

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В.И.Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)

Кафедра теоретических основ радиотехники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА РАДИОИЗМЕРЕНИЙ”

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Санкт-Петербург

2012 г.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В работе изучаются методы исследования спектров узкополосных амплитудно-модулированных (АМ) колебаний и спектров периодических последовательностей прямоугольных видеоимпульсов.

4.1. Краткие сведения о спектрах исследуемых сигналов

Для периодических сигналов используют спектральное представление сигнала в виде *ряда Фурье*:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n\right),$$

где T – период повторения сигнала ($u(t \pm kT) = u(t)$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$), U_0 – постоянная составляющая (среднее значение сигнала), U_n и φ_n – амплитуда и фаза n -й гармоники спектра, $f_1 = 1/T$ – частота первой гармоники.

Ряд представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Последовательность $\{U_n\}$ называют *амплитудным спектром*, последовательность $\{\varphi_n\}$ – *фазовым спектром*. Практический интерес представляет измерение амплитудного спектра, то есть множество амплитуд гармоник и их частот. Составляющая с нулевой частотой U_0 является постоянной составляющей сигнала – ее измеряют вольтметрами постоянного тока.

Амплитудно-модулированное колебание с гармонической (тональной) модуляцией описывается выражением

$$U(t) = U_m [1 + M \cos(2\pi F t + \gamma)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi) = U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi) + \dots \\ \dots + \frac{U_m M}{2} \cos[2\pi (f_0 + F)t + \varphi + \gamma] + \frac{U_m M}{2} \cos[2\pi (f_0 - F)t + \varphi - \gamma] \quad , (4.1)$$

Здесь U_m – амплитуда несущего колебания; F – частота модуляции; f_0 – несущая частота; φ и γ – начальные фазы несущего и модулирующего колебаний соответственно. Из выражения (4.1) следует, что спектр АМ-

колебания с тональной модуляцией содержит три гармоники с частотами f_0 и $f_0 \pm F$.

Амплитудный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов с длительностью τ , периодом повторения T и амплитудой U_m определяется соотношением

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \left| \sin(n\pi \frac{\tau}{T}) / (n\pi \frac{\tau}{T}) \right|, \quad U_0 = U_m \tau / T \quad (4.2)$$

Часто используют графическую форму представления спектра сигнала в виде вертикальных линий, высота которых равна амплитуде гармоники, а расположение по оси X – частоте (Рис.4.1).

