

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Севастопольский национальный технический университет
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

Методические указания к выполнению
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ №4
«ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ»
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАДИОИЗМЕРЕНИЯ»
для студентов ДФО и ЗФО специальности – Радиотехника

Севастополь 2011

УДК 621.317.08(075.8)

Методические указания к выполнению лабораторного практикума по дисциплине «Радиоизмерения» для студентов ДФО и ЗФО направления Радиотехника/Сост. И.Л. Ветров, — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. — 10 с.

Целью указаний является оказание помощи студентам в выполнении лабораторных работ. Излагаются основные теоретические сведения. Приводится описание лабораторных установок, программ и методик измерений, требования к содержанию отчет по лабораторным работам.

Указания предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения направления «Радиотехника».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций. Протокол № _____ от _____ 2011г.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний к выполнению лабораторного практикума по дисциплине «Радиоизмерения»

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Зиборов С.Р.

Ответственный за выпуск: доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа «Исследование анализатора спектра периодических сигналов»	3
1.1. Цель лабораторной работы.....	3
1.2. Теоретические сведения	3
1.2.1. Общие сведения об анализе спектра	3
1.2.2. Приборы с параллельным анализом спектра сигнала.....	3
1.2.3. Приборы с последовательным анализом спектра сигнала	4
1.2.4. Цифровые анализаторы спектра	6
1.2.5. Основные характеристики анализатора спектра	8
1.3. Порядок выполнения лабораторной работы.....	8
1.3.1. Лабораторная установка и измерительные приборы	8
1.3.2. Измерение амплитудного спектра сигнала	8
1.4. Содержание отчета.....	10
1.5. Контрольные вопросы	10

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ»

1.1. Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является изучение принципов построения анализаторов спектра и приобретение навыков работы с анализатором спектра типа СК4-56.

1.2. Теоретические сведения

1.2.1. Общие сведения об анализе спектра

Связь между временным и частотным представлениями сигналов устанавливают преобразования Фурье:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt; \quad s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega,$$

где ω — круговая частота.

Функцию $S(j\omega) = |S(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$ называют спектральной плотностью или спектральной функцией, а функцию времени $s(t)$ — называют сигналом. Зависимость модуля спектральной плотности $S(\omega) = |S(j\omega)|$ от частоты называют амплитудным спектром сигнала, а зависимость $\varphi(\omega)$ — называют фазовым спектром сигнала.

Если периодический сигнал $s(t)$ имеет период повторения T , то его можно представить рядом Фурье

$$s(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2.2)$$

где $k=1, 2, 3, \dots$ — номер гармонической составляющей; A_0 — постоянная составляющая (среднее значений) сигнала $s(t)$; A_k , $\omega_k = k\omega_1 = 2\pi k/T$ — амплитуда и круговая частота k -той гармонической составляющей соответственно; φ_k — начальная фаза k -той гармонической составляющей.

Обычно основной интерес представляет амплитудный спектр $S(\omega)$ сигнала. Приборы, позволяющие визуализировать и измерить $S(\omega)$, называют анализаторами спектра (АС). Измерение амплитудного спектра сигнала производят в течение ограниченного отрезка времени $t_{\text{изм}}$. В связи с этим измеряемый амплитудный спектр зависит от $t_{\text{изм}}$ и называется текущим спектром. Отличие текущего амплитудного спектра от амплитудного спектра сигнала зависит от того, проявились ли за время $t_{\text{изм}}$ все характерные особенности сигнала. Если сигнал $s(t)$ периодический и $t_{\text{изм}} \gg T$, то текущий амплитудный спектр сигнала практически не отличается от теоретического амплитудного спектра.

В зависимости от способа аппаратного анализа $S(\omega)$ различают АС, параллельного (одновременного), последовательного и смешанного действия.

