

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование радиочастотного усилителя мощности с амплитудным модулятором

Цель работы – экспериментальная проверка принципов функционирования и практическое освоение методов исследования основных характеристик радиочастотного усилителя мощности с амплитудным модулятором.

Задачи работы – изучение приемов работы с контрольно-измерительным оборудованием, а также измерение с его помощью напряжений в различных точках схемы и получение основных характеристик амплитудных модуляторов.

Краткие теоретические сведения

Практически во всех современных информационных радиоэлектронных системах используют модулированные радиосигналы.

Модуляция – процесс изменения одного или нескольких параметров радиосигнала (амплитуды, частоты и/или фазы) в соответствии с законом изменения модулирующего сигнала. Модуляцию можно также рассматривать как процесс переноса спектра модулирующего сигнала в область радиочастот.

Модуляцию в РПДУ осуществляют в специальном узле, который называют *модулятором*. Обычно модулятор имеет два входа: на один подают модулирующие колебание (например, от усилителя звуковой частоты), на другой – несущий радиосигнал. В ряде практических случаев функции модулятора в составе РПДУ может выполнять автогенератор или синтезатор сигналов.

При *амплитудной модуляции* (АМ) в соответствии с законом модулирующего сигнала изменяется амплитуда модулированного радиосигнала. Когда модулирующий сигнал имеет вид $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega} \cos \Omega t$, модулированный радиосигнал может быть представлен как:

$$u(t) = (U_0 + U_{\Omega} \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (2.1)$$

где U_{Ω} и Ω – амплитуда и частота модулирующего сигнала соответственно; U_0 и ω – амплитуда и частота модулированного радиосигнала соответственно. При этом обычно $\omega/\Omega \gg 10$. В результате АМ получается негармоническое колебание с непостоянной огибающей (рис. 2.1).

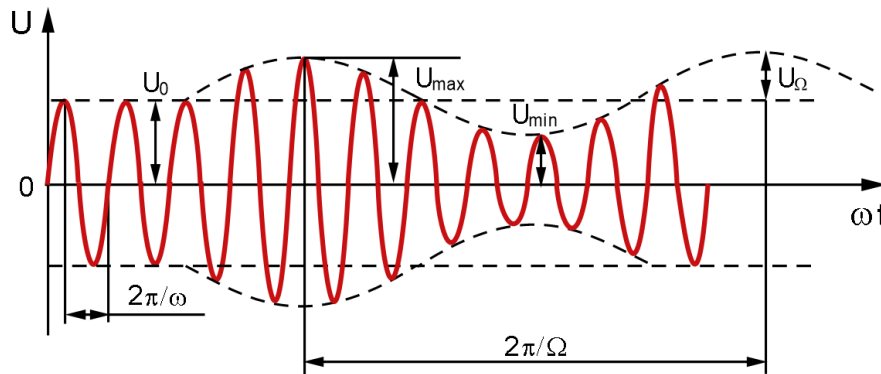


Рис. 2.1. АМ-сигнал во временной области

Перепишем выражение (2.1) в следующем виде:

$$u(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (2.2)$$

где $m = U_{\Omega}/U_0$ – коэффициент модуляции (изменяется от 0 до 1).

Выражение (2.2) приведем к следующему:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 \cos \omega t + U_0 m \cos \Omega t \cos \omega t = \\ &= U_0 \cos \omega t + \frac{U_0}{2} m \cos(\omega + \Omega)t + \frac{U_0}{2} m \cos(\omega - \Omega)t. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что в спектре АМ-сигнала, промодулированного однотоновым гармоническим колебанием, содержатся три составляющие (рис. 2.2). Ширина спектра АМ-сигнала при этом определяется как $\Pi = 2\Omega$. Следовательно, АМ-сигнал относится к классу узкополосных.

На практике, как правило, колебание с чистым тоном для АМ не применяют. Вместо него используют сигнал со сложным спектром в области звуковых частот. Этот сигнал характеризуется шириной занимаемой полосы частот $\Omega_{min} \dots \Omega_{max}$. Тогда спектр модулированного радиосигнала будет шире на $\Omega_{max} - \Omega_{min}$ (рис. 2.3).

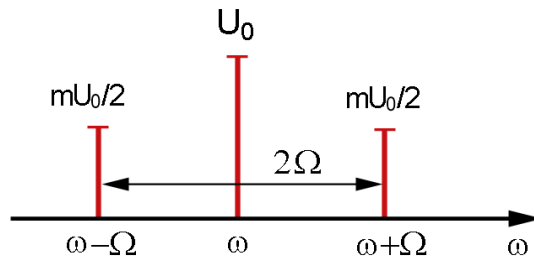


Рис. 2.2. Спектр АМ-сигнала

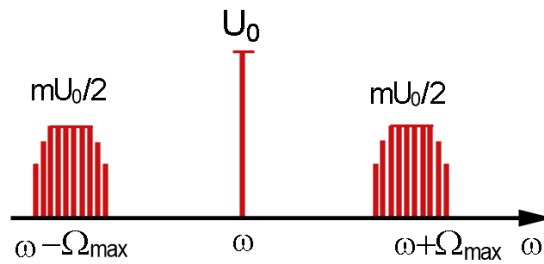


Рис. 2.3. Расширение спектра АМ-сигнала

Для получения наибольшей мощности боковых составляющих АМ-сигнала стремятся к максимальному коэффициенту модуляции $m \rightarrow 1$.

При АМ различают три основных режима работы РПДУ: *молчания* (или *несущей*), *максимальный* и *минимальный*. Максимальному режиму соответствует максимальное значение амплитуды модулированного радиосигнала, минимальному режиму – минимальное, в режиме молчания модуляция отсутствует. Очевидно, при модуляции режим работы РПДУ непрерывно меняется.

Мощность модулированного радиосигнала при однотоновой АМ меняется по закону:

$$P_1 = P_{1\text{мол}} (1 + m \cos \omega t)^2, \quad (2.4)$$

где $P_{1\text{мол}}$ – мгновенная мощность радиосигнала в режиме молчания.

Мгновенные мощности радиосигнала в трех режимах – молчания $P_{1\text{мол}}$, максимальном $P_{1\text{max}}$ и минимальном $P_{1\text{min}}$ – связаны соотношениями:

$$P_{1\text{max}} = P_{1\text{мол}} (1 + m)^2; P_{1\text{min}} = P_{1\text{мол}} (1 - m)^2. \quad (2.5)$$

При этом средняя мощность модулированного радиосигнала за период модулирующего колебания составит

$$P_{1cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{1mol} (1 + m \cos \Omega t)^2 dt = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) P_{1mol}. \quad (2.6)$$

Из (2.4-2.6) при $m = 1$ получим:

$$P_{1max} = 4P_{1mol}; P_{1min} = 0; P_{1cp} = 1,5P_{1mol}.$$

Для увеличения дальности передачи информации (или улучшения отношения сигнал/шум на входе радиоприемника) необходимо увеличивать мощность боковых составляющих АМ-сигнала. Следовательно, нужно стремиться к бóльшему коэффициенту модуляции. Однако в любом случае, учитывая, что информация содержится исключительно в боковых полосах, для ее передачи необходимо максимальное значение мощности РПДУ, то есть РПДУ используется неэффективно с энергетической точки зрения.

Обычно АМ осуществляют путем изменения напряжения, подводимого к одному из электродов усилительного транзистора в оконечном каскаде УМ. В этой связи различают *стоковую (коллекторную)* и *затворную (базовую)* модуляции. Возможны и комбинированные способы АМ.

Стоковая модуляция основана на управлении напряжением электропитания УМ (т.е. стоковой цепи усилительного транзистора) по закону модулирующего сигнала. Таким образом, при стоковой АМ источник модулирующего сигнала включают в цепь электропитания стока усилительного транзистора (рис. 2.4). В этом случае напряжение на выходе модулятора (модуляционного источника электропитания) описывается как

$$U_{mod}(t) = E_{пит.мол} + U_{\Omega} \cos \Omega t,$$

где $E_{пит.мол}$ – напряжение электропитания УМ в режиме молчания. Входное напряжение источника электропитания $E_{пит}$ выбирают исходя из обеспечения максимального режима РПДУ.

Для осуществления неискаженной АМ необходимо выбрать такой режим работы УМ, в котором его статическая модуляционная характеристика (СМХ)

линейна. При стоковой модуляции – это зависимость 1-й гармоники тока стока I_{c1} от напряжения электропитания УМ (рис. 2.5).

