналов была бы невозможной, если бы напряжение $u_1(t)$ оставалось неизменным или являлось бы периодической, неограниченно долго существующей функцией времени.

Однако в случае, когда промежуток времени, в течение которого амплитуды и частоты составляющих напряжения сохраняют неизменные значения, заметно превышает длительность переходного процесса, входное напряжение $u_1(t)$, взятое в некотором интервале времени, вполне возможно рассматривать как периодическую функцию времени (или сумму таких функций).

Периодическое же напряжение $u_1(t)$, согласно теореме Фурье, может быть представлено суммой конечного или бесконечно большого числа гармонических составляющих, имеющих частоты $f_c, 2f_c, 3f_c, \dots$, где f_c — основная частота ряда, с амплитудами $U_{1m1}, U_{1m2}, U_{1m3}, \dots$ и фазами $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$, включая и постоянную составляющую U_{1cp} , равную среднему значению функции $u_1(t)$ за период $T_c = 1/f_c$.

Непериодическое же напряжение представляет собой сумму бесконечно большого числа гармонических колебаний, имеющих бесконечно малые амплитуды $dU_{1m}(\omega) = F(\omega)d\omega$ и определенные фазы $\psi(\omega)$, зависящие от частоты. Частоты этих составляющих занимают сплошной спектр от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$, так что рядом стоя-

щие составляющие по частоте бесконечно мало отличаются между собой, т. е.

$$u_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \{dU_{1m}(\omega) \cos[\omega t - \psi(\omega)]\}.$$

В результате мы приходим к выводу, что напряжение на входе усилителя представляет собой сумму отдельных составляющих, образующих дискретный или сплошной спектр, простирающийся от $f_{мин}$ до $f_{макс}$, причем в отдельных случаях $f_{мин} > 0$ (когда отсутствует постоянная составляющая), а $f_{макс}$ равно или не равно бесконечно большой величине.

В определенных условиях работы к усилителю предъявляется требование сохранения формы кривой усиливаемых сигналов, т. е. получение зависимости напряжения $u_2(t)$, называемого *выходным напряжением*, отличающейся от $u_1(t)$ только в отношении масштаба по оси ординат и расположения на оси абсцисс.

Подобие в таком смысле кривых $u_2(t)$ и $u_1(t)$ обеспечивается при соблюдении следующих условий:

1) когда между мгновенными значениями выходного и входного напряжений существует прямая пропорциональность, иначе отношение u_2/u_1 не является функцией u_1 (здесь предполагается, что зависимость $u_2 = f(u_1)$ берется для определенного момента времени);

2) когда отношение действующих значений выходного и входного напряжений U_2/U_1 (при возбуждении усилителя, например, синусоидальным напряжением) не зависит от частоты в пределах спектра частот входного сигнала ($f_{мин} - f_{макс}$) и

3) когда все составляющие спектра частот входного сигнала при прохождении через усилитель запаздывают на одно и то же время.

Сигналы, для неискаженной передачи (усиления) которых в принципе требуется сохранение формы кривой, принято называть *импульсными сигналами*; к таковым, в частности, относятся сигналы, передающие изображение (видеосигналы).

Другой разновидностью являются *гармонические сигналы*, для неискаженного усиления которых неравномерное смещение во времени отдельных составляющих спектра вполне допустимо, несмотря на происходящее при этом изменение формы кривой. К категории гармонических сигналов относятся в первую очередь звуковые сигналы, слуховое восприятие которых можно считать не зависит от различия времени запаздывания составляющих частотного спектра.

В зависимости от вида подлежащих усилению сигналов усилители подразделяются на *усилители гармонических сигналов* и *усилители импульсных сигналов* (сокращенно *импульсные усилители*).

Различие между отмеченными видами сказывается, например, в подходе к проектированию и испытанию.

