**Донской государственный технический университет**

# **Кафедра радиоэлектроники**

**Лабораторная работа № 4**

**Анализ характеристик сигналов**

**с импульсной модуляцией**

**Лабораторная работа № 4**

**Тема занятия: Анализ характеристик сигналов с импульсной модуляцией**

**Учебные вопросы:**

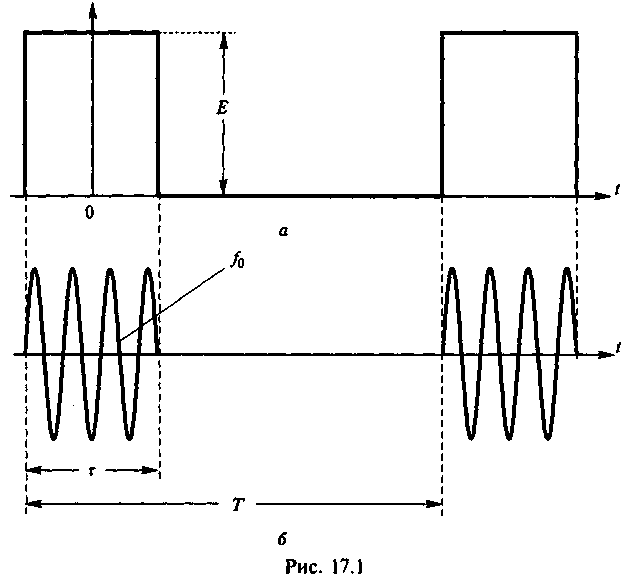
**1. Теоретический материал к лабораторной работе.**

**2. Практическая часть лабораторной работы.**

**1. Теоретический материал к лабораторной работе**

**1.1. Параметры и спектр сигнала при импульсной модуляции**

Импульсная модуляция (ИМ) широко используется в радиосистемах документальной электросвязи, при передаче телеметрической информации и в других случаях. Излучаемый РПДУ сигнал, модулированный последовательностью прямоугольных импульсов показан на рис. 1. Сигнал такого вида называют амплитудно-манипулированным сигналом. Спектр радиосигнала при такой модуляции достаточно широкий.



**Рис. 1. Излучаемый АМн сигнал**

Для такого ИМ сигнала определяют следующие параметры: τ - длительность импульса; Т - период повторения импульсов; q = Т/τ - скважность; f0 - частота несущей; Ри - мощность сигнала в импульсе; Рср=Ри(τ/Т) - средняя мощность сигнала; Δfcп - ширина спектра излучаемого сигнала; вид модуляции импульсов.

Раскроем содержание последнего параметра. Импульсы, модулирующие несущую частотой f0, могут быть, в свою очередь, сами промодулированы. **При этом различают:**

- амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ),

- широтно-импульсную модуляцию (ШИМ),

- временно-импульсную модуляцию (ВИМ),

- кодово-импульсную модуляцию (КИМ),

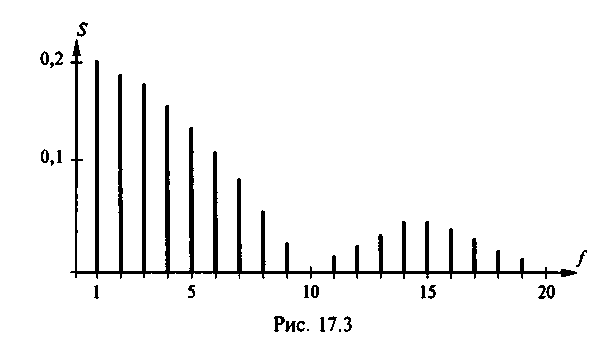
- внутриимпульсную модуляцию - частотную или фазовую.