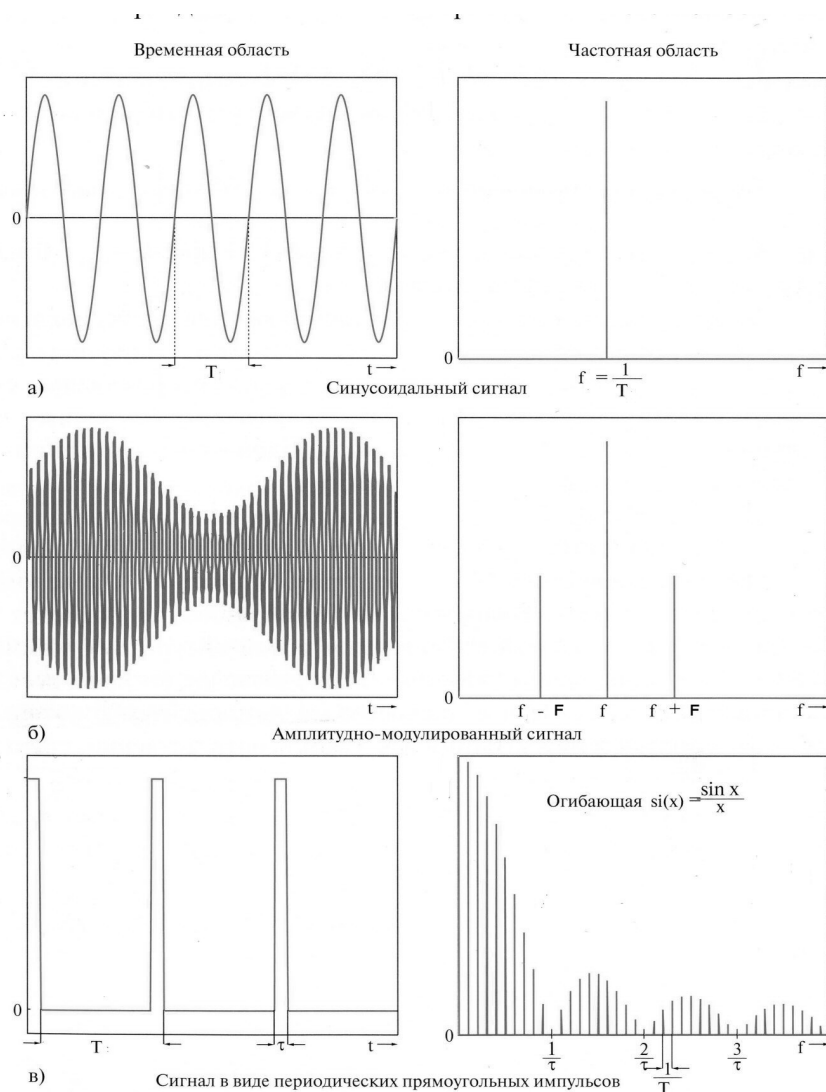


Рис. 4.1. Графическое представление спектров периодических сигналов

Задача спектрального анализа периодических сигналов - определение амплитуд и частот их гармонических составляющих. Фазовый спектр для реальных сигналов обычно связан с амплитудным, поэтому, учитывая сложности фазовых измерений, ограничиваются измерением амплитудного спектра.

Исследование спектров периодических сигналов проводят анализатором спектра (АС). В радиоизмерениях наиболее распространены АС последовательного типа с панорамным принципом индикации. Принцип действия таких приборов напоминает принцип действия супергетеродинного радиоприемника. АС последовательно перестраивается по частоте в пределах установленной полосы обзора (*полосы анализа* Δf_a). При совпадении настройки АС с частотой каждой гармоники она отображается на экране прибора в виде кратковременного импульса. Этот импульс является откликом АС на воздействие соответствующей гармонической составляющей сигнала; его величина соответствует амплитуде гармоники, форма – виду АЧХ усилителя промежуточной частоты прибора. Момент времени, когда импульс появляется на экране, зависит от частоты гармоники. То есть ось Х осциллографического индикатора представляет собой ось частот входного сигнала. Управление перестройкой частоты АС производится генератором пилообразного напряжения $U_p(t)$. Он задает *время анализа* T_a , то есть время, за которое анализатор сканирует полосу анализа Δf_a . Этим же напряжением производят горизонтальное отклонение луча осциллографического индикатора. Изображение совокупности откликов на каждую гармоническую составляющую входного сигнала называют *спектрограммой*. Величины откликов пропорциональны амплитудам входных гармоник, расположение откликов на оси Х соответствует частотам гармонических составляющих входного сигнала. Таким образом, на экране АС получается изображение, позволяющее наглядно представить вид спектра и оценить его количественные характеристики.

Рассмотрим условия *неискаженного воспроизведения спектрограммы*. Ширина отклика определяется, в основном, шириной полосы пропускания фильтра АС Δf_{ϕ} . При анализе спектров может возникнуть ситуация, когда близко расположенные гармонические составляющие сигнала будут создавать отклики, сливающиеся на спектрограмме. Такое искажение говорит о недостаточной *разрешающей способности анализатора спектра* Δf_p , которая приближенно равна полосе пропускания фильтра АС. Поскольку расстояние между соседними гармониками спектра равно частоте повторения сигнала $f_1 = 1/T$, то при $f_1 > \Delta f_p$ составляющие спектра наблюдаются на экране АС отдельно (разрешаются). При $f_1 < \Delta f_p$ они сливаются (не разрешаются). В последнем случае о спектре можно судить лишь по его огибающей.