Анализ и расчет усилителей гармонических сигналов, как правило, ведется, исходя из рассмотрения стационарного режима; в таких же условиях производится и испытание усилителей, т. е. при возбуждении одним (или несколькими) синусоидальным напряжением, частота которого может регулироваться.

В случае усилителей импульсных сигналов наибольший интерес представляет рассмотрение переходного режима. Разумеется, что и методы испытания этих усилителей также имеют свои особенности.

1.2.3. Усилители постоянного и переменного тока

Усилители, обладающие способностью усиливать весьма медленные колебания, в том числе и «нулевой частоты», принято называть усилителями постоянного тока, даже и в том случае, если они в первую очередь предназначены для усиления мощности или напряжения. Прочие же усилители по аналогии должны быть названы усилителями переменного тока.

1.2.4. Усилители низкой и высокой частоты

С точки зрения сосредоточенности занимаемого спектра частот как гармонические, так и импульсные сигналы оказываются либо низкочастотными, либо высокочастотными колебаниями (сигналами).

Низкочастотные сигналы характеризуются относительно большей протяженностью занимаемого ими частотного диапазона. Другими словами, отношение граничных частот f_{\max}/f_{\min} у таких сигналов сравнительно велико и, как правило, значительно больше единицы.

Высокочастотные же сигналы представляют собой переменное напряжение (ток) условно одной определенной частоты, называемой несущей частотой, амплитуда, частота или фаза которого сравнительно медленно изменяются. Иначе, высокочастотные сигналы являются колебаниями, модулированными по амплитуде, частоте или фазе. Сигналами такого рода являются ток в цепи передающей антенны, эдс, индуцируемая в приемной антенне, и пр.

Отличительная черта высокочастотных сигналов — сосредоточенность по спектру, выражающаяся в том, что отношение граничных частот f_{\max}/f_{\min} в большинстве случаев довольно близко к единице. Так, например, при несущей частоте $f_0 = 1000$ кГц и амплитудной модуляции, частоты которой, допустим, заключены

в пределах $50 \div 10\,000$ гц, границы частотного спектра высокочастотного сигнала (они же — крайние боковые частоты) окажутся следующими: $f_{\text{мин}} = 1000 - 10 = 990$ кГц и $f_{\text{макс}} = 1000 + 10 = 1010$ кГц; при этом отношение $f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$ получится равным 1,02

На рис. 1.2 изображены формы кривых некоторых видов низкочастотных и высокочастотных сигналов. Спектральный характер аналогичных сигналов приведен на рис. 1.3.

В соответствии со свойствами рассмотренных сигналов усилители удобно разделить на усилители низкой частоты (УНЧ) и усилители высокой частоты (УВЧ).

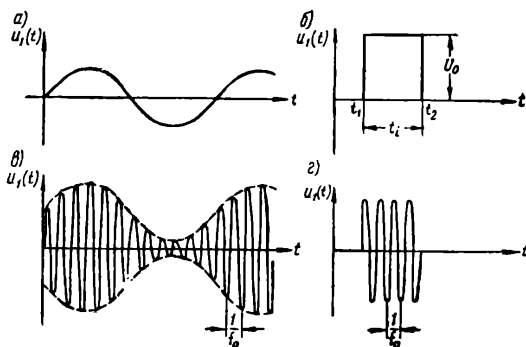


Рис. 1.2. Формы кривых некоторых видов низкочастотных (а, б) и высокочастотных (в, г) сигналов

Усилители низкой частоты рассчитываются на пропускание спектра частот с относительно большей протяженностью, в таких усилителях в большинстве случаев содержатся цепи, не обладающие свойствами колебательности (апериодические цепи), например, активные сопротивления в сочетании с емкостями и пр. Поэтому усилители низкой частоты иногда называются апериодическими усилителями.