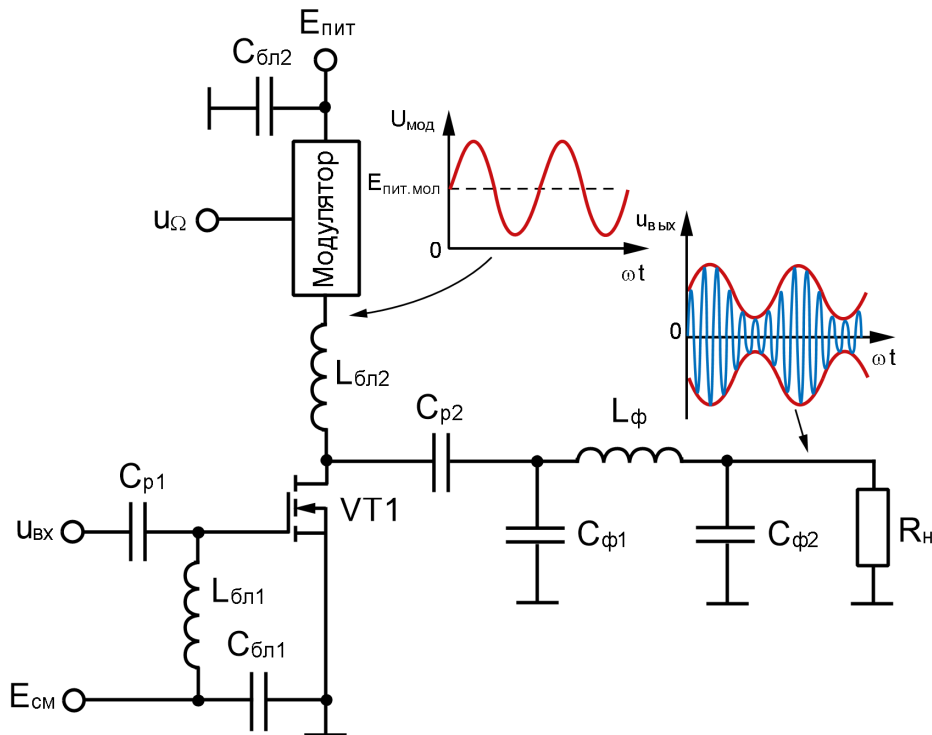


Рис. 2.4. Упрощенная схема УМ со стоковым амплитудным модулятором

На графике CMX точке 1 соответствует режим молчания (напряжение электропитания $E_{пит.мол}$), точке 2 – максимальный (напряжение электропитания $E_{пит.мах}$), а точке 3 – минимальный режим работы РПДУ (напряжение электропитания $E_{пит.мин}$).

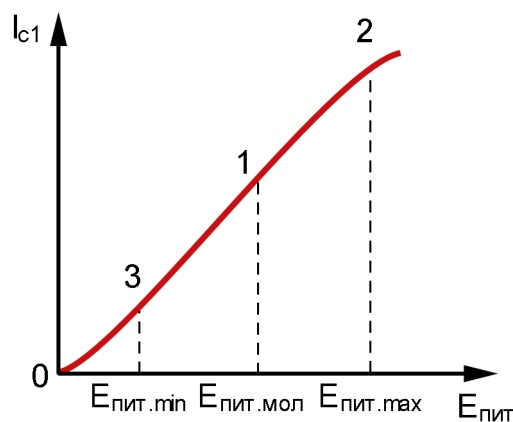


Рис. 2.5. Статическая модуляционная характеристика

Для получения линейной СМХ точка 2 на графике должна соответствовать граничному режиму работы УМ, а все остальные – слегка перенапряженному. При этом КПД УМ на протяжении всей характеристики будет оставаться почти неизменными.

Мощность модулятора при стоковой модуляции определяется как

$$P_{\text{мод}} = 0,5m^2 P_{0\text{мол}},$$

где $P_{0\text{мол}}$ – мощность, потребляемая УМ в режиме молчания. Мощность модулятора расходуется на повышение средней мощности модулированных колебаний.

В транзисторных РПДУ малой мощности, а также как дополнение к стоковой модуляции может находить применение затворная модуляция. Существуют два вида затворной модуляции: модуляция *смещением* и модуляция *возбуждением*. Первая осуществляется при постоянной амплитуде напряжения возбуждения $U_{\text{твх}}$ изменением напряжения смещения $E_{\text{см}}$ по закону модулирующего сигнала. Тогда напряжение на выходе модулятора будет иметь вид:

$$U_{\text{мод}}(t) = E_{\text{см.мол}} + U_{\Omega} \cos \Omega t,$$

где $E_{\text{см.мол}}$ – напряжение смещения УМ в режиме молчания.

При этом амплитуда напряжения возбуждения $U_{\text{твх}}$ и напряжение электропитания $E_{\text{пит}}$ остаются постоянными, а интервал углов отсечки составляет $\theta = 60 \dots 120^\circ$. Модулятор в этом случае включают в цепь смещения (рис. 2.6).

Для осуществления неискаженной затворной АМ смещением необходимо выбрать такой режим работы УМ, в котором его СМХ при затворной модуляции смещением, т.е. зависимость 1-й гармоники тока стока I_{c1} от напряжения смещения, будет линейна (рис. 2.7).

На графике СМХ точке 1 соответствует режим молчания (напряжение смещения $E_{\text{см.мол}}$, $\theta = 90^\circ$), точке 2 – максимальный (напряжение смещения $E_{\text{см.мах}}$, $\theta = 120^\circ$), точке 3 – минимальный режим работы РПДУ (напряжение

смещения $E_{см.мин}$, $\theta = 60^\circ$). Для получения линейной СМХ точка 2 должна соответствовать граничному режиму работы УМ, а все остальные – недонапряженному.

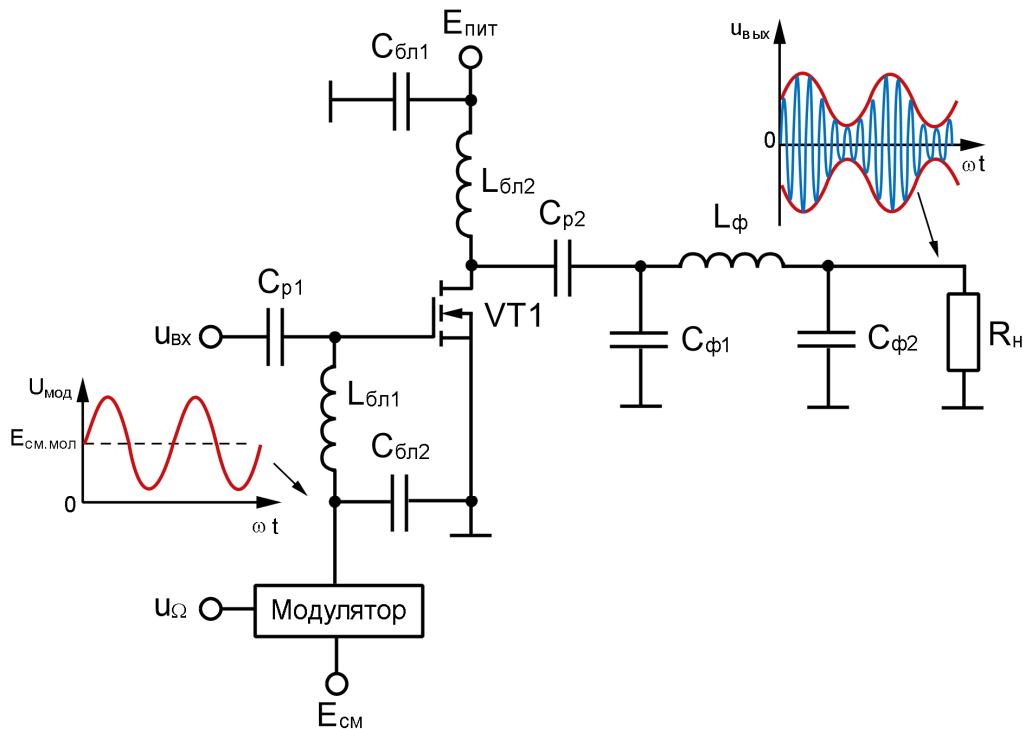


Рис. 2.6. Упрощенная схема УМ с затворным амплитудным модулятором (модуляция смещением)

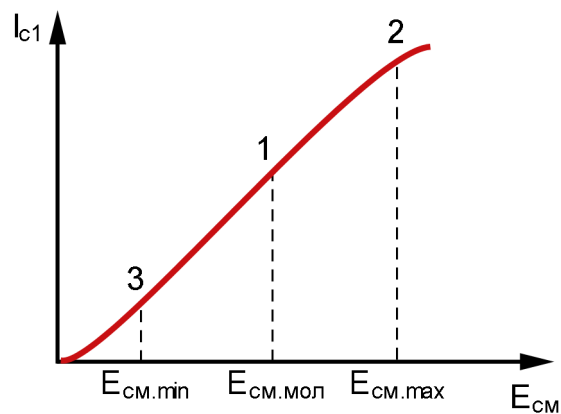


Рис. 2.7. Статическая модуляционная характеристика при затворной модуляции смещением

Как правило, мощность модулятора при затворной модуляции смещением на 1-2 порядка меньше, чем при стоковой модуляции.

При модуляции возбуждением напряжение смещения $E_{см}$ остается постоянным, а по закону модулирующего сигнала изменяется амплитуда напряжения возбуждения $U_{мвх}$. Режим работы УМ должен быть недонапряженным, а первая гармоника выходного тока – прямо пропорциональна амплитуде напряжения возбуждения. Такой вид модуляции представляет собой случай усиления радиосигналов с непостоянной огибающей и подробно исследуется в лабораторной работе №6.

Описание лабораторного стенда

Схема соединений лабораторного стенда приведена на рис. 2.8. Стенд включает в себя:

- лабораторный макет;
- вольтметр В7-38;
- амперметр Д5099;
- блок питания Б5-47;
- генератор ЗЧ 33522В;
- генератор РЧ АКИП-3210;
- осциллограф АКИП-4115/1А;
- анализатор спектра АКИП-4205/1.

