

УПРАВЛЕНИЕ АМПЛИТУДОЙ МОЩНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ И ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Устройства ограничения, регулирования и модуляции амплитуды электрических сигналов используются во многих радиотехнических системах, например в радиолокации, в радиосвязи, в передатчиках теле- и радиовещания. Недостатком известных схемных решений построения таких устройств является их малая выходная мощность [1]. Этот недостаток может быть устранен благодаря использованию способности биполярных транзисторов с закрытыми переходами к осуществлению двухстороннего ограничения мощных гармонических и одностороннего ограничения мощных импульсных сигналов.

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ МОЩНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Задача управления амплитудой мощных гармонических сигналов впервые была решена в устройстве защиты полосовых усилителей мощности от перегрузки по входу и от рассогласования по выходу [2]. В нем использовалась способность биполярного транзистора с закрытыми переходами к двухстороннему симметричному ограничению гармонического сигнала (рис.1).

Защита от перегрузки по входу работает следующим образом [3, 4]. На базу транзистора VT1 с блока управления подается постоянное напряжение $U_{упр}$, запирающее оба перехода транзистора. На вход усилителя и одновременно на эмиттер транзистора подается переменное высокочастотное напряжение усиливаемого сигнала с амплитудой $U_{вх}$. Поскольку значения емкостей запертых переходов биполярных транзисторов примерно равны, переменное высокочастотное напряжение делится на них поровну. В положительный полупериод воздействия переменного сигнала, при условии $U_{вх} > 2U_{упр}$, напряжение на эмиттере транзистора в определенный момент времени начинает превышать напряжение на его базе. Переход база-эмиттер открывается, и для мгновенного значения входного воздействия переход эмиттер-коллектор транзистора представляет собой двухполюсник с сопротивлением, составляющим единицы ом. В отрицательный полупериод воздействия переменного входного сигнала открывается переход база-коллектор транзистора, и для мгновенного значения входного воздействия переход эмиттер-коллектор

А. Титов, д.т.н.
TitovAA@rzi.tusur.ru

транзистора также представляет собой двухполюсник, сопротивление которого составляет единицы ом. Таким образом, в обоих полупериодах транзистор шунтирует входное сопротивление усилителя, и в результате подаваемое напряжение оказывается ограниченным значением $2U_{упр}$.

Защита от рассогласования по выходу основана на следующем механизме. С увеличением рассогласования нагрузки усилителя с выходным сопротивлением направленного ответвителя (НО) сигналное напряжение, снимаемое с выхода отраженной волны НО, увеличивается и поступает на вход детектора. Постоянное напряжение на выходе детектора также растет и при заданном уровне рассогласования, устанавливаемом в блоке управления, $U_{упр}$ начинает уменьшаться, снижая амплитуду входного воздействия, поступающего на вход усилителя. В этом случае мощность сигнала на выходе усилителя падает пропорционально росту КСВН нагрузки.

Рассматриваемое устройство защиты можно использовать, например, совместно со стоваттным усилителем фирмы Mitsubishi, который выполнен на микросхемах M68702H этой фирмы и настроен на полосу пропускания 155–170 МГц (рис.2). Устройство защиты содержит: направленный ответвитель НО, балластное сопротивление R_6 ; детектор на диоде VD1 и конденсаторе C11; блок управления на транзисторе VT2 и резисторах R1, R3, R4, R6; транзистор VT1, реализующий двухстороннее ограничение мощных входных сигналов. Резистор R6 устанавливает уровень рассогласования, при кото-

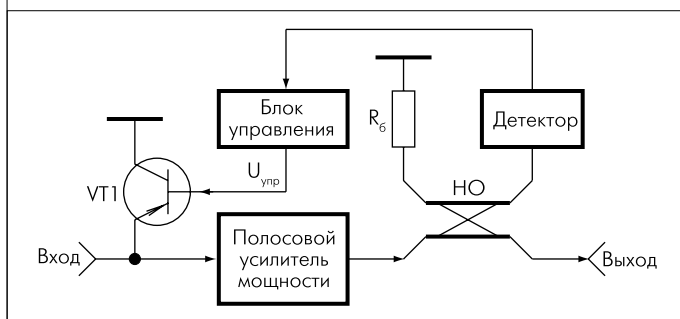


Рис. 1. Функциональная схема устройства защиты полосовых усилителей мощности от перегрузок. НО — направленный ответвитель, R_6 — балластное сопротивление, $U_{упр}$ — напряжение управления