Отклик повторяет форму АЧХ фильтра АС только в статическом режиме, когда изменение частоты происходит медленно по сравнению со скоростью переходных процессов в фильтре. На практике приходится учитывать искажение отклика при сравнительно быстром изменении частоты (рис.4.2). При этом отклик расширяется (динамические искажения) и ухудшается разрешающая способность АС ($\Delta f_p \gg \Delta f_{\phi}$)

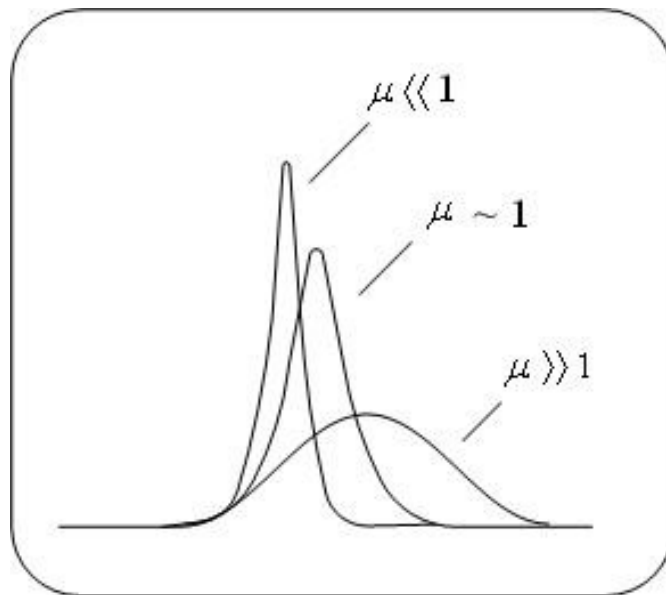


Рис. 4.2. Динамические искажения спектрограммы одной гармоники сигнала

Степень искажений описывают *коэффициентом динамических искажений* μ , который равен отношению постоянной времени фильтра τ_ϕ к времени τ_0 пребывания частоты в пределах полосы пропускания фильтра

$\mu = \frac{\tau_\phi}{\tau_0}$. Постоянную времени можно оценить через полосу пропускания Δf_ϕ

фильтра $\tau_\phi \approx \frac{1}{\Delta f_\phi}$. Время пребывания τ_0 рассчитывается через скорость

изменения частоты ГКЧ $\nu_f = \frac{\Delta f_a}{T_a}$ и полосу фильтра АС Δf_ϕ :

$$\tau_0 = \frac{\Delta f_\phi}{\nu_f} = \frac{\Delta f_\phi T_a}{\Delta f_a} = \Delta f_\phi \frac{V_p}{M_\chi}.$$

Здесь Δf_a - полоса анализа (обзора), Гц; V_p - скорость развертки, с/дел.; M_χ - частотный масштаб на экране, Гц/ дел. Коэффициент динамических искажений тогда равен:

$$\mu = \frac{\Delta f_a}{(\Delta f_\phi)^2 T_a} = M_\chi / (V_p \Delta f_\phi^2). \quad (4.3)$$

Считают приемлемым режим работы анализатора с $\mu \leq 1$. Отсюда вытекает условие получения неискаженной спектрограммы, связывающее время анализа, полосу анализа и полосу пропускания АС:

$$T_a \geq \frac{\Delta f_a}{(\Delta f_{\text{УПЧ}})^2}. \quad (4.4)$$

Расчет по формуле показывает, что при широкой полосе анализа и узкой полосе пропускания требуемое время анализа может достигать десятков и сотен секунд. Поэтому часто приходится устанавливать полосу обзора и полосу пропускания фильтра АС, исходя из компромисса. Для использования большого времени анализа применяют запоминающие осциллографические трубки, а полоса пропускания делается регулируемой. Это позволяет подобрать оптимальное соотношение между временем анализа и формой отклика спектроанализатора. Динамические искажения могут также возникать за счет инерционности видеофильтра АС. Оцениваются эти искажения аналогично приведенным выше, однако под Δf_{ϕ} в выражениях следует понимать полосу пропускания видеофильтра. Полосу частот видеофильтра делают регулируемой и подбирают для устранения этих искажений