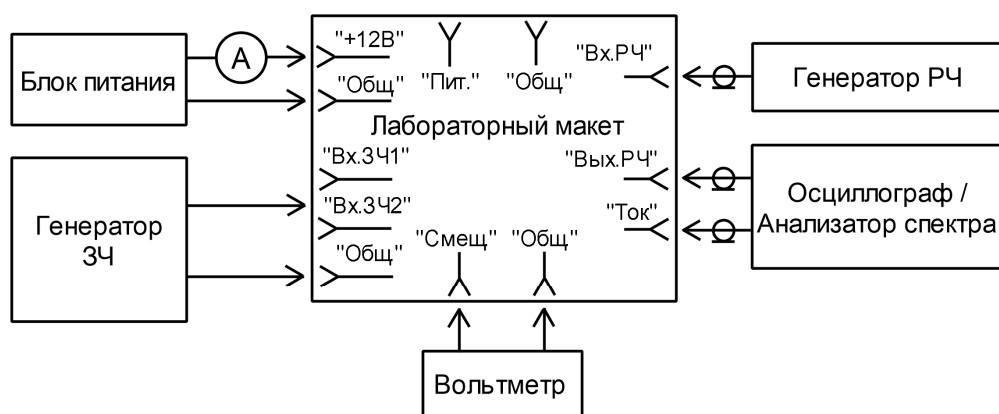


Рис. 2.8. Схема соединений лабораторного стенда

Все перечисленные средства измерений, генераторы и блок питания могут быть заменены другими, которые по своим функциональным

возможностям, характеристикам и классу точности для соответствующих параметров не хуже указанных.

Лицевая панель лабораторного макета (рис. 2.9) содержит его структурную схему, органы управления, индикации и гнезда для подключения средств измерения, генераторов и блока питания.

В макете предусмотрена возможность плавного изменения напряжения смещения УМ с помощью переменного резистора «Смещ.» и напряжения электропитания УМ с помощью переменного резистора «Пит.».

Мощность, потребляемая УМ от блока питания, контролируется при помощи амперметра и вольтметра, встроенного в блок. Выходное напряжение блока питания должно составлять 12 ± 1 В, максимальный ток – 2 А.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 2.10.

В основе макета – транзисторный однокаскадный УМ, рассмотренный в лабораторной работе №1. В стоковую и затворную цепи УМ включены соответственно стоковый и затворный модуляторы.

Стоковый модулятор представляет собой линейный регулятор напряжения, запитываемый от блока питания. В отсутствие модулирующего сигнала на гнездах «Вх.ЗЧ2»-«Общ.» регулятор формирует на своем выходе (гнезда «Пит.»-«Общ.») постоянное напряжение от 7 до 11 В. Регулировка напряжения осуществляется переменным резистором $R13$.

При подаче модулирующего сигнала на гнезда «Вх.ЗЧ2»-«Общ.» выходное напряжение регулятора, подаваемое в стоковую цепь УМ, повторяет по форме модулирующий сигнал. Таким образом осуществляется амплитудная модуляция УМ по цепи стока.

Затворный модулятор также представляет собой линейный регулятор напряжения, но менее мощный. В отсутствие модулирующего сигнала на гнездах «Вх.ЗЧ1»-«Общ.» регулятор формирует на своем выходе (гнезда «Смещ.»-«Общ.») постоянное напряжение смещения УМ от 2 до 5 В. Регулировка напряжения осуществляется переменным резистором $R3$.

При подаче модулирующего сигнала на гнезда «Вх.ЗЧ1»-«Общ.» выходное напряжение регулятора, подаваемое в затворную цепь УМ, повторяет по форме модулирующий сигнал. Таким образом осуществляется амплитудная модуляция УМ смещением.

В качестве нагрузки УМ используется резистор $R17$. Для обеспечения контроля формы тока стока применен резистор $R9$. Форму напряжения на этом резисторе, совпадающую с формой тока стока, можно наблюдать на экране осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

Для защиты УМ от перенапряжения по цепи электропитания предусмотрен супрессор $VD2$. Как только напряжение электропитания превысит допустимое значение, ток через супрессор резко увеличится – и сработает самовосстанавливающийся предохранитель FAl , который отключит УМ от блока питания. Также отключение произойдет и в том случае, если ток потребления УМ по какой-то причине станет выше допустимого.

Цепь $R2-VD1$ обеспечивает индикацию наличия напряжения электропитания.

Методика выполнения работы

Изучите теоретические сведения, приведенные в настоящих методических указаниях, по теме лабораторной работы. В случае наличия неясных моментов проконсультируйтесь у преподавателя (лаборанта).

Ознакомьтесь со схемами лабораторного стенда и макета, а также с размещением органов управления макетом. Изучите устройство и размещение органов настройки и регулировки измерительных приборов, генераторов и блока питания.

ВАЖНО! Перед началом работы в лаборатории изучите правила техники безопасности!

Выполнение работы осуществляется в соответствии со следующей методикой.