**Спектр сигнала** при ИМ **определяется в два этапа**. **На первом этапе** определяется спектр периодической последовательности импульсов, модулирующих несущую; **на втором этапе** - спектр промодулированной импульсами несущей. При периодической последовательности прямоугольных импульсов (рис. 1, а) спектр можно получить, разложив функцию в ряд Фурье. В результате получим для амплитуд составляющих в этом спектре, следующих через интервалы Ω=2π/Т или F=1/Т:

, (l)

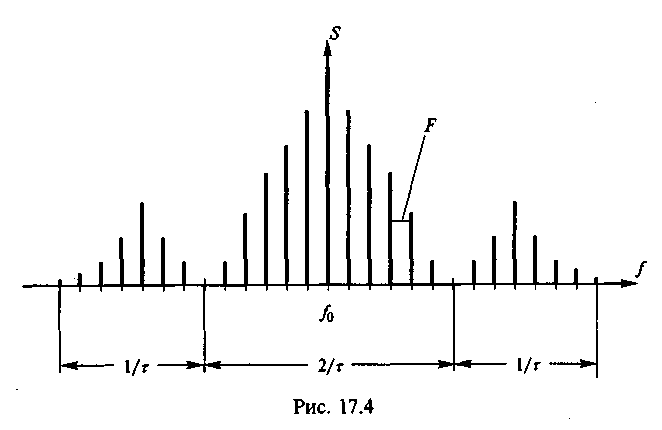
где Е - амплитуда импульса (рис. 1, a); k- целое положительное число.

**Пример расчёта** линейчатого спектра при ИM → Е=1, α=τ/Т=0,1, N=20 приведён на рис. 2. Из (1) и рассмотренного примера следует, что при Ω=2π/kτ или f= 1/kτ амплитуда Ak=0.



**Рис. 2. Пример расчёта линейчатого спектра сигнала при ИМ**

Спектр периодической последовательности радиоимпульсов (рис. 1, б) подобен спектру на рис. 2, но симметричен и смещён относительно начала координат на частоту несущей f0. Пример центральной части такого спектра представлен на рис. 3.

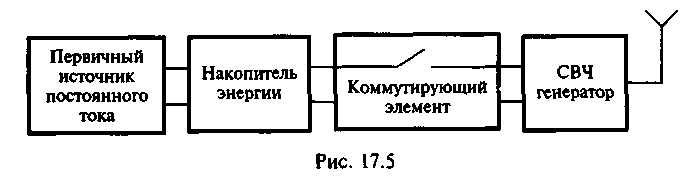


**Рис. 3. Пример центральной части спектра**

Теоретически ширина спектра рассматриваемого сигнала бесконечна. Однако большая часть его энергии сосредоточена в полосе Δfсп=6/τ (согласно рис. 3 принимается во внимание основной и по два с каждой стороны боковых «лепестка» спектра).

**1.2. Структурная схема и классификация импульсных модуляторов**

Радиопередатчики в импульсе могут излучать очень большую мощность - в десятки и даже сотни мегаватт. Поскольку, однако, эти импульсы излучаются с большой скважностью q, то, используя принцип накопления энергии в паузе между импульсами, мощность первичного источника можно понизить в то же число q раз. Структурная схема такого импульсного модулятора приведена на рис. 4.



**Рис. 4. Структурная схема импульсного модулятора**

Мощность первичного источника постоянного тока:

, (2)

где Р1имп - мощность СВЧ генератора в импульсе; ηг - КПД генератора.

**Пример.** Мощность СВЧ радиопередатчика в импульсе Р1имп=1 МВт, скважность q=1000, η=50%. Согласно (2) требуемая мощность первичного источника постоянного тока: Р0=2 кВт.

Классификация импульсных модуляторов осуществляется по двум признакам:

- типу накопительного элемента;

- виду коммутирующего устройства.

Возможны три типа накопительных элементов:

ёмкостного, индуктивного и смешанного вида.

Коммутирующие устройства подразделяются: на жёсткого типа (электровакуумные лампы и высоковольтные транзисторы) и мягкого типа (тиратроны и тиристоры - кремниевые управляемые вентили).

В импульсных модуляторах жёсткого типа длительность сформированного импульса определяется длительностью входного импульса. В импульсных модуляторах мягкого типа входной импульс определяет только начало формируемого импульса, длительность которого определяется параметрами накопительного элемента.