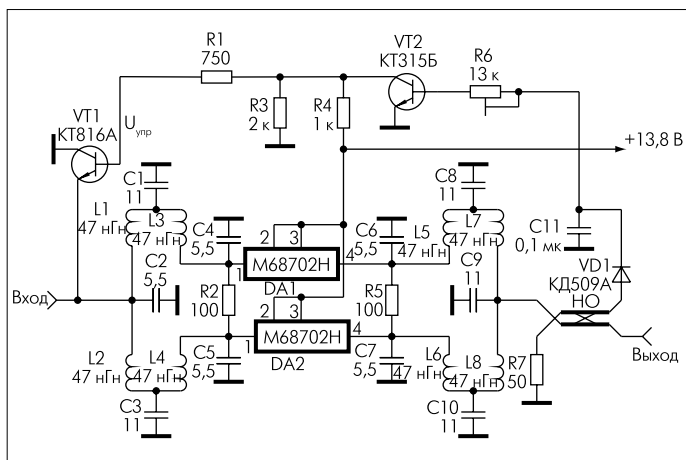


Рис.2. Принципиальная электрическая схема устройства защиты от перегрузки совместно с усилителем на микросхемах M68702H

ром транзистор VT2 начинает открываться, шунтируя резистор R3 и уменьшая тем самым напряжение управления, подаваемое на базу транзистора VT1.

Описанная способность биполярного транзистора к двухстороннему симметричному ограничению гармонического сигнала была использована в [5, 6] для создания устройства регулировки и модуляции амплитуды мощных гармонических сигналов (рис.3). Элементы L1, C1, L2, C2, L3, C5, L4, C6 образуют фильтры нижних частот с частотой среза, равной 240 МГц. Резистор R3 предназначен для изменения напряжения управления.

Физика работы устройства регулировки и модуляции амплитуды мощных гармонических сигналов такова. При подаче на вход мощного гармонического сигнала и при отсутствии напряжения модуляции U_{Ω} амплитуда сигнала на выходе будет равна значению $2U_{упр}$. Напряжение управления следует устанавливать равным примерно 1/4 от значения амплитуды модулируемого сигнала. В этом случае с увеличением напряжения U_{Ω} сигнал на выходе окажется модулированным с увеличивающейся глубиной модуляции, которая доходит до 100%.

Технические характеристики устройства: максимальный уровень входной мощности – не менее 50 Вт; полоса рабочих частот – 200–240 МГц; сопротивление генератора и нагрузки 50 Ом; область регулирования выходной мощности –

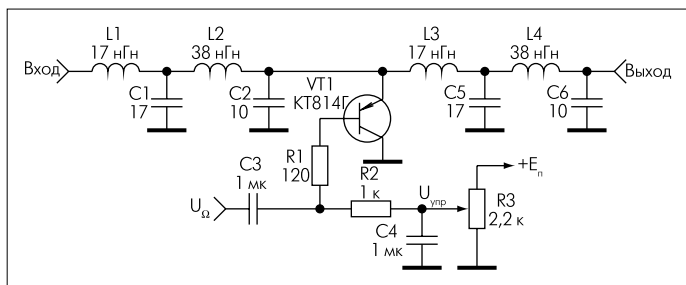


Рис.3. Принципиальная схема устройства регулировки и модуляции амплитуды мощных гармонических сигналов. U_{Ω} – напряжение модулирующего сигнала, E_n – источник питания

0,04–46 Вт; максимальная частота модулирующего сигнала, при которой отсутствуют визуально заметные искажения формы огибающей выходного сигнала – 10 МГц.