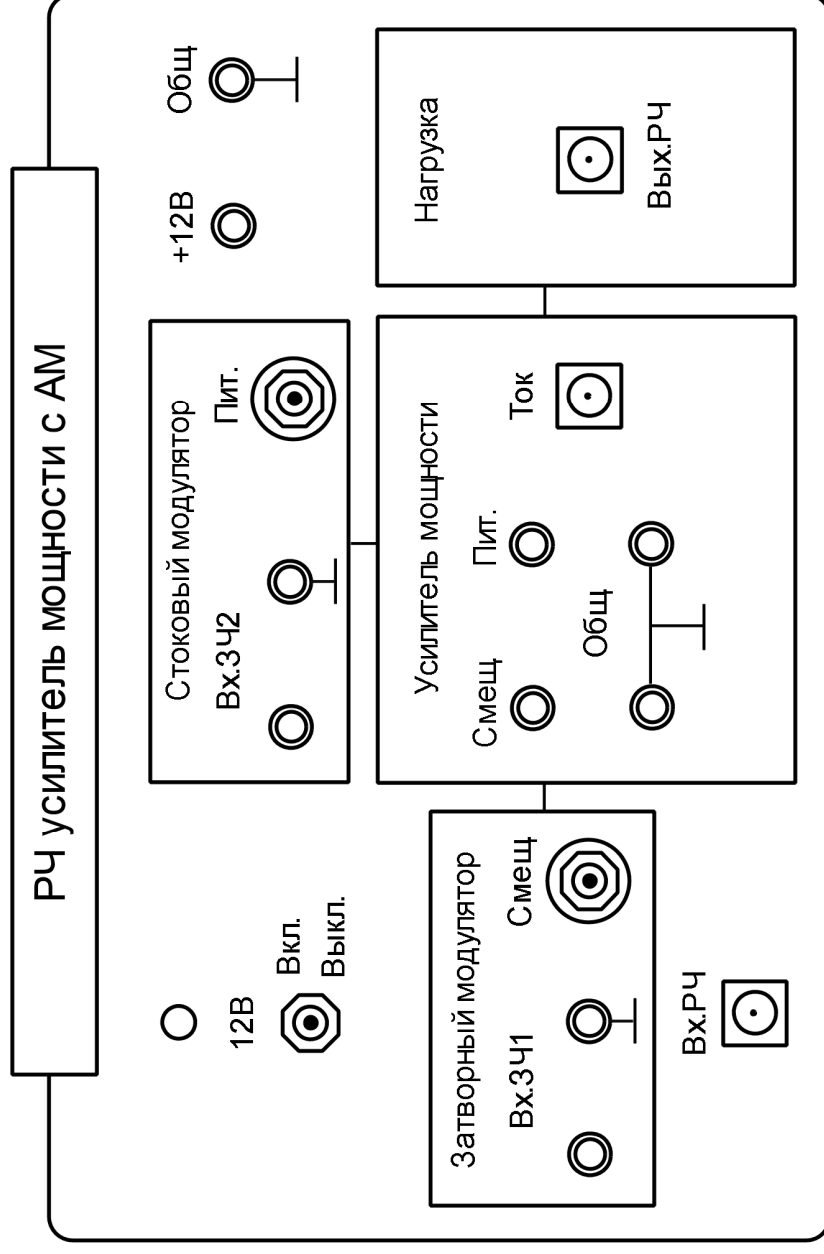


Рис. 2.9. Лицевая панель лабораторного макета

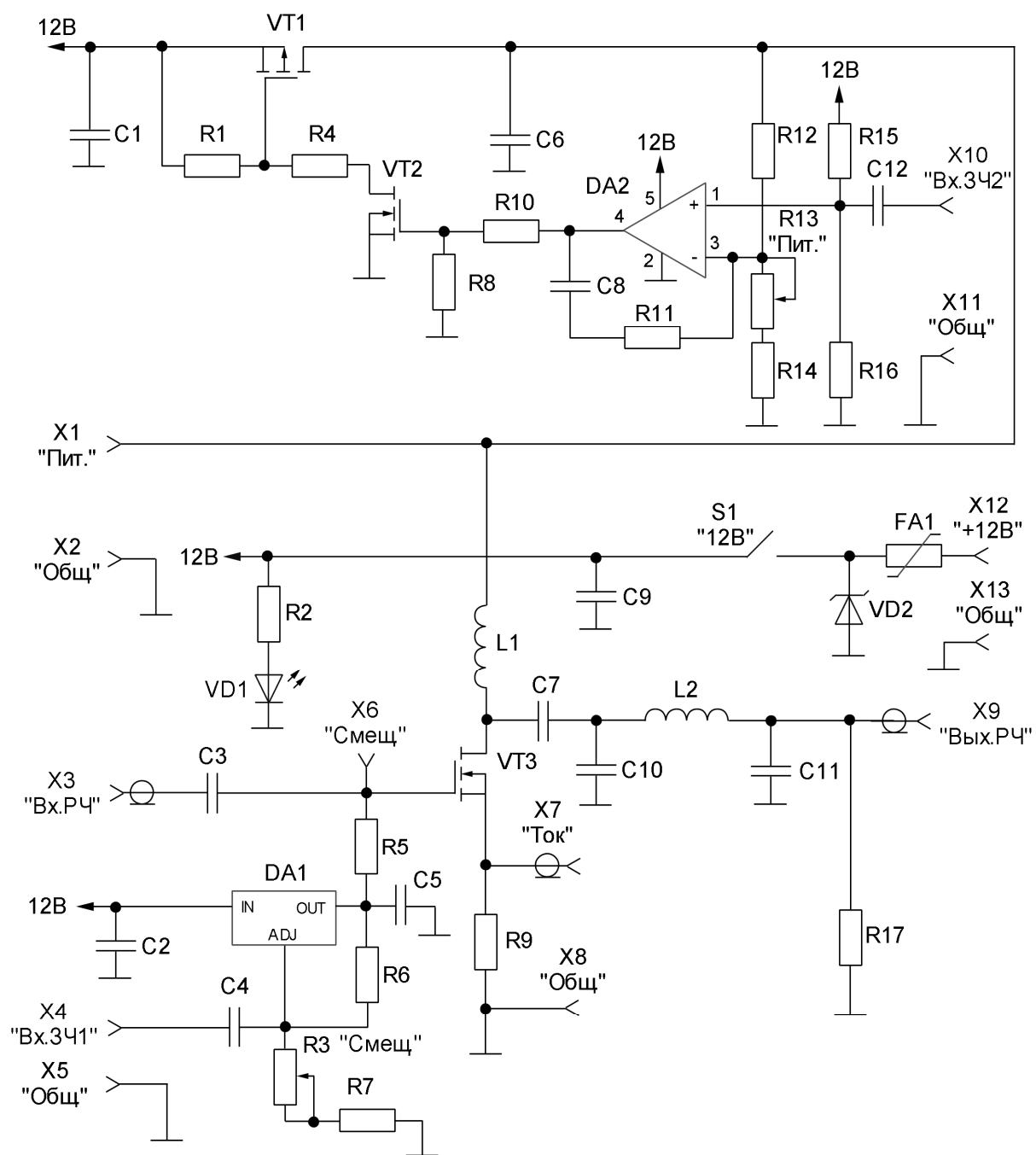


Рис. 2.10. Принципиальная схема лабораторного макета

1. Исследование УМ со стоковой амплитудной модуляцией

1.1 Собрать лабораторный стенд в соответствии со схемой на рис. 2.8. Подключить к сети переменного тока 230 В 50 Гц измерительные приборы, генераторы и блок питания.

1.2 Не включая электропитания, перевести ручку переменного резистора «Смещ.» в крайнее левое положение, а ручку переменного резистора «Пит.» в крайнее правое положение. Выставить на генераторе РЧ частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,5 В. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

1.3 Установить на блоке питания напряжение 12 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «12В» (положение «Вкл.»). При этом на лицевой панели макета загорится светодиодный индикатор.

1.4 Изменяя сопротивление переменного резистора «Пит.», установить напряжение электропитания УМ 11 В. Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.», установить напряжение смещения для работы УМ в граничном режиме. Напряжения электропитания и смещения фиксировать с помощью вольтметра, подключаемого попеременно к гнездам «Пит.»-«Общ.» и «Смещ.»-«Общ.» соответственно, осциллограммы тока стока усилительного транзистора – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток»

Убедиться, что на выходе УМ присутствует гармоническое колебание. Форму напряжения в нагрузке наблюдать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.РЧ».

Оценить угол отсечки тока стока, соответствующий выбранному значению напряжения смещения.

1.5 Изменяя напряжение электропитания E_{num} УМ от 5 В до 11 В с помощью переменного резистора «Пит.», снять характеристику $U_{mвых} = f(E_{num})$.

Полученные данные занести в табл. 2.1. Построить график характеристики $U_{mвых} = f(E_{num})$, определить границы квазилинейного участка и рабочую точку на середине этого участка. Для каждого значения напряжения

электропитания УМ из табл. 2.1 найти угол отсечки тока стока, а также постоянную составляющую тока стока. Постоянную составляющую тока стока измерять с помощью амперметра.

Убедиться, что при уменьшении напряжения электропитания УМ переходит в слабоперенапряженный режим.

Табл. 2.1. Результаты измерений

Напряжение электропитания, $E_{пит}$, В	Амплитуда напряжения в нагрузке, $U_{твых}$, В	Угол отсечки, θ , град	Постоянная составляющая тока стока, $I_{с0}$, А
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

1.6 Выставить рабочий режим стокового модулятора. Установить на генераторе ЗЧ частоту модулирующего гармонического сигнала 1 кГц и амплитуду напряжения 0,1 В. Подключить выход генератора ЗЧ к гнездам «Вх.ЗЧ2»-«Общ.».

1.7 Изменяя амплитуду модулирующего сигнала U_{Ω} от 0 до 0,3 В с шагом 0,05 В, получить различный коэффициент модуляции m . Полученные данные занести в табл. 2.2. Для каждого значения коэффициента модуляции зафиксировать осциллограммы напряжения и спектр выходного сигнала УМ с помощью осциллографа и анализатора спектра соответственно, подключаемых попеременно к гнезду «Вых.РЧ».

Отметить, при каком значении амплитуды модулирующего сигнала происходит клиппирование (т.е. ограничение сверху) выходного сигнала УМ.

Построить график динамической модуляционной характеристики $m = f(U_{\Omega})$. Сделать выводы о степени ее линейности. Определить границы линейного участка и рабочую точку на середине этого участка.

Табл. 2.2. Результаты измерений

Амплитуда напряжения модулирующего сигнала, U_{Ω} , В	Коэффициент модуляции, m , %
0	
0,05	
0,1	
0,15	
0,2	
0,25	
0,3	

1.8 Выставить амплитуду напряжения модулирующего сигнала, соответствующую рабочей точке в п. 1.7.

1.9 Изменяя частоту модулирующего сигнала от 100 Гц до 1 кГц с шагом 100 Гц, зафиксировать осциллограммы напряжения и спектр выходного сигнала УМ. Оценить для каждого случая ширину спектра сигнала.

1.10 Оценить средний КПД УМ при максимальном значении полученного индекса модуляции. Сравнить его с КПД УМ в отсутствие амплитудной модуляции. Сделать выводы о линейности модулятора.

1.11 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «12В» в положение «Выкл.». При этом на лицевой панели макета светодиодный индикатор должен погаснуть. Отсоединить выход генератора ЗЧ от макета.

2. Исследование УМ с затворной амплитудной модуляцией смещением

2.1 Не включая электропитания, перевести ручку переменного резистора «Смещ.» в крайнее левое положение, а ручку переменного резистора «Пит.» в крайнее правое положение. Выставить на генераторе РЧ частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,5 В. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

2.2 Установить на блоке питания напряжение 12 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «12В» (положение «Вкл.»). При этом на лицевой панели макета загорится светодиодный индикатор.

2.3 Изменяя сопротивление переменного резистора «Пит.», установить напряжение электропитания УМ 11 В. Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.» и получая напряжение смещения от 2 до 5 В, измерить

амплитуду напряжения в нагрузке с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.РЧ». Напряжение смещения фиксировать с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Смещ.»-«Общ.».

Занести полученные данные в табл. 2.3. Построить зависимость амплитуды напряжения в нагрузке от напряжения смещения $U_{твых} = f(E_{см})$. Для каждого значения напряжения смещения из табл. 2.3 найти угол отсечки тока стока.

Табл. 2.3. Результаты измерений

Напряжение смещения, $E_{см}$, В	Амплитуда напряжения в нагрузке, $U_{твых}$, В	Угол отсечки, θ , град
2,0		
2,5		
3,0		
3,5		
4,0		
4,5		
5,0		

2.4 На графике $U_{твых} = f(E_{см})$ определить границы квазилинейного участка и рабочую точку на середине этого участка. Добиться того, чтобы на верхней границе линейного участка УМ работал в граничном режиме (например, за счет уменьшения напряжения электропитания УМ).

2.5 Выставить рабочий режим затворного модулятора. Установить на генераторе ЗЧ частоту модулирующего гармонического сигнала 1 кГц и амплитуду напряжения 0,1 В. Подключить выход генератора ЗЧ к гнездам «Вх.ЗЧ1»-«Общ.».

2.6 Изменяя амплитуду модулирующего сигнала U_{Ω} от 0 до 0,3 В с шагом 0,05 В, получить различный коэффициент модуляции m выходного сигнала УМ. Полученные данные занести в табл. 2.4. Для каждого значения коэффициента модуляции зафиксировать осциллограммы напряжения и спектр выходного сигнала УМ. Сделать выводы о линейности модулятора.

Табл. 2.4. Результаты измерений

Амплитуда напряжения модулирующего сигнала, U_{Ω} , В	Коэффициент модуляции, m , %
0	
0,05	
0,1	
0,15	
0,2	
0,25	
0,3	

2.7 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «12В» в положение «Выкл.». При этом на лицевой панели макета светодиодный индикатор должен погаснуть.

2.8 Отключить измерительные приборы, генераторы и блок питания от сети переменного тока 230 В 50 Гц и привести рабочее место в порядок. Доложить преподавателю (лаборанту) об окончании работы.

2.9 Сделать выводы и подготовить отчет по проделанной работе.

Требования к оформлению и содержанию отчета

Отчет о работе составляется в бумажном и электронном виде на стандартных листах формата А4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2017.

Отчет должен включать:

1. Идентификатор группы, фамилию студента, дату выполнения работы на титульном листе.
2. Название, цель и краткое содержание работы.
3. Структурную схему лабораторного стенда и перечень применяемого оборудования.
4. Принципиальную схему лабораторного макета.
5. Временные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.
6. Анализ результатов, оценку, обобщения и выводы по работе.
7. Список использованной литературы, приложения (при необходимости).
8. Ответы на вопросы и решения задач для подготовки к защите.

9. Место для подписи преподавателя (лаборанта).

Отчет по лабораторной работе должен быть составлен аккуратно и последовательно. Схемы должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД с применением специального программного обеспечения.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое амплитудная модуляция? Укажите основные области применения амплитудной модуляции в современных радиосистемах.