**1.3. Импульсный модулятор жёсткого типа с ёмкостным**

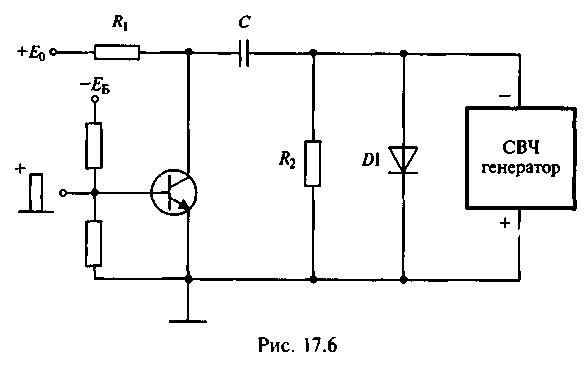
**накопительным элементом**

Схема такого модулятора приведена на рис. 5. Работа схемы распадается на две фазы.

**1-я фаза.** Ключ - высоковольтный транзистор - закрыт за счёт отрицательного напряжения, поданного на базу; протекает процесс заряда высоковольтного конденсатора С (рис. 6, а) по экспоненциальному закону:

, (3)

где Тзар=(R1+R2)C - постоянная времени цепи заряда; Е0 - напряжение источника питания; t<Т - текущее время.



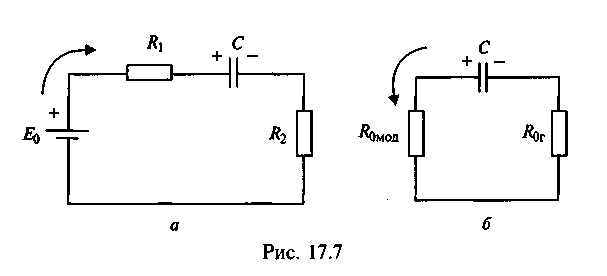
**Рис. 5. Схема импульсного модулятора жесткого типа с**

**ёмкостным накопительным элементом**

**2-я фаза**. По истечении времени Т - периода повторения импульсов - на вход схемы приходит импульс положительной полярности, открывающий транзисторный ключ, вследствие чего к СВЧ генератору прикладывается положительное напряжение Е0, до которого успел зарядиться конденсатор. Начинается разряд конденсатора через транзистор и СВЧ генератор (рис. 6, б) по закону:

, (4)

где Тр=(Rмод+Roг)C- постоянная времени цепи разряда, где Rмод, Roг - сопротивления ключа и генератора по постоянному току.

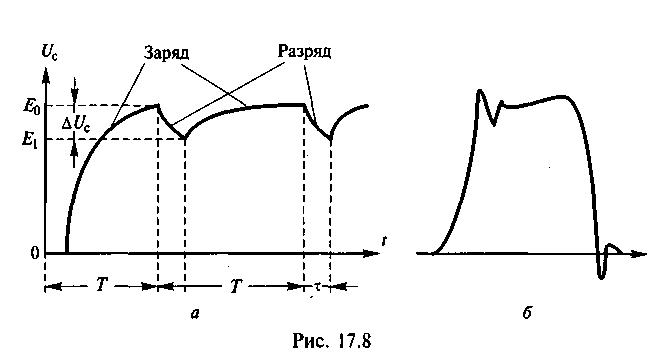


**Рис. 6. Эквивалентная схема ИМ жёсткого типа с ёмкостным**

**накопительным элементом**

Время разряда определяется длительностью импульса τ, после чего ключ закрывается и вновь повторяется 1-я фаза процесса - заряд конденсатора. Графики, отображающие описанный процесс заряда и разряда конденсатора С, приведены на рис. 7, а. Постоянную времени цепи заряда Тзар. определим из условия: за время Т конденсатор должен успеть зарядиться до напряжения источника постоянного напряжения Е0. Для его выполнения согласно (3) следует иметь (Т/Тзар≥3). Постоянную времени цепи разряда Тр определим из условия: за время τ (длительности импульса - напряжение на конденсаторе, приложенное к СВЧ генератору, должно уменьшится не более чем на ΔUC=Е0–Е1 – (рис. 7, а). При ΔUC/Е0 <1 из (4) получим:

. (5)



**Рис. 7. Графики, отображающие процесс заряда и разряда конденсатора в ИМ жёсткого типа с ёмкостным накопительным элементом**

Значение ΔUC определяется режимом работы электронного прибора в СВЧ генераторе.