Недостатком рассматриваемого устройства является то, что оно может работать только от генератора с выходным сопротивлением, много большим сопротивления насыщения используемого биполярного транзистора VT1. Это обусловлено следующим. При закрытом транзисторе VT1 генератор работает на сопротивление нагрузки. В момент открывания транзистора VT1 генератор начинает работать на параллельное соединение сопротивления нагрузки и сопротивления насыщения транзистора VT1. При нулевом выходном сопротивлении генератора напряжение на нагрузке не зависит от ее сопротивления и устройство регулировки и модуляции перестает выполнять свои функции.

Чтобы устранить указанный недостаток, в [7] предложена функциональная схема устройства регулировки и модуляции амплитуды мощных гармонических сигналов с параллельно-последовательным включением транзисторов в тракт передачи (рис.4). В этом устройстве при работе от генератора тока, то есть от генератора с большим выходным сопротивлением, модуляция сигнала производится транзистором VT2, а при работе от генератора напряжения – транзистором VT1.

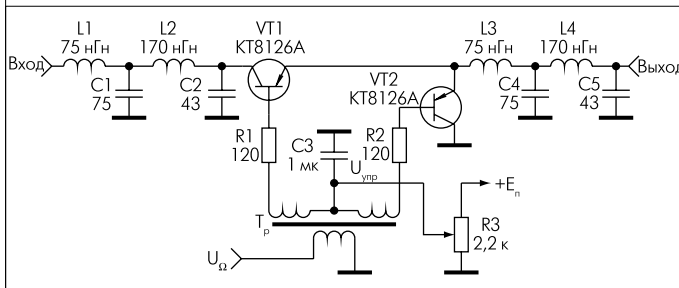


Рис.4. Принципиальная схема устройства регулировки и модуляции амплитуды мощных гармонических сигналов с параллельно-последовательным включением транзисторов. Тр – трансформатор с симметричным выходом

У схемы есть недостаток: приходится применять трансформатор со средней точкой во вторичной обмотке для получения противофазных сигналов управления транзисторами VT1 и VT2. Однако этот недостаток компенсируется возможностью увеличения мощности модулируемого сигнала.

Технические характеристики устройства [8]: максимальный уровень входной мощности – не менее 200 Вт; полоса рабочих частот – 45–55 МГц; сопротивление генератора изменяется от нуля ом до бесконечности; сопротивление нагрузки составляет 75 Ом; область регулирования выходной мощности – 0,1–185 Вт.

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Идея установки самоуправяемого ограничителя мощных сигналов на входе полосового усилителя мощности для ис-

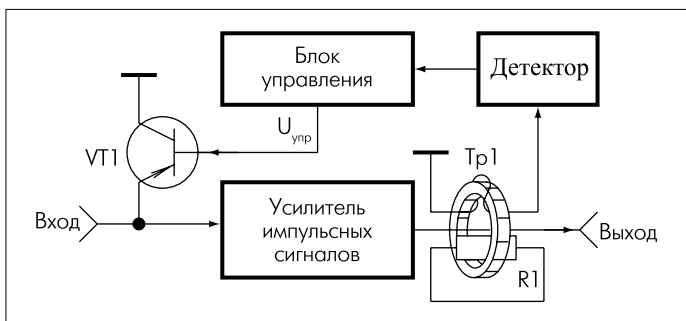


Рис.5. Функциональная схема устройства защиты от перегрузок усилителей однополярных импульсов. Tr1 – трансформатор тока, $U_{упр}$ – напряжение управления

ключения перегрузки по входу и защиты от рассогласования по выходу, описанная в [2], применялась в [9] для защиты от перегрузок усилителей однополярных импульсов (рис.5).

Защита от перегрузки по входу работает следующим образом. На базу транзистора VT1 с блока управления, имеющего малое выходное сопротивление, подается постоянное запирающее оба перехода транзистора напряжение $U_{упр}$. Если применен p-n-p-транзистор, то это напряжение положительное. При подаче на вход усилителя усиливаемых однополярных импульсов положительной полярности транзистор VT1 будет заперт до тех пор, пока амплитуда усиливаемых импульсов будет меньше запирающего напряжения $U_{упр}$. При превышении амплитудой усиливаемых импульсов значения $U_{упр}$ транзистор VT1 открывается и его входное сопротивление будет составлять доли ома. Поэтому в этом случае VT1 играет роль самоуправяемого ограничителя и защищает усилитель от перегрузки по входу, не позволяя подавать на вход усилителя импульсы с амплитудой, превышающей $U_{упр}$.