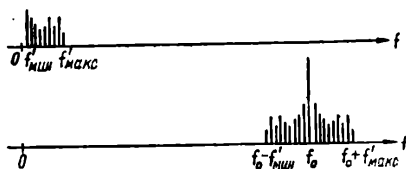


Рис. 1.3. Спектральный характер низкочастотного и высокочастотного сигналов

Усилители высокой частоты обычно выполняются как полосовые фильтры, срезающие частоты, выходящие за пределы относительно узкого спектра сигнала для того, чтобы задерживать посторонние колебания (помехи). Отмеченным свойством усилители высокой частоты обладают благодаря использованию в качестве анодных нагрузок колебательных систем — резонансных контуров, пьезокварцев, коаксиальных и объемных резонаторов и др.

Усилители высокой частоты в зависимости от способа наст-

ройки и числа колебательных систем, приходящихся на одну лампу, принято называть резонансными или полосовыми усилителями [76].

1.2.5. Узкополосные и широкополосные усилители

Подобно электрическому фильтру всякий усилитель способен пропускать некоторую ограниченную полосу частот, заключенную в пределах от f_n до f_v . Очевидно, что при этом разность $\Delta F = f_v - f_n$ есть не что иное, как *полоса пропускаемых частот*.

На практике принято называть усилитель *узкополосным*, если полоса пропускаемых им частот уже, чем это минимально необходимо для правильного воспроизведения звуковых сигналов, например, если ΔF не превышает 2000—2500 гц в случае УНЧ и 5000 гц в случае УВЧ.

При значениях полосы пропускаемых частот, далеко выходящих за пределы, требуемые для наиболее точной передачи звуковых сигналов, например, при $\Delta F \geq 20$ —50 кгц для УНЧ и $\Delta F \geq 40$ —100 кгц для УВЧ — усилитель называют *широкополосным*.

1.2.6. Усилители напряжения, тока, мощности

Настоящий признак классификации имеет в виду в общем смысле предназначение усилителя.

Так, если определяющим свойством усилителя является повышение, т. е. усиление напряжения (тока), то усилитель называется усилителем напряжения (тока).

Под усилителем мощности обычно понимается усилитель (или его оконечная выходная часть), рассчитанный на отдачу в цепь внешней нагрузки определенной мощности при соответствующей величине напряжения источника возбуждения.

§ 1.3. ВИДЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Простейший усилитель, содержащий один усилительный элемент, в качестве которого используется электронная лампа, кристаллический триод и пр. и, во всех случаях, некоторый четырехполюсник связи, расположенный между усилительным элементом и нагрузкой (например, трансформатор), носит название усилительного каскада (рис. 1.4).

Наряду с рассмотренными встречаются и более сложные усилительные каскады, содержащие два, три и более усилительных элемента, соединенных параллельно или по двухтактной схеме, рассматриваемой в пп. 3.2.2 и 3.2.4.

Если усиления, получаемого от одного каскада, недостаточно, то усилитель выполняют из нескольких каскадов, как показано на рис. 1.5.

В зависимости от своего основного назначения каскады подразделяются на три вида:

Первый вид — *каскад усиления напряжения*, — как следует из названия, предназначается для усиления подводимого к нему напряжения от источника возбуждения. Такой каскад обладает следующими свойствами: мощность возбуждения P_1 практически равна нулю, внешней нагрузкой (Z_2) для каскада является цепь, также не потребляющая мощности, значит, выходная мощность каскада усиления напряжения $P_2 \approx 0$.

Вообще говоря, равной нулю мощность P_2 может быть только в случае работы на внешнюю цепь, обладающую реактивным сопротивлением, например, если такой цепью является промежуток сетка — катод лампы при отсутствии сеточного тока, отклоняющая система электронно-лучевой трубки и пр. Такого рода внешняя цепь не потребляет мощности, но вместе с тем и не проводит постоянный ток, и на анод лампы не поступает напряжение от питающей батареи B_a (рис. 1.6). Поэтому-то и возникает необходимость применения четырехполосника связи между лампой и внешней нагрузкой, который в данном случае должен обладать следующими свойствами: 1) его входная и выходная проводимости для постоянного тока и входное сопротив-