Важное условие получения неискаженной спектрограммы – неизменность спектра сигнала за время анализа. Иными словами, в процессе сканирования спектр сигнала не должен меняться. Это соответствует случаю, когда период сигнала мал по сравнению со временем анализа $T \ll T_a$. При большом периоде (большой скважности импульсов) на экране спектроанализатора получается последовательность отдельных реакций на каждый импульс. В случае исследования спектра импульсных сигналов малой длительности и большой скважности ($\tau_{\text{и}} \ll T$) период сигнала соизмерим со временем анализа, а спектральная плотность импульса примерно постоянна в пределах полосы пропускания фильтра АС. Тогда процессы в узкополосном фильтре можно рассматривать как воздействие на

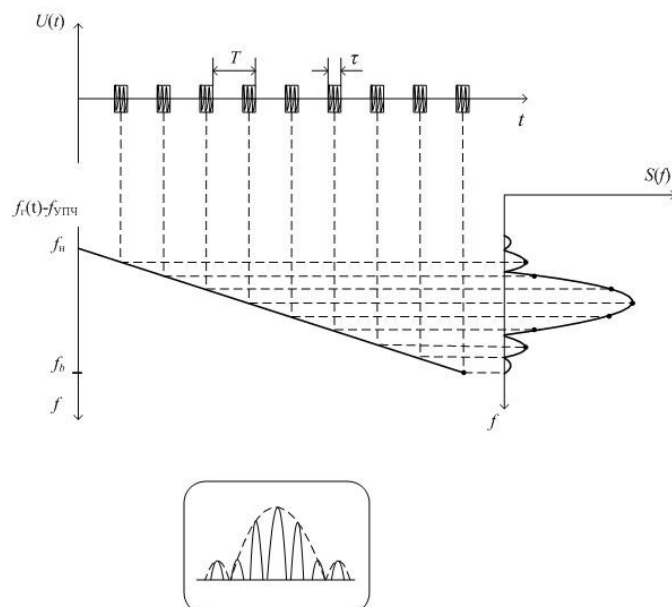


Рис. 4.3. Спектральный анализ импульсов с большой скважностью.

него одиночных импульсов, описываемых спектральной функцией $S(f)$ (рис.4.3):

Каждому входному импульсу соответствует отклик на экране спектроанализатора. Поскольку в пределах полосы пропускания спектральную функцию широкополосного импульса можно считать постоянной, то воздействие импульса на фильтр аналогично воздействию δ -функции. Форма отклика тогда соответствует импульсной характеристике фильтра. Амплитуда отклика пропорциональна значению спектральной функции одиночного импульса на частоте $f_c = f_r(t_n) + f_{\text{упч}}$, где t_n – момент прихода импульса. Общее число импульсов на экране равно T/T_a . Поскольку частота входного сигнала не синхронизирована с частотой развертки, эти отклики будут перемещаться по экрану, создавая огибающую изображения, несущую информацию о спектре.

4.2. Состав лабораторной установки

В лабораторной работе используется ВЧ спектроанализатор последовательного типа СК4-59 и генератор сигналов произвольной формы АКИП-3407/4. Последний служит для получения радиосигнала с амплитудной модуляцией и периодической последовательности прямоугольных импульсов.

Основные параметры анализатора спектра СК4-59:

- Диапазон рабочих частот 10 кГц....110 МГц;
- Полоса обзора (полоса анализа) регулируется в пределах 0-100 МГц (дискретно 5, 10, 50, 100, 200 кГц, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 МГц);
- Полоса пропускания по уровню -3 дБ регулируется в пределах 0,1-300 кГц (дискретно 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300 кГц)
- Период развертки (время анализа) устанавливается в пределах 0,01 – 20 сек
- Входное сопротивление 50 Ом, разъем N-типа;
- Погрешность измерения отношений уровней 4-6%, установки частоты $\pm(10^{-6}f+1/T)$ Гц;
- Уровень собственных шумов -110 дБмВт (0,71 мкВ) - для полосы фильтра 1 кГц;
- Динамический диапазон измерения 120 дБ
- Динамический диапазон по интермодуляционным искажениям 70 дБ;
- Неравномерность АЧХ ± 1 дБ.
- Предел измерения уровней по входу 700 нВ – 7 В;
- Погрешность входного аттенюатора 6 %
- Погрешность аттенюатора ПЧ 4 – 6 % Погрешность индикатора 4 %
- Погрешность логарифмического масштаба амплитуд 2 дБ
- Сигнал калибратора – 10 МГц ± 3 кГц. Погрешность установки уровня первой гармоники калибратора 5 %

Прибор предназначен для исследования спектров периодических сигналов произвольной формы и модуляции, стационарных шумов, исследования характеристик четырехполюсников, для селективного измерения частот и уровней периодических сигналов.