Принцип защиты усилителей однополярных импульсов от превышения выходным сигнальным током допустимого значения ничем не отличается от принципа защиты полосовых усилителей мощности (см. рис.1) от рассогласования по выходу. В схеме, приведенной на рис.1, на вход детектора

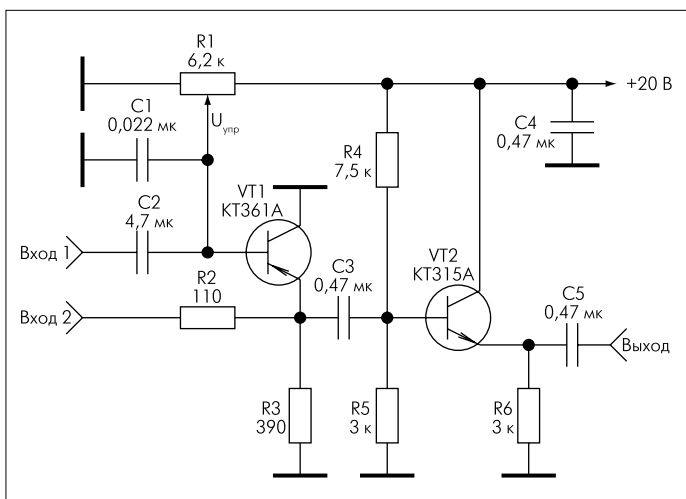


Рис.6. Принципиальная схема устройства регулировки и модуляции амплитуды однополярных импульсов

поступает сигнальное напряжение, пропорциональное напряжению отраженной волны; в схеме на рис.5 на вход детектора поступает сигнальное напряжение, пропорциональное выходному сигнальному току. Известно [10], что при неизменном значении сигнального напряжения, подаваемого на вход усилителя, и уменьшении сопротивления нагрузки усилителя значение сигнального тока, отдаваемого транзистором выходного каскада усилителя в нагрузку, увеличивается. Поэтому, если выходной усилительный каскад работает в режиме номинальной выходной мощности, а сопротивление нагрузки уменьшается, сигнальный ток может превысить допустимое значение, что приведет к выгоранию транзистора выходного каскада усилителя. Устройство защиты препятствует этому. При увеличении выходного сигнального тока постоянное напряжение на выходе детектора также увеличивается и при заданном его уровне, устанавливаемом в блоке управления, $U_{упр}$ начинает уменьшаться, уменьшая амплитуду входного воздействия, которое поступает на вход усилителя. В этом случае сигнальный ток на выходе усилителя окажется застabilизированным и независимым от уменьшающегося сопротивления нагрузки.

Резистор R1 и его выводы образуют замкнутый контур вокруг ферритового кольца трансформатора тока Tr1 с сопротивлением, равным сопротивлению резистора. Использование R1 позволяет уменьшить нагревание ферритового кольца. Изменяя сопротивление резистора R1, можно изменять уровень магнитного поля в ферритовом кольце и потери мощности в нем.

Способность биполярного транзистора играть роль самоуправяемого ограничителя однополярных импульсов можно использовать для создания устройства регулировки и модуляции амплитуды таких импульсов (рис.6). Устройство содержит: транзистор VT1, играющий роль самоуправяемого ограничителя; блок управления в виде потенциометра R1; делитель напряжения на резисторах R2 и R3; эмиттерный повторитель на транзисторе VT2.

Делитель напряжения на резисторах R2 и R3 необходим, чтобы сохранить работоспособность устройства при работе от генератора с малым выходным сопротивлением. При отсутствии делителя шунтирующее действие транзистора VT1 с уменьшением выходного сопротивления генератора будет уменьшаться и может привести к выходу из строя генератора либо к выгоранию транзистора VT1.