2. Какими способами осуществляют амплитудную модуляцию в радиопередатчиках? Приведите их преимущества и недостатки.

3. Что такое коэффициент модуляции? В каких единицах он измеряется?

4. Поясните, что является причиной возникновения нелинейных искажений при осуществлении амплитудной модуляции?

5. От чего зависит ширина спектра сигнала на выходе радиопередатчика с амплитудной модуляцией?

6. В каких режимах должен работать усилитель мощности для осуществления неискаженной амплитудной модуляции?

7. Объясните назначение элементов принципиальной схемы лабораторного макета. Поясните принцип его работы.

8. Можно ли использовать в схеме стокового модулятора лабораторного макета n -канальный МОП-транзистор вместо p -канального? Что для этого должно быть изменено в схеме?

9. Разработайте в программах схемотехнического моделирования Micro-Cap или Matlab Simulink модель исследуемой схемы лабораторного макета. Получите временные диаграммы, характеризующие работу модели, и сравните их с полученными в результате проведения лабораторных исследований.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Исследование радиочастотного усилителя мощности с импульсным модулятором

Цель работы – экспериментальная проверка принципов функционирования и практическое освоение методов исследования основных характеристик радиочастотного усилителя мощности с импульсным модулятором.

Задачи работы – изучение приемов работы с контрольно-измерительным оборудованием, а также измерение с его помощью напряжений в различных точках схемы и получение основных характеристик радиочастотного усилителя мощности с импульсным модулятором.

Краткие теоретические сведения

Импульсную модуляцию радиосигналов широко используют в различных областях современной науки и техники. Это обработка материалов, экспериментальная физика, медицина, лазерная и радиолокационная техника и т. д.

Часто импульсную модуляцию реализуют в оконечном УМ РЧДУ. Для этого применяют способ, подразумевающий подачу от ИЭП импульсов напряжения электропитания в цепь выходного электрода усилительного прибора УМ. Таким образом, оконечный УМ потребляет электроэнергию лишь в небольшие промежутки времени. В этом случае ИЭП включает в себя накопитель электроэнергии (НЭ), зарядное устройство (ЗУ) и управляемый коммутатор K (рис. 3.1). При этом энергия, потребляемая УМ в течение времени формирования радиоимпульса, накапливается в течение сравнительно длительного промежутка времени между импульсами напряжения электропитания $T - t_u$ в НЭ, где t_u – длительность импульса, а T – период повторения.

Накопитель и управляемый под действием схемы управления (СУ) коммутатор обычно рассматривают как один функциональный каскад, называемый *импульсным модулятором* (ИМ).

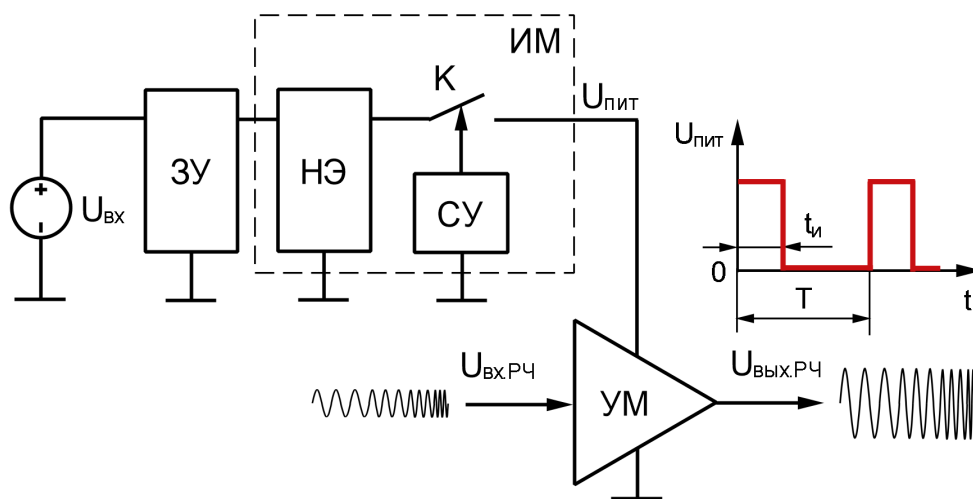


Рис. 3.1. Функциональная схема УМ с импульсным модулятором

В разомкнутом положении управляемого коммутатора K происходит накопление электроэнергии, то есть заряд НЭ от источника напряжения $U_{вх}$ в течение времени $T - t_u$. В замкнутом положении коммутатора K накопленная электроэнергия расходуется в течение длительности импульса напряжения электропитания t_u .

Роль НЭ могут выполнять реактивные элементы: катушки индуктивности и конденсаторы. В современных ИМ чаще всего используют емкостные НЭ. В качестве коммутаторов применяют транзисторы.

Назначением ЗУ является высокоэффективное (с энергетической точки зрения) преобразование параметров электроэнергии источника $U_{вх}$ и заряд НЭ в паузах между формируемыми импульсами напряжения. Также ЗУ должно обеспечивать равномерное потребление электроэнергии от источника $U_{вх}$, электромагнитную совместимость, а также в ряде случаев обладать специфическими сервисными функциями (регулирование выходного напряжения, дистанционное включение/отключение, защита от аварийных режимов работы и т. д.).

Итак, ИМ преобразует электроэнергию с выхода НЭ в электроэнергию с параметрами, требуемыми цепью электропитания УМ, и выполняет функцию вывода этой электроэнергии. Обратимся к рис. 3.2, на котором приведена упрощенная схема ИМ с параллельным включением емкостного НЭ.

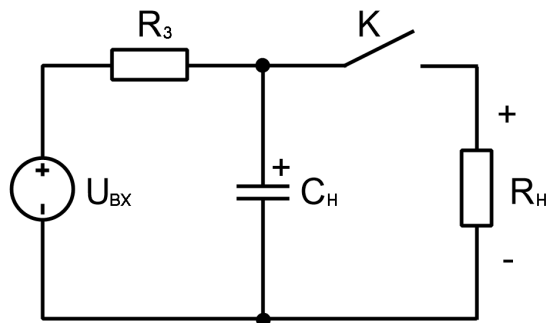


Рис. 3.2. Упрощенная схема ИМ с параллельным включением накопительного конденсатора

В схеме приняты следующие обозначения: $R_н$ – эквивалентное сопротивление УМ по постоянному току; $R_з$ – зарядное сопротивление, через которое осуществляется заряд накопительного конденсатора $C_н$; $U_{вх}$ – входное напряжение ИМ.

Работа схемы происходит следующим образом. При разомкнутом коммутаторе K в течение большей части периода следования импульсов конденсатор $C_н$ заряжается от источника напряжения $U_{вх}$ через зарядное сопротивление $R_з$. При замыкании коммутатора K происходит кратковременный разряд конденсатора $C_н$ через внутреннее сопротивление коммутатора K и сопротивление нагрузки $R_н$, вследствие чего в последней выделяется импульс тока.

Характер изменения напряжения u_C на накопительном конденсаторе показан на рис. 3.3. На рисунке U_{min} и U_{max} – минимальное и максимальное значения напряжения на конденсаторе соответственно, а ΔU_C – изменение напряжения на конденсаторе.

Напряжение на конденсаторе в момент окончания разряда составит

$$U_{\min} = U_{\max} \exp(-t_u/\tau_p), \quad (3.1)$$

где $\tau_p = R_n C_n$ – постоянная времени разряда. Чем меньше относительный спад напряжения $\gamma = \Delta U_C / U_{\max}$ (или изменение напряжения на конденсаторе), тем ближе форма импульса тока в нагрузке к прямоугольной.

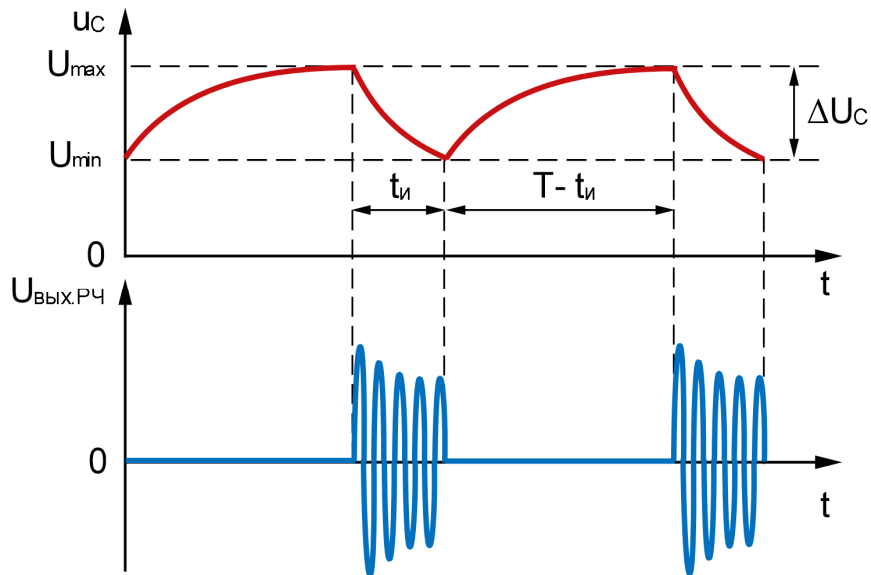


Рис. 3.3. Осциллограммы напряжений на накопителе и выходе УМ

После логарифмирования (3.1) получим

$$C_n \approx \frac{t_u}{R_n \gamma}. \quad (3.2)$$

Из выражения (3.2) видно, что значение емкости конденсатора C_n прямо пропорционально длительности импульса t_u и имеет близкую к обратной зависимость от спада напряжения. Это выражение является расчетным для определения необходимой емкости накопительного конденсатора. Отметим, что выражение (3.2) получено с учетом того, что во время разряда НЭ не происходит его заряда. Поэтому при использовании в качестве ЗУ стабилизирующих преобразователей напряжения, осуществляющих заряд НЭ во время его разряда, требования к емкости конденсатора C_n могут быть снижены (особенно при малой скважности импульсов).