Поскольку в ИМ осуществляется коммутация больших значений токов, то при переключении, т.е. переходе из 1-й фазы работы во 2-ю и обратно, возникает переходный колебательный процесс (рис. 7, б). Для его ослабления в схему (рис. 5) включается диод Д1, гасящий возникающие колебания. КПД модулятора определяется как отношение энергии, отдаваемой конденсатором во время разряда WС (2-я фаза), к энергии, идущей на заряд конденсатора WС+WR (1-я фаза), где WR - энергия, расходуемая в сопротивлениях:

. (6)

**Пример.** Длительность импульса τ=1 мкс=10–6 с; период повторения импульсов Т=1 мс=10–3 с; сопротивления: Rмод=2 Ом, R0г=100 Ом. Допустимое изменение напряжения ΔUC/E0=5%. Согласно (5) для постоянной времени цепи разряда получим: Тр=1/0,05=20 мкс.

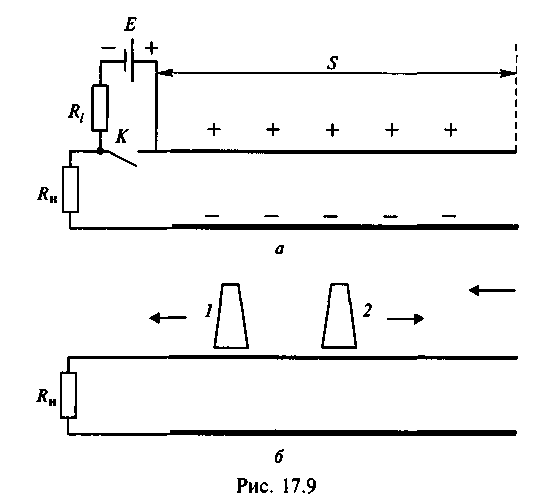
Ёмкость С=Тр/(Rмод+R0г)=20⋅10–6/102=2⋅10–7Ф=0,2 мкФ.

Постоянная времени цепи заряда Тз=0,2⋅Т=0,2⋅10–3 с.

Сопротивления: (R1+R2)=Тз/C=0,2⋅10–3/0,2⋅10–6=1000 Ом=1 кОм. (время измеряется в секундах, ёмкость - в фарадах, сопротивление - в омах). Согласно (6) КПД модулятора составляет 97,5%.

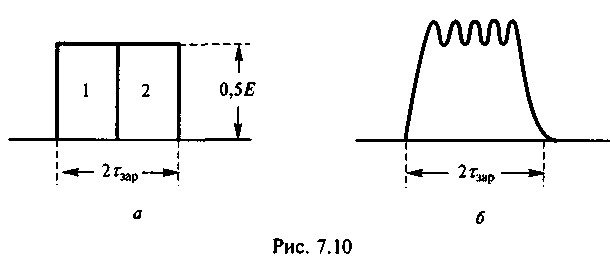
**1.4. Импульсный модулятор мягкого типа с искусственной линией**

Принцип действия данного модулятора основан на формировании импульса прямоугольной формы с помощью длинной или искусственной линии. Пусть линия длиной S с волновым сопротивлением ρ при разомкнутом ключе К заряжена до напряжения Е (рис. 8,а). После замыкания ключа на сопротивление нагрузки Rн=ρ начнётся разряд линии. При этом в линии образуется две волны, одна из которых с амплитудой Uн1=0,5Е со скоростью V начнется двигаться влево (1-я волна); другая волна той же амплитуды с той же скоростью (2-я волна) - вправо (рис. 8,б). Первая волна, достигнув сопротивления Rн=ρ, будет им поглощена, образуя импульс амплитудой Uн1=0,5Е и длительностью τ3=S/V (рис. 9,а).



**Рис. 8. Принцип действия ИМ мягкого типа с искусственной линией**

Вторая волна, достигнув разомкнутого конца линии, полностью от него отразится, поскольку в этом случае коэффициент отражения Г=1. После отражения, начав двигаться влево, вторая волна, как и первая, достигнув с задержкой на время τ3 сопротивления нагрузки Rн=ρ, также будет им поглощена, вновь сформировав импульс амплитудой Uн1=0,5Е и длительностью τ3. Таким образом, за счет обеих волн на нагрузке Rн=ρ будет сформирован импульс амплитудой Uн1=0,5Е и длительностью τ=2τ3=2S/V (рис. 9,а).