На вход 1 подается модулирующее напряжение. На вход 2 подаются модулируемые импульсы положительной полярности. Изменение положения движка резистора R1 приводит к изменению напряжения на базе транзистора VT1 и, при отсутствии модулирующего напряжения, к соответствующему изменению выходного импульсного напряжения. Интересно, что при больших амплитудах входных сигналов амплитуда напряжения импульсов на выходе устройства стро-

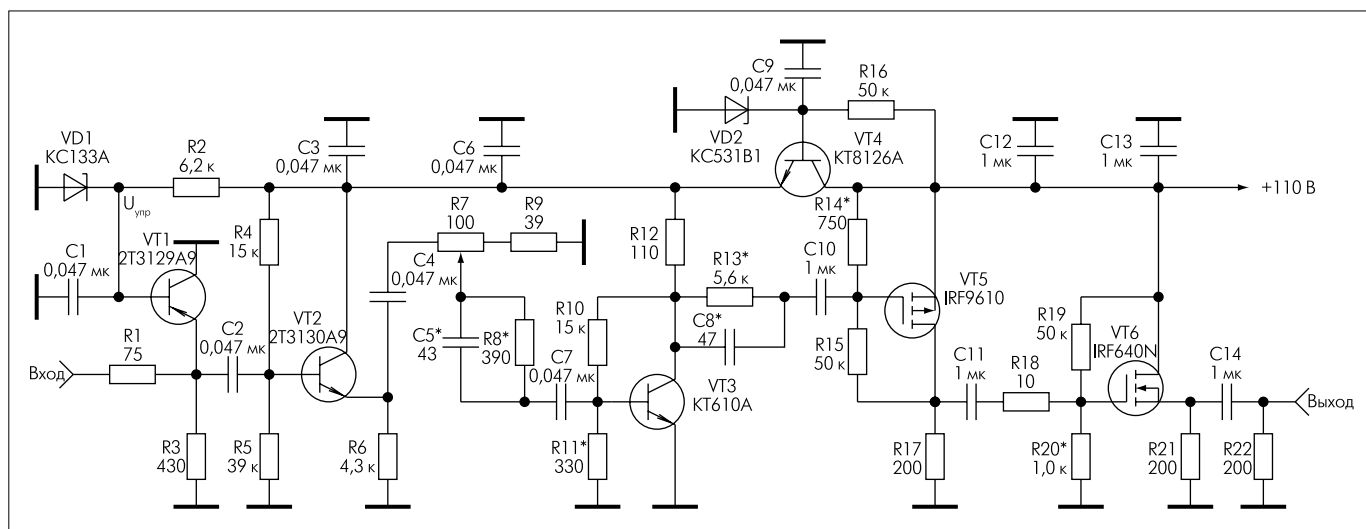


Рис.7. Принципиальная схема возбудителя импульсного СВЧ-генератора

го соответствует напряжению, подаваемому на базу транзистора VT1. При амплитудах входных сигналов, не превышающих напряжения на базе транзистора VT1, он заперт и не влияет на работу эмиттерного повторителя.

Эмиттерный повторитель необходим для поддержания работоспособности устройства регулирования при работе на низкоомную нагрузку. Он позволяет сохранять неизменной глубину регулирования и модуляции амплитуды импульсов при работе на произвольное сопротивление нагрузки, ограниченное допустимым импульсным током используемого транзистора VT2.

Технические характеристики устройства: полярность входных и выходных импульсов положительная; допустимая амплитуда входных импульсов – 20 В; диапазон регулировки и модуляции амплитуды выходных импульсов – 0,7–15 В; при длительности регулируемых импульсов 2 мкс спад вершины импульсов на выходе составляет 3%; длительность фронта импульсов на выходе – 5 нс.

Рассматриваемое устройство управления можно использовать в возбудителе импульсного СВЧ-генератора, работающего на диодах Ганна типа 3А750, 3А762 либо на лавинно-пролетных диодах типа 3А765, 3А766 и имеющего выходную импульсную мощность до 40 Вт в диапазоне частот 8–96 ГГц (рис.7, 8).

Возбудитель состоит из ограничителя на транзисторах VT1 и VT2, который обеспечивает стабилизацию амплитуды и длительности импульсов на его выходе при многократном изменении амплитуды импульсов на входе, а также из импульсного усилителя на транзисторах VT3, VT5, VT6.