При разработке радиолокационных РПДУ часто требуемое значение относительного спада напряжения электропитания УМ задают в пределах 1-5%. Однако столь жесткое требование обуславливает ухудшение массогабаритных характеристик НЭ. Особенно остро эта проблема проявляет себя при формировании длинных зондирующих радиоимпульсов (длительность превышает единицы миллисекунд).

Для обеспечения более плоской вершины модулирующего импульса напряжения электропитания вместо коммутатора может быть использован линейный или импульсный стабилизатор напряжения.

Такой стабилизатор, выполняя функции вывода и преобразования электроэнергии, накопленной в НЭ, по сути, стабилизирует на своем выходе напряжение разряда НЭ, то есть обеспечивает снижение спада плоской вершины формируемого импульса напряжения электропитания. Очевидно, таким образом обеспечивается и значительно больший (т.е. полный) разряд НЭ к концу формируемого импульса, что позволяет уменьшить емкость НЭ, а значит, его массу и габариты.

Описание лабораторного стенда

Схема соединений лабораторного стенда приведена на рис. 3.4. Стенд включает в себя:

- лабораторный макет для исследования импульсного модулятора с частичным разрядом накопителя (лабораторный макет №1);
- лабораторный макет для исследования импульсного модулятора с полным разрядом накопителя (лабораторный макет №2);
- блок питания Б5-47;
- амперметр Д5099;
- генератор РЧ АКИП-3210;
- генератор импульсов АКИП-3301;
- осциллограф АКИП-4115/1А;

- анализатор спектра АКИП-4205/1.

Все перечисленные средства измерений, генераторы и блок питания могут быть заменены другими, которые по своим функциональным возможностям, характеристикам и классу точности для соответствующих параметров не хуже указанных.

Подключение лабораторных макетов №1 и №2 к средствам измерения, генераторам и блоку питания одинаково.

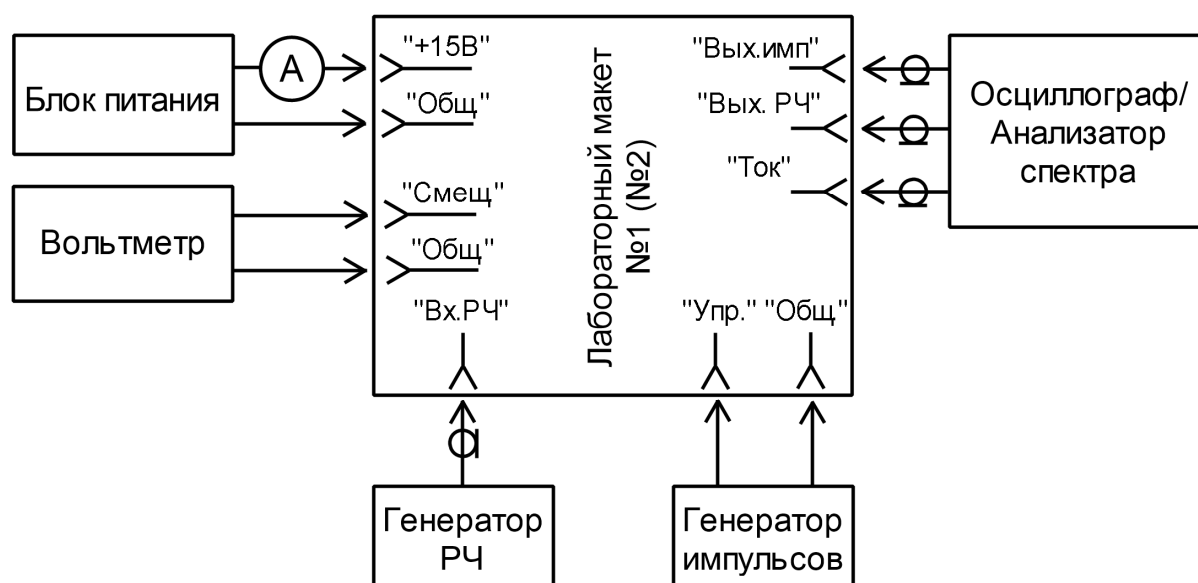


Рис. 3.4. Схема соединений лабораторного стенда

Лицевые панели лабораторных макетов №1 и №2 (рис. 3.5, 3.6) содержат их структурную схему, органы управления, индикации и гнезда для подключения средств измерения, генераторов и блока питания.

В лабораторном макете №1 предусмотрена возможность изменения емкости накопителя между 100 мкФ и 1000 мкФ (переключатель «Накопитель»). В лабораторном макете №2 емкость накопителя составляет 100 мкФ.

Для регулировки напряжения смещения УМ предусмотрен переменный резистор «Смещ.».

Процесс настройки УМ контролируется при помощи осциллографа путем наблюдения форм выходного тока усилительного транзистора (гнездо «Ток»)

и напряжения в нагрузке (гнездо «Вых.РЧ»). Форму напряжения электропитания УМ можно наблюдать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.имп.».

Мощность, потребляемая УМ от блока питания, контролируется при помощи амперметра и вольтметра, встроенного в блок. Пределы регулировки выходного напряжения блока питания должны составлять 15 ± 1 В, максимальный ток – 2 А.

Генератор импульсов обеспечивает подачу управляющих импульсов напряжения в модулятор. Временные параметры управляющих импульсов совпадают с соответствующими параметрами импульсов напряжения на выходе модулятора.

Принципиальная схема лабораторного макета №1 приведена на рис. 3.7

В основе макета – транзисторный однокаскадный УМ, рассмотренный в лабораторной работе №1. В стоковую цепь УМ включен коммутаторный импульсный модулятор с параллельным емкостным накопителем.

Заряд накопителя $C6$ ($C7$) осуществляется от блока питания через токоограничивающий резистор $R2$. Разряд накопителя $C6$ ($C7$) в нагрузку осуществляется при замыкании транзисторного ключа $VT4$.

Управление работой коммутатора – транзисторного ключа $VT4$ – осуществляется подачей импульсов от генератора, подключенного к гнездам «Упр.»-«Общ.». Таким образом осуществляется импульсная модуляция УМ по цепи стока.

В качестве нагрузки УМ используется резистор $R11$.

Принципиальная схема лабораторного макета №2 приведена на рис. 3.8.

Как и ранее, в основе макета – транзисторный однокаскадный УМ $A1$, рассмотренный в лабораторной работе №1. В стоковую цепь УМ включен импульсный модулятор с линейным регулятором напряжения в качестве разрядного устройства.

Разряд накопителя $C1$ в нагрузку осуществляется через линейный интегральный стабилизатор $DA1$. Разряд накопителя $C1$ в нагрузку осуществляется при замыкании транзисторного ключа $VT3$.

Управление работой коммутатора – транзисторного ключа $VT3$ – осуществляется подачей импульсов от генератора, подключенного к гнездам «Упр.»-«Общ.». Таким образом осуществляется импульсная модуляция УМ по цепи стока.

Методика выполнения работы

Изучите теоретические сведения, приведенные в настоящих методических указаниях, по теме лабораторной работы. В случае наличия неясных моментов проконсультируйтесь у преподавателя (лаборанта).

Ознакомьтесь со схемами лабораторного стенда и макетов, а также с размещением органов управления макетами. Изучите устройство и размещение органов настройки и регулировки измерительных приборов, генераторов и блока питания.

ВАЖНО! Перед началом работы в лаборатории изучите правила техники безопасности!

Выполнение работы осуществляется в соответствии со следующей методикой.

1. Исследование импульсного модулятора с частичным разрядом накопителя

1.1 Собрать лабораторный стенд, используя макет №1, в соответствии со схемой на рис. 3.4. Подключить к сети переменного тока 230 В 50 Гц измерительные приборы, генераторы и блок питания.

1.2 Не включая электропитания, перевести переключатель «Емкость» на лицевой панели лабораторного макета в положение «100 мкФ» для подключения накопителя емкостью 100 мкФ. Ручку переменного резистора «Смещ.» перевести в крайнее левое положение.

Выставить на генераторе РЧ частоту гармонического сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 1 В. Параметры управляющего сигнала на выходе генератора импульсов установить следующие: длительность импульса $t_u = 500$ мкс, период повторения $T = 5$ мс, амплитуда 5 В. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

1.3 Установить на блоке питания напряжение 15 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «15В» (положение «Вкл.»). При этом на лицевой панели макета загорится светодиодный индикатор.

1.4 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.» на лицевой панели макета, задать напряжение смещение $E_{см}$ для работы УМ в классе С в слабо перенапряженном режиме. Контролировать напряжение смещения с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Смещ.»-«Общ.», осциллограммы тока стока транзистора – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

1.5 Зафиксировать форму и спектр выходного сигнала УМ с помощью осциллографа и анализатора спектра, подключенных попеременно к гнезду «Вых.РЧ», а форму напряжения электропитания УМ – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.имп.». Измерить время переднего и заднего фронта радиоимпульса на выходе УМ. Рассчитать относительный спад напряжения электропитания γ (в %) и плоской вершины радиоимпульса ΔP (в дБ по мощности). Полученные данные занести в табл. 3.1.

1.6 Перевести тумблер «Емкость» на лицевой панели лабораторного макета в положение «1000 мкФ», что соответствует подключению накопителя емкостью 1000 мкФ. Выполнить п. 1.5.