Основные параметры генератора АКИП-3407:

- Диапазон частот: 40 мГц - 10 МГц;
- Погрешность установки частоты $5 \times 10^{-5} + 40$ МГц;
- Формы сигнала: синус, меандр, импульс, постоянное смещение в пределах ± 10 В с дискретом 20 мВ;
- Режим формирования сигнала произвольной формы (32 вида) с частотой до 1 МГц;
- Режимы АМ, ЧМ, ФМ, свиппирование по частоте;
- Амплитудная модуляция: 1% - 120% , девиация ЧМ – до 20%
- Выходной уровень 2 мВ – 20 В, погрешность установки $\pm(1\% + 2 \text{ мВ})$;
- Интерфейс RS-232;
- ЖК-дисплей с диагональю 9 см, разрешение: 320x240.

Генератор АКИП-3407 построен на основе технологии прямого цифрового синтеза (DDS) и позволяют генерировать сигнал произвольной формы с разрешением по уровню 10 бит. На выходе А генератор выдаёт следующие стандартные формы сигналов: постоянное напряжение (DC), синус, меандр и импульс. Максимальный выходной уровень 10 В пик (на нагрузке 50 Ом), интервал формирования сигнала до 16000 точек. На выходе В генератор позволяет генерировать любую из 32-х предустановленных произвольных форм сигнала с частотой до 1 МГц, амплитудой до 10 В пик (на нагрузке 50 Ом) и длиной сигнала до 1024 точек. Сигнал по выходу В имеет разрешение по уровню 8 бит.

4.3.Задание и указания к выполнению лабораторной работы

4.3.1 Исследование спектра АМ-колебания

Исследуется спектр колебания с несущей частотой 5 МГц, модулированного по амплитуде гармоническим сигналом низкой частоты, измеряются параметры АМ-сигнала.

Соедините выход канала А генератора АКИП-3407 (**СНА Output**) с входом 0,01 ... 110 MHz анализатора спектра (АС). Включите питание генератора и обоих блоков спектроанализатора.

На генераторе нажатием клавиши **MOD** выберите режим работы выхода А **СНА АМ**. Установите несущую частоту генератора 5 MHz. Для этого необходимо нажать клавишу **Carrier Freq** (на функциональной клавиатуре рядом с соответствующей надписью в правой части экрана). Для ввода значения частоты используйте цифровую панель ввода или ручку, расположенную в правом верхнем углу генератора. Установите клавишей **Carrier Amp** размах несущей АМ сигнала (удвоенную амплитуду) 2,000 Vpp. Используя клавишу **Mod Freq**, установите частоту модуляции 1,0 kHz. Нажмите кнопку **AM Depth** и установите глубину модуляции 100%. Включите выход А клавишей **СНА Output** (загорится подсветка).

Установите органы управления спектроанализатора в следующие положения: **ОСЛАБЛЕНИЕ** 30 дБ, **ПОЛОСА** 0.1 kHz, **ОБЗОР НА ДЕЛЕНИЕ** 0.5 kHz, масштаб **ЛИНЕЙН**, **НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ** 250 mV, **РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ** 50 ms/дел., **ПАМЯТЬ ОТКЛ**.

Переключатель **МЕТКА** стоп-метки частотомера установите в положение **ЦЕНТР** и, вращая ручку **ЧАСТОТА ГРУБО** и **ПЛАВНО**, настройте АС на частоту 5.0 МГц. Контроль настройки проводите по встроенному в АС частотомеру - он должен показывать частоту 5000 кГц ($\pm 1..2$ кГц). При точной настройке АС на экране появится изображение спектра АМ-колебания в виде трех откликов – несущее колебание и два боковых.