Технические характеристики возбудителя: полярность входных и выходных импульсов положительная; допустимый диапазон амплитуд входных импульсов – 4–20 В; амплитуда импульсов на выходе ограничителя – 3,2 В; область линейного изменения амплитуды импульсов на выходе усилителя – 10–100 В; максимальный выходной ток в импуль-

се – 25 А; время установления фронта импульса – 10 нс; длительность усиливаемых импульсов – не более 200 нс; скважность усиливаемых импульсов – не менее 500; коэффициент усиления составляет 30 дБ; максимальное значение потребляемого тока – 60 мА.

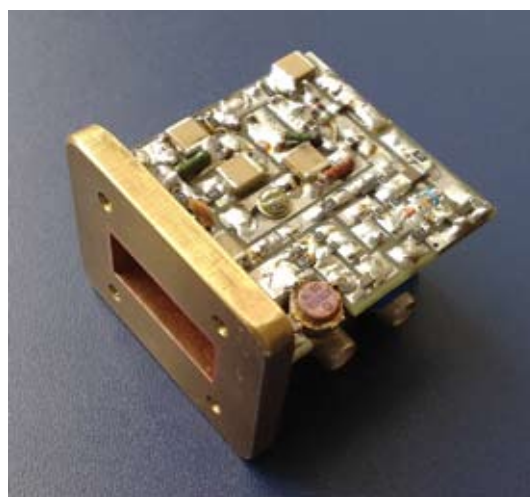


Рис.8. Общий вид возбудителя с импульсным СВЧ-генератором на диоде Ганна типа 3А762

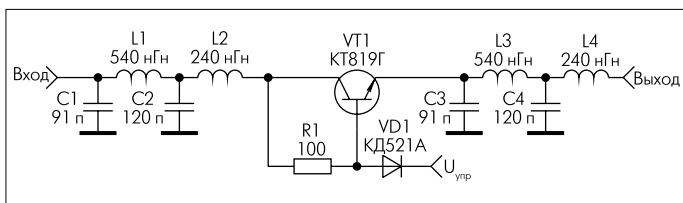


Рис.9. Принципиальная схема устройства управления амплитудой мощных однополярных импульсов

Недостатком рассмотренного устройства регулировки и модуляции амплитуды однополярных импульсов (см. рис.6) является то, что при отсутствии резистора R2 оно может работать только от генератора импульсов с выходным сопротивлением, много большим сопротивления насыщения используемого биполярного транзистора VT1. Если нужно управлять амплитудами мощных импульсов, применить резистор R2 оказывается сложно в связи с большими потерями на нем мощности импульсного сигнала. Например, при импульсном токе 1 А потери мощности будут составлять 110 Вт. В то же время, генераторы мощных сигналов имеют, как правило, малое выходное сопротивление [1], что ограничивает использование этого устройства.

Для устранения указанного недостатка в [11] предложена функциональная схема устройства управления амплитудой мощных однополярных импульсов с последовательным включением биполярного транзистора в тракт передачи (рис.9).

Устройство управления амплитудой мощных однополярных импульсов работает следующим образом. На вход сигнала управления подается постоянное напряжение управления $U_{упр}$, равное требуемой амплитуде импульсов на выходе устройства. В исходном состоянии полупроводниковый диод VD1 закрыт. При подаче на вход устройства импульсов, имеющих амплитуду меньше, чем значение постоянного напряжения управления $U_{упр}$, диод VD1 остается закрытым. Биполярный транзистор VT1 в момент подачи импульсов на вход устройства входит в насыщение благодаря тому, что на его базу через резистор R1 поступает отпирающее импульсное напряжение. Сопротивление насыщения транзистора VT1 составляет десятые доли ома. В этом случае импульс, подаваемый на вход устройства, беспрепят-