**Рис. 9. Процесс формирования импульса в ИМ мягкого типа с искусственной линией**

Обратимся к схеме ИМ, в которой длинная линия заменена искусственной или линией задержки, составленной из L и С элементов (рис. 10). Такая линия задержки характеризуется волновым сопротивлением:

, (7)

и временем задержки:

, (8)

где n - число LC ячеек.

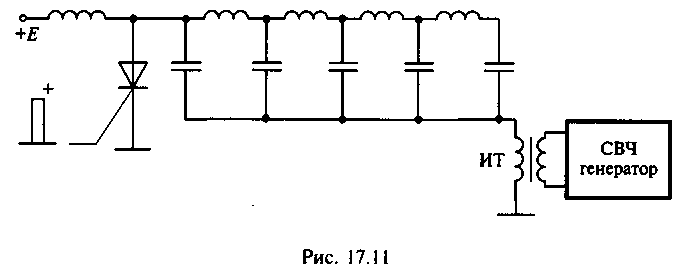
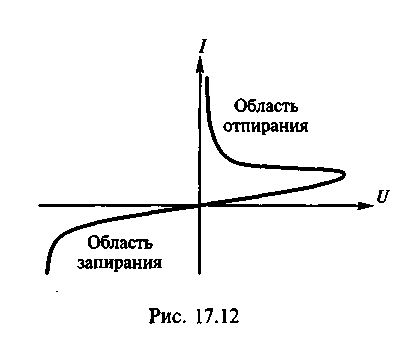


Рис. 10. Схема ИМ, в котором длинная линия заменена

искусственной линией задержки

Роль электронного ключа в схеме выполняет тиристор. Характеристика тиристора, имеющего второе название - кремниевый управляемый вентиль (КУВ), приведена на рис. 11. В зону отпирания с большим током и малым



**Рис. 11. ВАХ тиристора**

падением напряжения всего в несколько вольт тиристор переходит только после подачи положительного импульса на управляющий электрод. В область запирания тиристор переходит после снятия с него основного напряжения. В целом схема ИМ (рис. 10) работает согласно принципу, рассмотренному при анализе длинной линии (рис. 8). После подачи положительного импульса на управляющий электрод электронный ключ - тиристор - замыкается и начинается разряд искусственной линии, длящийся 2τ3, где τ3 определяется согласно (8). После полного разряда линии тиристор переходит в закрытое состояние и начинается заряд искусственной линии от источника напряжением Е. После прихода следующего импульса на управляющий электрод весь процесс повторяется. Таким образом, в модуляторе (рис. 10) с помощью искусственной линии формируется импульс длительностью τ=2τ3 и напряжением 0,5Е (рис. 9,а).

В реальной схеме сформированный импульс имеет вид, представленный на рис. 9,б: в нём появляются фронты, а на плоскую часть накладывается, синусоидальный сигнал, зависящий от числа ячеек в линии.

Энергия, запасаемая линией при её заряде: Wл=0,5nСЕ2.

Энергия, расходуемая линией при разряде: Wр=Риτ=2Риτ3, где Ри - мощность импульса.

Из равенства Wл=Wр, с учётом (7) и (8), для напряжения питания получим: . (9)