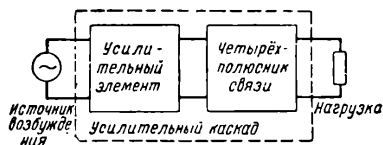


Рис. 1.4. Блок-схема усилительного каскада

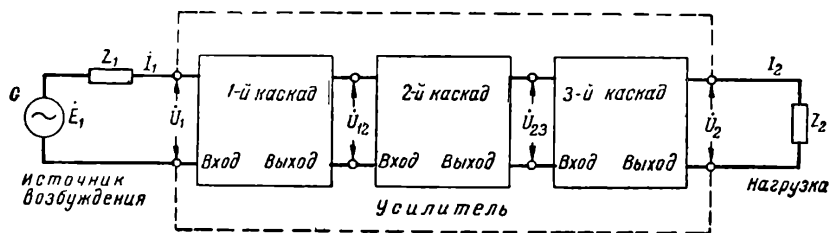


Рис. 1.5. Блок-схема усилителя

ление для переменного тока не равны нулю, 2) четырехполосник пропускает переменное напряжение и задерживает постоянное¹⁾.

Очевидно, что здесь лампа генерирует колебательную мощность, но вся эта мощность выделяется в четырехполоснике связи и не отдается во внешнюю цепь. Таким образом, при усилении напряжения усиливается и мощность, но усиленная мощность не используется во внешней цепи (в нагрузке).

¹ Это требование отпадает, если лампа используется как усилитель постоянного тока.

Так как у каскада усиления напряжения мощность P_2 , потребляемая внешней нагрузкой, практически равна нулю, то коэффициент усиления мощности

$$K_p = \frac{P_2}{P_1}$$

при $P_1 \approx 0$ оказывается неопределенной величины и не представляет интереса. Поэтому каскад усиления напряжения прежде

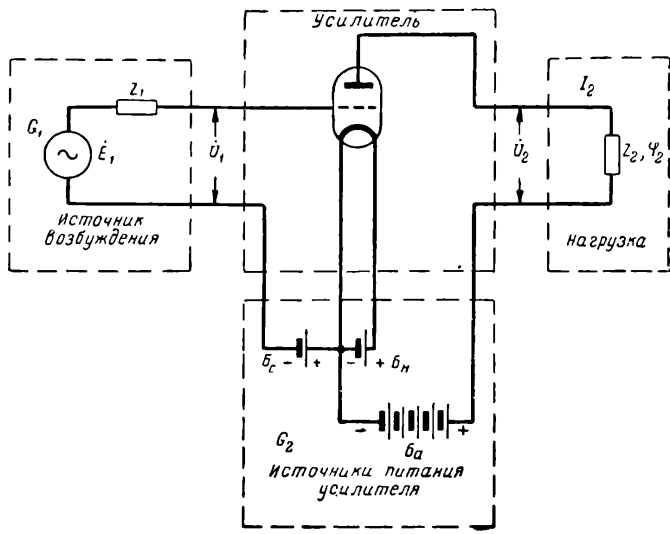


Рис. 1.6. Схема однокаскадного лампового усилителя

всего характеризуется величиной коэффициента усиления напряжения, сокращенно *коэффициента усиления*.

$$K = \frac{U_2}{U_1}$$

и максимальным уровнем самих напряжений U_1 и U_2 .

Второй вид — *каскад усиления мощности* — предназначается для генерирования определенной мощности, отдаваемой внешней нагрузке.

Каскады усиления мощности встречаются двух родов. К первому роду отнесем такие, которые практически не расходуют мощности на возбуждение ($P_1 \approx 0$) и характеризуются величиной выходной мощности P_2 и напряжением возбуждения U_1 . Второй род каскадов — усиления мощности характеризуется потреблением заметной мощности от своего источника возбуждения