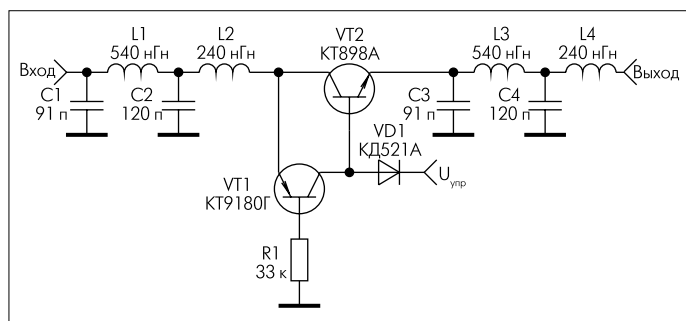


Рис.10. Принципиальная схема устройства управления амплитудой мощных импульсных сигналов со стабилизацией уровня насыщения биполярного транзистора, последовательно включенного в тракт передачи

ственно проходит на его выход и поступает в нагрузку, на которой выделяется импульсное напряжение, равное амплитуде входных импульсов. При подаче на вход устройства импульсов, имеющих амплитуду, превышающую значение постоянного напряжения управления $U_{упр}$, диод VD1 открывается, и на базе транзистора VT1 устанавливается напряжение, равное напряжению $U_{упр}$. Поэтому, как только амплитуда импульса на выходе устройства становится равной напряжению $U_{упр}$, транзистор VT1 входит в режим ограничения, препятствуя дальнейшему росту тока в нагрузке, поскольку напряжение на эмиттере транзистора не может превышать напряжения на его базе. Фильтры нижних частот совместно с емкостными составляющими входного и выходного сопротивлений транзистора VT1 образуют сопротивление тракта передачи, равное сопротивлению нагрузки, подключаемой к выходу устройства управления. В отличие от схемы, приведенной на рис.6, в схеме на рис.9 при большом значении $U_{упр}$ потери мощности в устройстве управления отсутствуют.

Технические характеристики устройства: полярность входных и выходных импульсов положительная; допустимая амплитуда входных импульсов – 105 В; диапазон регулирования амплитуды выходных импульсов – 35–100 В; максимальный ток в импульсе – 10 А; длительность фронта импульсов на выходе 15 нс; скважность импульсов при работе на нагрузку 10 Ом – не менее 25; амплитуда выходных импульсов остается неизменной при изменении сопротивления нагрузки от 10 Ом и более.

Рассматриваемое устройство управления амплитудой мощных однополярных импульсов (см. рис.9) может работать от генератора как с малым, так и с большим внутренним сопротивлением, однако обладает ограниченным диапазоном управления амплитудой выходных импульсов. Это обусловлено следующим. Если сопротивление резистора R1 мало, то при выходных импульсных напряжениях, которые много меньше напряжения, подаваемого на вход устройства, транзистор VT1 входит в глубокое насыщение. Это приводит к увеличению длительности выходных импульсов, которое обусловлено конечным временем рассасывания основных носителей. При большом сопротивлении резистора R1 и больших выходных напряжениях резко возрастает время установления переднего фронта выходных импульсов, что связано с ограничением базового тока транзистора.

Чтобы устранить указанный недостаток, в [12] предложена функциональная схема устройства управления амплитудой мощных импульсных сигналов со стабилизацией уровня насыщения биполярного транзистора, последовательно включенного в тракт передачи (рис.10). Устройство управления амплитудой мощных импульсных сигналов (см. рис.10) работает точно так же, как и схема, приведенная на рис.9. Отличие заключается лишь в том, что вместо резистора R1 (см. рис.9)

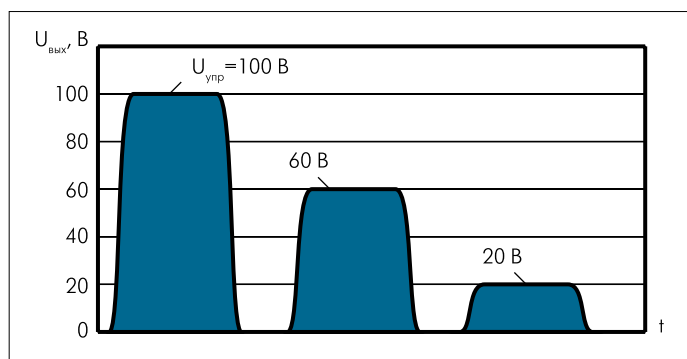


Рис. 11. Экспериментально измеренная форма и амплитуды импульсов на выходе устройства управления амплитудой мощных импульсных сигналов