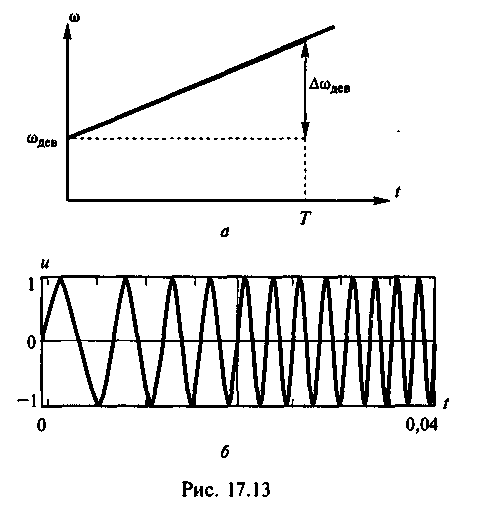
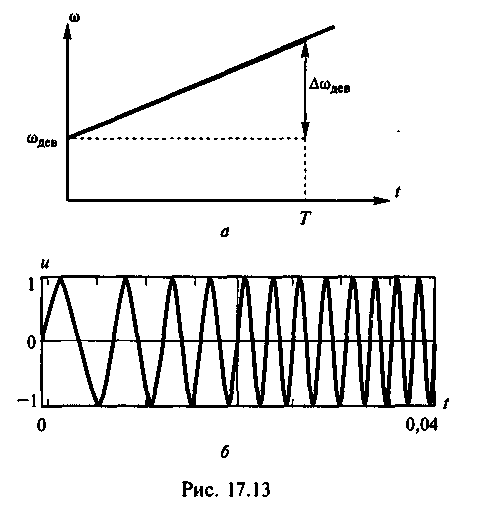
С помощью импульсного трансформатора (ИТ) напряжение в линии (Uл=0,5Е повышается до значения, необходимого для СВЧ генератора (рис.10).

**Пример.** Определить требуемые параметры искусственной линии в схеме ИМ (рис. 10) при длительности импульса τ=2 мкс и мощности Ри=10 кВт. Примем для одной ячейки L=10 мкГн, С=1000 пФ. Согласно (7) для волнового сопротивления линии получим: ρ=100 Ом. Из (8) с учётом τзар=0,5τ определим требуемое число ячеек линии: n=10. Для напряжения источника питания согласно (9) получим Е=2 кВ.

**1.5. Внутриимпульсная частотная модуляция**

В радиолокации для получения высокой разрешающей способности и большой дальности применяют сжатие сигнала в радиоприёмнике путём внутриимпульсной частотной и фазовой модуляции излучаемого радиопередатчиком сигнала. Одним из таких способов внутриимпульсной модуляции является изменение частоты сигнала по линейному закону (рис. 12,а): , (10)

где Δωдев - девиация частоты; Т - длительность линейного ЧМ (ЛЧМ) сигнала.



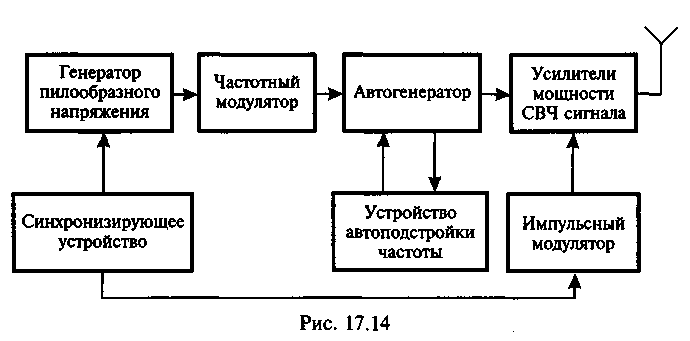
**Рис. 12. ЛЧМ сигнал**

Параметр m=ΔfдевТ, называемый базой сигнала, показывает, во сколько раз можно сжать по времени ЛЧМ сигнал на приёмной стороне радиолинии по сравнению с передающей. Для ЛЧМ сигнала (рис. 12,б) с учётом (10) имеем:

 (11)

т.е. фаза меняется по квадратичному закону.

В РПДУ процесс ИМ и ЧМ следует синхронизировать. Структурная схема РПДУ при этом может иметь вид, показанный на рис. 13.



**Рис. 13. Структурная схема РПДУ ИМ и ЧМ с синхронизацией ИМ и ЧМ**

В схеме ЛЧМ сигнал формируется посредством генератора пилообразного напряжения, изменяющего частоту автогенератора по линейному закону. Стабилизация частоты автогенератора осуществляется устройством АПЧ. С помощью синхронизирующего устройства изменение частоты автогенератора начинается в момент подачи импульса на СВЧ усилитель мощности.

**Выводы по материалу**

1. В системах документальной электросвязи для получения большой дальности применяют сжатие сигнала путём внутриимпульсной частотной и фазовой модуляции излучаемого радиопередатчиком сигнала. Одним из таких способов внутриимпульсной модуляции является изменение частоты сигнала по линейному закону.