1.7 Изменить временные параметры управляющих импульсов на следующие: длительность импульса $t_u = 2$ мс, период повторения $T = 5$ мс. Выполнить пп. 1.5 и 1.6.

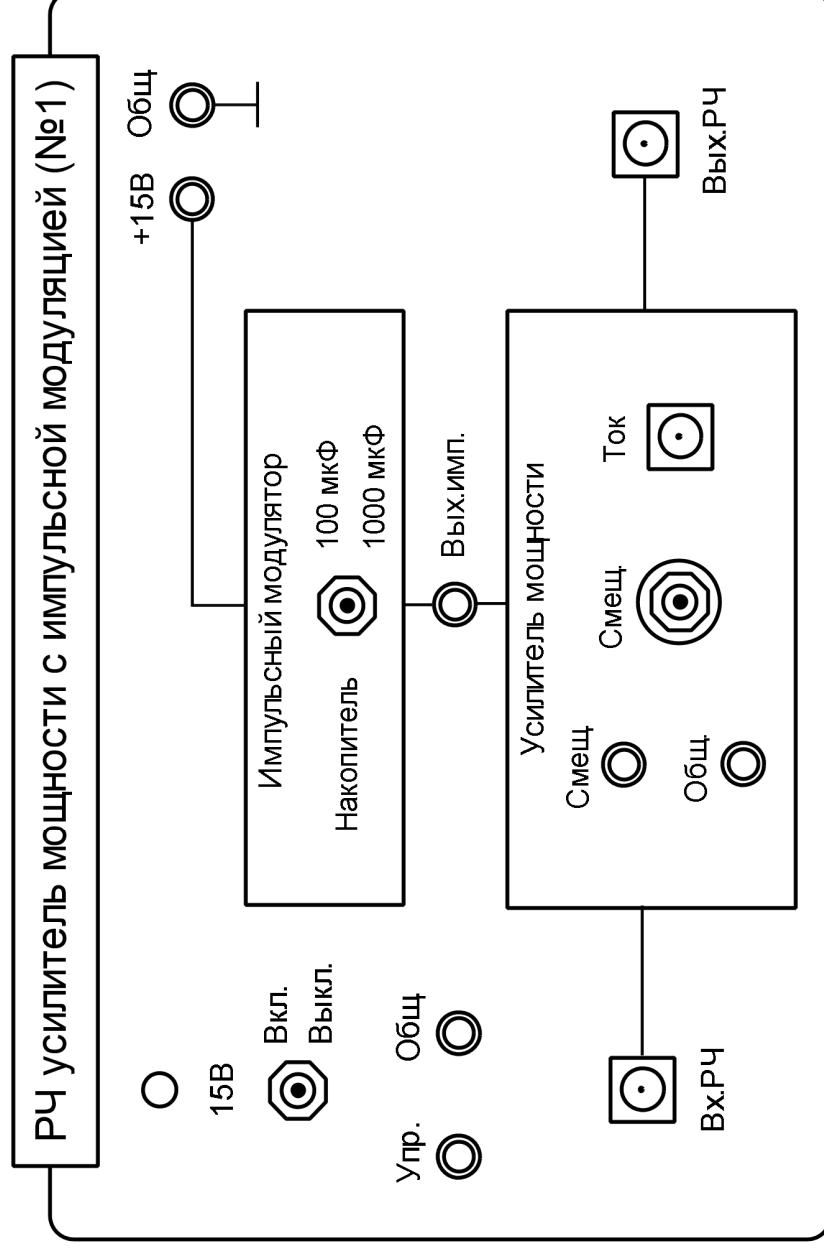


Рис. 3.5. Лицевая панель лабораторного макета №1

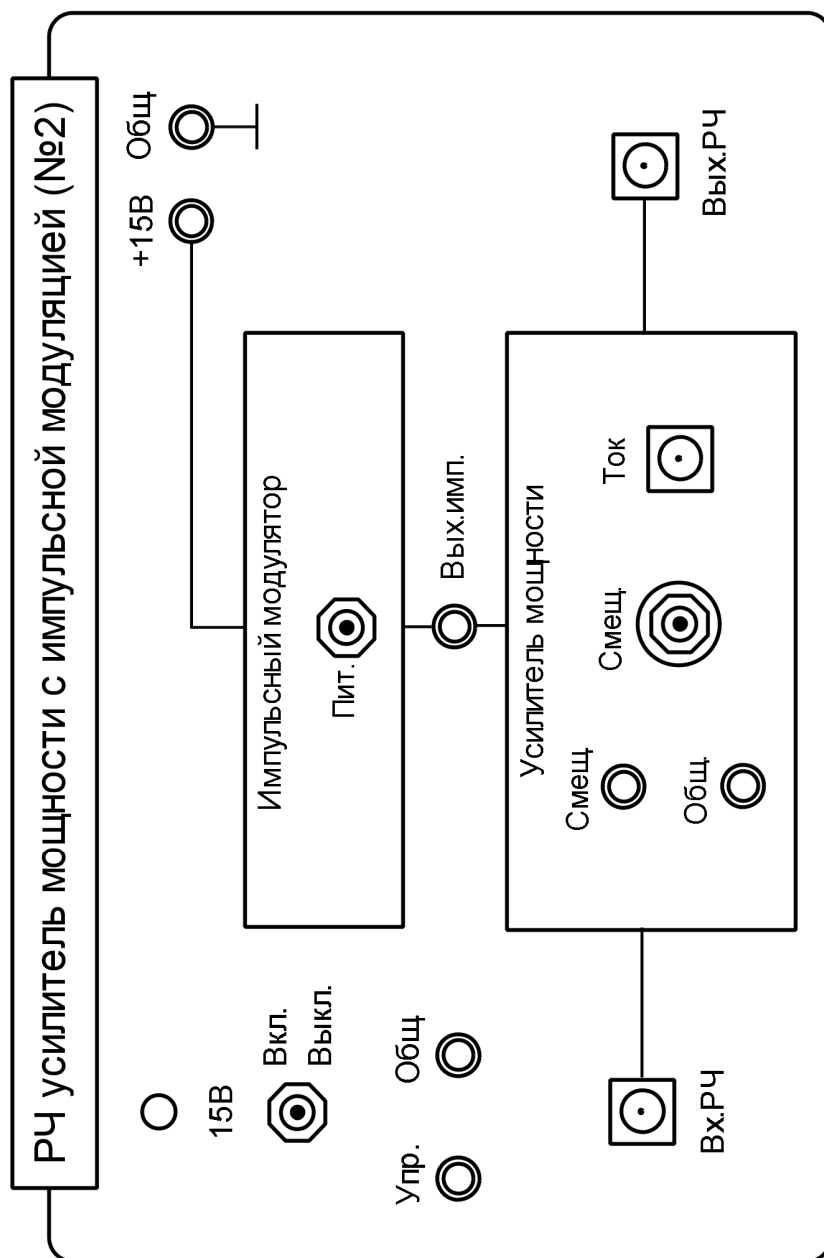


Рис. 3.6. Лицевая панель лабораторного макета №2

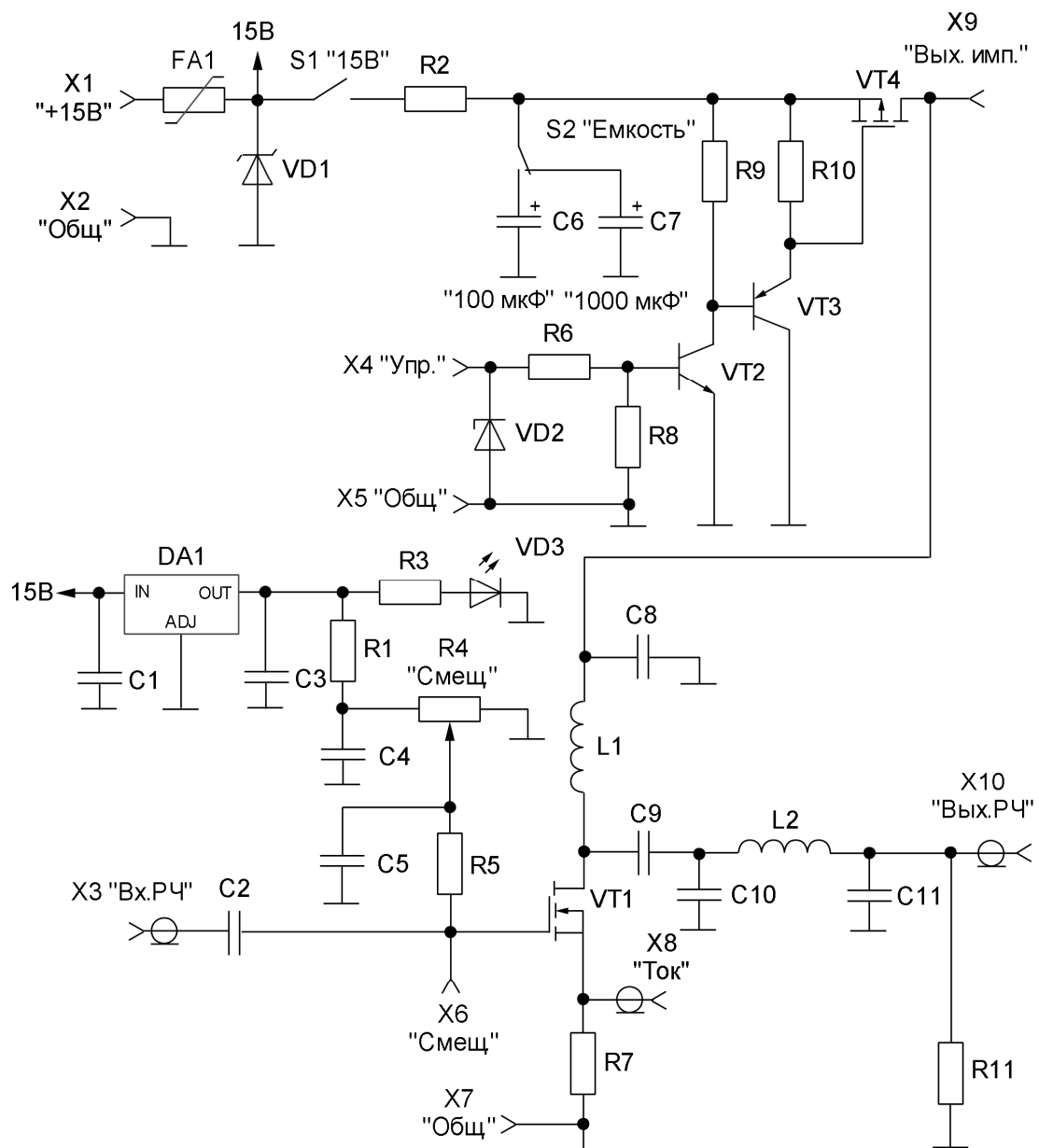


Рис. 3.7. Принципиальная схема лабораторного макета №1

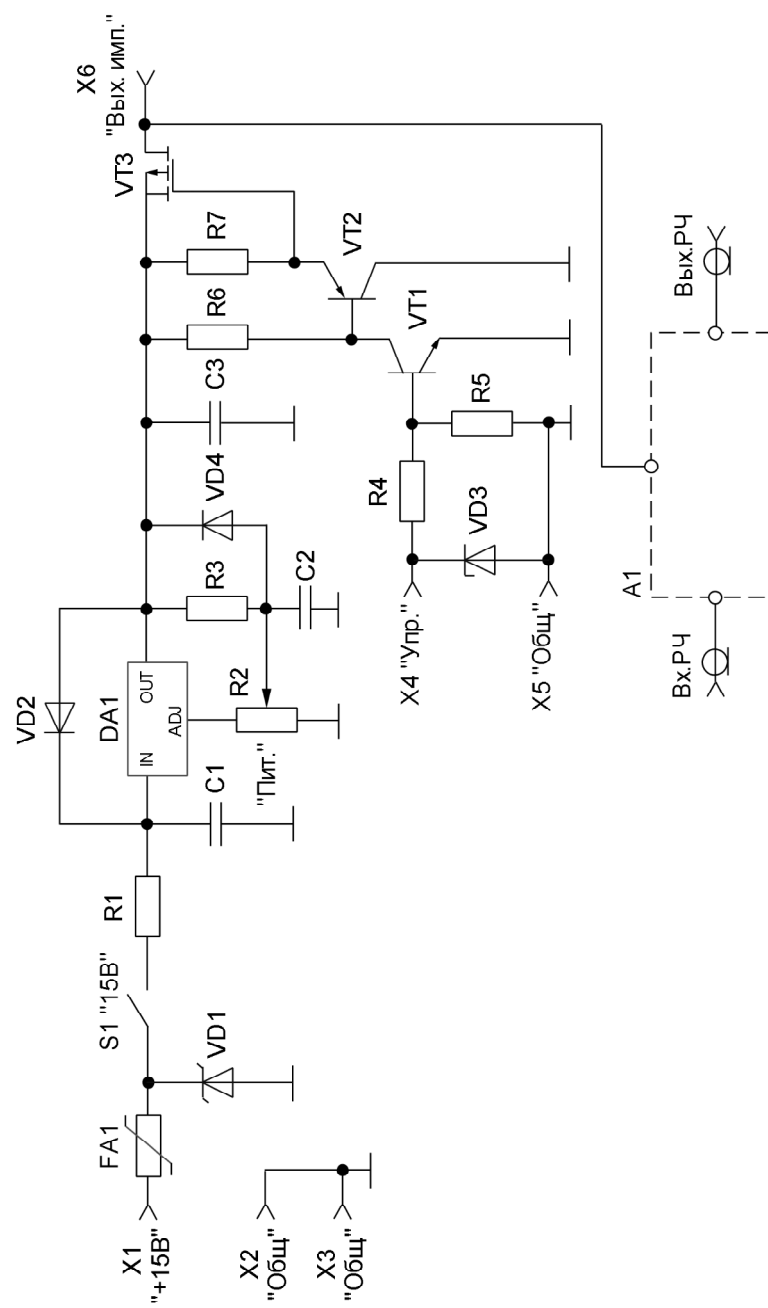


Табл. 3.1. Результаты измерений и расчетов

Параметры импульсов	C_n , мкФ	U_{ax} , В	ΔU_C , В	γ , %	ΔP , дБ
$t_u = 500$ мкс $T = 5$ мс	100	15			
	1000	15			
$t_u = 2$ мс $T = 5$ мс	100	15			
	1000	15			

1.8 Сравнить полученные значения относительного спада напряжения электропитания с рассчитанными по формуле (3.2).

1.9 Найти импульсную и среднюю мощность УМ, а также мощность, потребляемую от блока питания.

1.10 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «15В» в положение «Выкл.». При этом на лицевой панели макета светодиодный индикатор должен погаснуть.

2. Исследование импульсного модулятора с полным разрядом накопителя

2.1 Собрать лабораторный стенд, используя макет №2, в соответствии со схемой на рис. 3.4. Не включая электропитания, перевести ручку переменного резистора «Смещ.» в крайнее левое положение, а ручку переменного резистора «Пит.» – в крайнее правое положение.

Выставить на генераторе РЧ частоту гармонического сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 1 В. Параметры управляющего сигнала на выходе генератора импульсов установить следующие: длительность импульса $t_u = 500$ мкс, период повторения $T = 5$ мс, амплитуда импульсов 5 В. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

2.2 Установить на блоке питания напряжение 15 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «15В» (положение «Вкл.»). При этом на лицевой панели макета загорится светодиодный индикатор.

2.3 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.» на лицевой панели макета, задать напряжение смещение E_{cm} для работы УМ в классе С в слабо перенапряженном режиме. Контролировать напряжение смещения

с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Смещ.»-«Общ.», осциллограммы тока стока транзистора – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

2.4 Изменяя сопротивление переменного резистора «Пит.» на лицевой панели макета, задать амплитуду модулирующего импульса напряжения электропитания УМ таким образом, чтобы отсутствовал спад плоской вершины радиоимпульса. Напряжение электропитания УМ контролировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.имп.».

2.5 Зафиксировать форму и спектр выходного сигнала УМ с помощью осциллографа и анализатора спектра, подключенных попеременно к гнезду «Вых.РЧ», а форму напряжения электропитания УМ – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.имп.». Измерить время переднего и заднего фронта радиоимпульса на выходе УМ. Рассчитать относительный спад напряжения электропитания γ (в %) и плоской вершины радиоимпульса ΔP (в дБ по мощности). Полученные данные занести в табл. 3.1.