в схеме на рис.10 использован генератор стабильного тока, состоящий из транзистора VT1 и резистора R1, который стабилизирует базовый ток транзистора VT2 при регулировке выходного импульсного напряжения и не позволяет ему войти в глубокое насыщение. Изменяя сопротивление резистора R1, можно регулировать величину максимального импульсного тока эмиттера транзистора VT2. При этом сохраняется работоспособность транзистора VT2 при работе устройства на короткое замыкание по выходу. Поскольку ни при каких значениях выходного импульсного напряжения транзистор VT2 не входит в насыщение, длительность импульсов в процессе регулирования их амплитуды не увеличивается.

Результат работы рассмотренного устройства (см. рис.10) наглядно иллюстрирует вид сигналов на его выходе (рис.11). Амплитуда и форма импульсов измерялись при трех значениях постоянного напряжения управления $U_{упр}$, равных 100, 60 и 20 В. Амплитуда импульса на входе устройства управления амплитудой мощных импульсных сигналов составляла 110 В. Видно, что длительность импульсов на выходе устройства практически не зависит от их амплитуды.

Таким образом, устройство управления амплитудой мощных импульсных сигналов (см. рис.10) не приводит к изменению длительности импульсов на выходе в процессе регулирования и обеспечивает регулировку амплитуды импульсов генераторов как с большим, так и с малым выходным сопротивлением.

Описанные устройства управления амплитудой мощных гармонических и импульсных сигналов значительно расширяют возможности построения различных радиотехнических систем, а также позволяют упрощать их конструкцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пикосекундная импульсная техника / В.Н. Ильющенко, Б.И. Авдоченко, В.Ю. Баранов и др./ Под ред. В.Н. Ильющенко. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 368 с.
2. Титов А.А., Ильющенко В.Н. Устройство для защиты усилителя мощности от перегрузки. – Патент РФ

№ 2217861. – Оpubл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

3. Титов А.А., Ильющенко В.Н. Защита усилителей мощности систем радиосвязи, УКВ ЧМ и ТВ вещания от перегрузки по входу и от рассогласования по выходу. – Радиотехника, 2003, № 12, с. 66–69.
4. Титов А.А. Транзисторные усилители мощности МВ и ДМВ. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006.
5. Титов А.А., Ильющенко В.Н. Амплитудный модулятор мощных сигналов. – Патент РФ № 2240645. – Оpubл. 20.11.2004, Бюл. № 32.
6. Титов А.А. Регулировка и модуляция амплитуды мощных сигналов. – Электросвязь, 2007, № 12, с. 46–48.
7. Титов А.А., Ильющенко В.Н. Модулятор амплитуды мощных сигналов. – Патент РФ № 2307452. – Оpubл. 27.09.2007, Бюл. № 27.
8. Титов А.А., Пушкарев В.П. Устройства управления амплитудой мощных сигналов. – Электронные средства и системы управления: Доклады Международной научно-практической конференции. Томск, 1–3 ноября 2007 г. – Томск: Изд-во В-Спектр, 2007, ч. 1, с. 80–83.
9. Титов А.А., Семенов А.В., Пушкарев В.П. Устройство защиты усилителя однополярных импульсов от перегрузки по току. – Патент РФ № 2328818. – Оpubл. 10.07.2008, Бюл. № 19.
10. Титов А.А. Сверхширокополосные усилители мощности. Эффективность автоматической регулировки режима класса А. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, № 4, с. 32–35.
11. Титов А.А., Семенов А.В., Пушкарев В.П., Юрченко В.И. Устройство управления амплитудой мощных однополярных импульсов. – Заявка на изобретение РФ № 2009102150 от 22.01.2009.
12. Титов А.А., Семенов А.В., Пушкарев В.П. Устройство управления амплитудой мощных импульсных сигналов. – Заявка на изобретение РФ № 2009304675 от 18.08.2009.