Установите режим запоминания. Для этого на осциллографическом блоке АС нажмите кнопку **ПАМЯТЬ ПЕРИОДИЧН** и отрегулируйте яркость ручкой ☀ и фокусировку ручкой ⊗. Сфотографируйте или зарисуйте вид спектра исследуемого колебания. Произведите измерения амплитуд и частот всех гармоник спектра. При определении частот гармоник,

перемещая осциллограмму ручкой **ЧАСТОТА ПЛАВНО**, последовательно подводите вершины откликов в центр экрана и фиксируйте показания частотомера. Для измерения амплитуд откликов используйте метод калиброванных шкал. Конечное значение шкалы слева от экрана (обозначенная **ЛИНЕЙН**) определите по переключателю **НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ**, отмеченному световым индикатором.

Результаты измерений занесите в таблицу по форме 1. По результатам измерений, используя формулу (4.1), рассчитайте параметры АМ-колебания: амплитуду несущего колебания U_m , коэффициент амплитудной модуляции M , несущую частоту f_0 и частоту модуляции F .

4.3.2 Исследование искажений спектра АМ-колебания.

Исследуются динамические искажения спектра АМ-колебания и влияние на них параметров АС- полосы пропускания фильтра АС, полосы пропускания видеофильтра и скорости развертки (времени анализа).

Влияние полосы пропускания фильтра АС Δf_{ϕ} на вид спектрограммы АМ-колебания исследуйте при следующих положениях органов управления АС: переключатель **ЗАПУСК ВИД** - в положение **ОДИН**, режим **ПАМЯТЬ** электронно-лучевой трубки - в положение **ДЛИТ**, частотная метка отключена (переключатель **МЕТКА** - в положение \leftrightarrow , ручка \leftrightarrow повернута по часовой стрелке до упора). Для сглаживания шумов АС выберите узкую полосу пропускания видеофильтра 100 Гц.

Нажмите кнопку **ОДИН**, при этом на экране запишется спектрограмма для полосы пропускания фильтра 0,1 КГц. Установите полосу фильтра 0,3 кГц и 1 кГц и повторите запись спектрограммы. В результате на экране АС получится три спектрограммы одного и того же входного сигнала, записанные при разных полосах пропускания АС. Сфотографируйте или зарисуйте полученное изображение. Очистите экран нажатием кнопки **X**.

Рассчитайте по формуле (4.3) коэффициент динамических искажений μ для всех записанных спектрограмм. При этом учтите, что $V_p=50$ мкс/дел., $M_q=0.5$ кГц/дел.

Влияние полосы пропускания видеофильтра на вид спектрограммы оцените для узкой полосы пропускания АС 0.1 кГц. Запишите спектрограммы сигнала при трех значениях полосы пропускания видеофильтра. Установите переключатель **ВИДЕОФИЛЬТР** в положение 10 kHz, 100 Гц и 10 Гц и запишите на экране изображение спектра. Повторите

запись при полосе видеофильтра 10 Нз. Зарисуйте спектрограммы, после чего сотрите запись на экране кнопкой X.

Рассчитайте коэффициент динамических искажений для всех записанных спектрограмм. При этом учтите, что в формулу (4.3) надо подставить полосу пропускания видеофильтра.

Влияние скорости развертки на вид спектрограммы исследуйте при полосе частот фильтра $\Delta f_{\phi}=0.1$ кГц и полосе пропускания видеофильтра 10 кГц. Запишите спектрограммы АМ-колебания при следующих положениях переключателя **РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ**: 0.5 s/ дел., 50, 5 и 2 ms/дел. Сфотографируйте или зарисуйте изображения спектров и проведите расчет коэффициента динамических искажений μ , учитывая, что $M_{\phi}=0.5$ кГц/дел. и $\Delta f_{\phi}=0.1$ кГц.