**2. Практическая часть лабораторной работы**

**В соответствии с номером учебного расчёта решить следующие практические задачи и ответить на контрольные вопросы:**

**Задача 1.** Рассчитать и построить графически линейчатый спектр амплитудно-манипулированного сигнала для следующих исходных данных:

Е=1; q=5; N=10; F=100 Гц; f0=100 кГц.

**Задача 2.** Рассчитать требуемую мощностьисточника постоянного тока СВЧ радиопередатчика для следующих исходных данных: Р1имп=10 МВт; q=100, η=20%.

**Задача 3.** Рассчитать постоянную времени цепи разряда и заряда схемы ИМ жёсткого типа с ёмкостным накопительным элементом для следующих исходных данных:

Длительность импульса τ=10 мкс=10–5 с; период повторения импульсов Т=5 мс=510–3 с; сопротивления: Rмод=4 Ом, R0г=100 Ом. Допустимое изменение напряжения ΔUC/E0=5%.



**Задача 4.** Определить требуемое число ячеек искусственной линии и напряжение источника питания для импульсного модулятора мягкого типа при длительности импульса τ=4 мкс и мощности Ри=1 кВт. Принять для одной ячейки L=20 мкГн, С=500 пФ; τзар=0,5τ.

**Задача 5.** Рассчитать и построить графически линейчатый спектр амплитудно-манипулированного сигнала для следующих исходных данных:

Е=1; q=4; N=20; F=1000 Гц; f0=100 МГц.

**Задача 6.** Рассчитать требуемую мощностьисточника постоянного тока СВЧ радиопередатчика для следующих исходных данных: Р1имп=20 МВт; q=200, η=25%.

**Задача 7.** Рассчитать постоянную времени цепи разряда и заряда схемы ИМ жёсткого типа с ёмкостным накопительным элементом для следующих исходных данных:

Длительность импульса τ=20 мкс=210–5 с; период повторения импульсов Т=2 мс=210–3 с; сопротивления: Rмод=2 Ом, R0г=200 Ом. Допустимое изменение напряжения ΔUC/E0=4%.



**Задача 8.** Определить требуемое число ячеек искусственной линии и напряжение источника питания для импульсного модулятора мягкого типа при длительности импульса τ=5 мкс и мощности Ри=10 кВт. Принять для одной ячейки L=10 мкГн, С=200 пФ; τзар=0,5τ.

**Задача 9.** Рассчитать и построить графически линейчатый спектр амплитудно-манипулированного сигнала для следующих исходных данных:

Е=1; q=10; N=20; F=2000 Гц; f0=50 МГц.

**Задача 10.** Рассчитать требуемую мощностьисточника постоянного тока СВЧ радиопередатчика для следующих исходных данных: Р1имп=50 МВт; q=500, η=10%.

**Задача 11.** Рассчитать постоянную времени цепи разряда и заряда схемы ИМ жёсткого типа с ёмкостным накопительным элементом для следующих исходных данных:

Длительность импульса τ=25 мкс=2510–6 с; период повторения импульсов Т=4 мс=410–3 с; сопротивления: Rмод=5 Ом, R0г=500 Ом. Допустимое изменение напряжения ΔUC/E0=10%.



**Задача 12.** Определить требуемое число ячеек искусственной линии и напряжение источника питания для импульсного модулятора мягкого типа при длительности импульса τ=10 мкс и мощности Ри=20 кВт. Принять для одной ячейки L=20 мкГн, С=100 пФ; τзар=0,5τ.

**Задача 13.** Ответить на контрольные вопросы по материалу занятия.

**Контрольные вопросы:**

1. Как выглядит сигнал при импульсной модуляции? Что такое скважность?

2. Какой спектр имеет радиосигнал при импульсной модуляции? Какова ширина спектра излучаемого сигнала?

3. Нарисуйте обобщённую структурную схему импульсного модулятора.

4. Как работает модулятор с ёмкостным накопительным элементом?

5. Как работает импульсный модулятор с искусственной линией?

6. Зачем применяется внутриимпульсная частотная модуляция?

7. По какому закону меняется фаза ЛЧМ сигнала?