2.6 Изменить временные параметры управляющих импульсов на следующие: длительность импульса $t_u = 2$ мс, период повторения $T = 5$ мс. Выполнить пп. 2.4 и 2.5.

2.7 Найти импульсную и среднюю мощность УМ, а также мощность, потребляемую от блока питания.

2.8 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «15В» в положение «Выкл.». При этом на лицевой панели макета светодиодный индикатор должен погаснуть.

2.9 Отключить блок питания, генераторы и измерительные приборы от сети переменного тока 230 В 50 Гц и привести рабочее место в порядок. Доложить преподавателю (лаборанту) об окончании работы.

2.10 Сделать выводы и подготовить отчет по проделанной работе.

Требования к оформлению и содержанию отчета

Отчет о работе составляется в бумажном и электронном виде на стандартных листах формата А4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2017.

Отчет должен включать:

1. Идентификатор группы, фамилию студента, дату выполнения работы на титульном листе.
2. Название, цель и краткое содержание работы.
3. Структурную схему лабораторного стенда и перечень применяемого оборудования.
4. Принципиальную схему лабораторного макета.
5. Временные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.
6. Анализ результатов, оценку, обобщения и выводы по работе.
7. Список использованной литературы, приложения (при необходимости).
8. Ответы на вопросы и решения задач для подготовки к защите.
9. Место для подписи преподавателя (лаборанта).

Отчет по лабораторной работе должен быть составлен аккуратно и последовательно. Схемы должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД с применением специального программного обеспечения.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое импульсная модуляция? Какими способами она осуществляется в РПДУ?
2. Дайте определение импульсному модулятору. Приведите основные типы импульсных модуляторов.
3. Поясните принцип работы импульсного модулятора с емкостным накопителем. Приведите его преимущества и недостатки.
4. Какие требования предъявляют к импульсным модуляторам РПДУ?

5. Нарисуйте и объясните работу исследуемых схем УМ с импульсным модулятором, а также приведите временные диаграммы токов и напряжений в них.

6. Рассчитайте максимальную импульсную мощность, которую может отдать в нагрузку исследуемый в работе УМ. Была ли достигнута эта мощность в лабораторных макетах? Если нет, то почему?

7. В чем причина искажения огибающей формируемых радиоимпульсов на выходе исследуемых лабораторных макетов?

8. Приведите технические меры, направленные на уменьшение спада вершины модулирующих импульсов напряжения электропитания в импульсных модуляторах.

9. Разработайте в программах компьютерного моделирования Micro-Cap или Matlab Simulink модели исследуемых схем лабораторных макетов. Получите временные диаграммы, характеризующие работу моделей, и сравните их с полученными в результате проведения лабораторных исследований.