4.3.3 Исследование спектров прямоугольных импульсов

Исследуются спектры периодических последовательностей прямоугольных импульсов, подаваемых на АС от генератора АКИП-3407. Установите органы управления на АС в следующие положения: **ПАМЯТЬ - ОТКЛ, ЗАПУСК ВИД - ВНУТР, РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ - 5 ms/ дел., ОБЗОР НА ДЕЛЕНИЕ - 0.5 MHz, ПОЛОСА 10 kHz, ОСЛАБЛЕНИЕ 40 дБ, ВИДЕОФИЛЬТР – 10 кГц.**

На генераторе АКИП-3407 клавишей **Channel** выберите **СНА Alone** и нажмите клавишу $A \square$ (режим генерации прямоугольных импульсов). Установите частоту повторения импульсов (клавиша **Frequency**), равную 100 kHz. Нажмите клавишу **Amplitude** и установите амплитуду импульсов 2.000 V_{pp}. Длительность импульса в генераторе АКИП-3407 устанавливается в процентах от периода их повторения («доля заполнения периода» **Duty**). Для получения длительности импульса 1 мкс (при периоде 1/100кГц=10мкс) надо установить этот параметр равным 10%. Нажмите клавишу **Impedance**, повторным ее нажатием выберите параметр **Duty** и установите его равным 10 %.

Ручками **ЧАСТОТА MHz ГРУБО** и **ПЛАВНО** настройте АС так, чтобы на экране появилось изображение спектра последовательности прямоугольных видеоимпульсов. Напомним, что спектр таких импульсов располагается симметрично относительно нулевой частоты. Отрегулируйте вертикальный размер изображения так, чтобы максимум огибающей спектра

был равен 8 делениям шкалы. Для этого используйте регулировку **НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ** (дискретно и плавно).

Сфотографируйте или зарисуйте спектрограмму для частоты повторения 100 кГц. Определите по ней ширину главного лепестка спектра в области положительных частот ΔF (от нуля до частоты первого минимума.), а также расстояние между соседними гармониками f_1 . При измерении используйте встроенный частотомер АС и плавную регулировку стоп-метки \leftrightarrow (переключатель **МЕТКА** - в положении \leftrightarrow).

Получите спектрограммы для частот повторения импульсов 10 и 1 kHz при постоянной длительности импульса 1 мкс. Чтобы длительность импульсов сохранялась неизменной, при смене частоты повторения необходимо изменять параметр **Duty**. Так для частоты повторения 10 kHz следует установить **Duty** = 1%, а для частоты 1 kHz – 0.1%. При изменении частоты повторения меняется и вертикальный масштаб спектрограммы. Поэтому устанавливайте каждый раз размер изображения по вертикали 8 делений шкалы, используя регулировки **НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ**.

Сфотографируйте или зарисуйте полученные спектрограммы. Обратите внимание на изменения, которые происходят в спектрограммах при изменении частоты повторения импульсов.

Для частоты повторения импульсов 1kHz последовательно установите скорость развертки 10, 5 и 2 ms/дел. В этом режиме за один период развертки на вход АС поступает относительно небольшое число импульсов. Они создают несколько откликов на экране АС. На следующем периоде опять формируется несколько откликов, но уже в других точках экрана. В результате создается впечатление "бегущего дискретного спектра".

Установите на АС режим запуска **ОДИН** и режим памяти **ДЛИТ**. Многократно нажимая кнопку запуска **ОДИН**, наблюдайте, как заполняется спектрограмма откликами от входных импульсов. Спектрограмма в конечном итоге будет повторять форму огибающей спектра прямоугольных импульсов. Рассчитайте амплитудный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов по формуле (4.2) для $\tau = 1$ мкс и $f_1 = 100$ кГц. При этом амплитуду импульсов в формуле задайте такой, чтобы уровни первых гармоник расчетного и измеренного спектров совпали. На измеренной для частоты 100 кГц спектрограмме отметьте расчетные значения амплитуд гармоник спектра в области центрального и двух боковых лепестков.

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен содержать таблицу результатов измерений, спектрограммы, расчеты и графики по пунктам работы

Рекомендуемые формы таблиц

Форма 1

Параметр	Гармоника		
	нижняя	центральная	верхняя
Частота гармоника, МГц			
Амплитуда гармоника, мВ			
Измеренный по спектрограмме коэффициент модуляции М, %			
Частота модуляции, кГц			