1.2.2. Приборы с параллельным анализом спектра сигнала

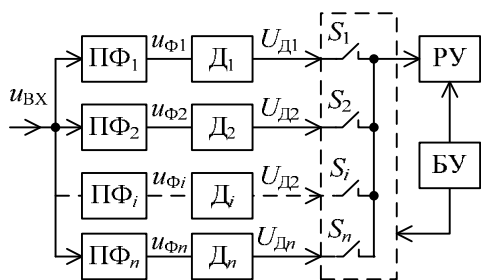


Рис. 2.1 — Упрощенная структурная схема АС с параллельным анализом спектра сигнала

Структурная схема, поясняющая принцип работы АС с параллельным анализом сигнала, показана на рис. 2.1. Такие приборы позволяют осуществить исследование амплитудных спектров одиночных импульсов и случайных сигналов.

Исследуемый сигнал u_{BX} подается одновременно на n полотно-пропускающих частотных фильтров ПФ, каждый из которых выделяет узкую полосу частот. Если спектральные составляющие u_{BX} попадают в полосу пропускания i -того ПФ, то на его выходе появляется переменное напряжение $u_{\Phi i}$, поступающее на амплитудные детекторы D_i . На выходах детекторов получают напряжения U_{Di} , поступающие на коммутатор, состоящий из аналоговых ключей $S_1 \dots S_n$. Он обеспечивает поочередное подключение детекторов к регистрирующему устройству РУ. Коммутатором и регистрирующим устройством управляет блок управления БУ. Если число ПФ мало, то коммутатор может отсутствовать. В этом случае число регистрирующих устройств равно числу ПФ.

Верхняя граница рабочих частот АС подобного типа обычно не превышает нескольких сотен кГц. Тип применяемых ПФ зависит от частотного диапазона прибора. Для построения ПФ в области инфранизких частот используют избирательные RC-цепи. Для реализации более высокочастотных ПФ применяют LC-цепи или электромагнитные фильтры.

Примером анализатора параллельного действия служит промышленный АС типа СК4-92, имеющий 400 частотных каналов. Он предназначен для анализа сигналов в реальном масштабе времени в диапазоне частот от нуля до

200 кГц. Динамический диапазон не менее 70 дБ. Подобные параметры имеют АС типа 9407 *Takeda Ridken*, 2642 *Tektronix*.

1.2.3. Приборы с последовательным анализом спектра сигнала

Последовательный анализ спектра применяют для исследования периодических сигналов, имеющих дискретный по частоте амплитудный спектр. Последовательный анализ осуществляют двумя способами.

Первый способ заключается в исследовании спектра сигнала с помощью перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра (ППФ) с узкой полосой пропускания. Упрощенная структурная схема АС на основе ППФ показана на рис. 2.2.

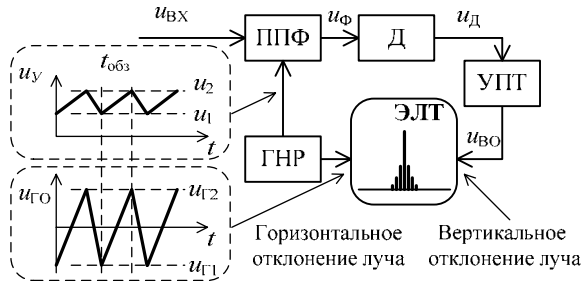


Рис. 2.2 — Структурная схема АС последовательного анализа на основе ППФ

Генератор напряжений развертки ГНР формирует два напряжения пилообразной формы u_Y и $u_{ГO}$, изменяющихся синхронно с одинаковым периодом повторения. Напряжение u_Y поступает на управляющий вход ППФ, изменяя частоту f_Φ настройки ППФ от $f_{\Phi 1}$ до $f_{\Phi 2}$. Диапазон частот с границами $f_{\Phi 1}$ и $f_{\Phi 2}$ называют полосой обзора или полосой сканирования. Полоса обзора $\Delta_{обз} = f_{\Phi 2} - f_{\Phi 1}$ зависит от минимального u_1 и максимального u_2 значений управляющего напряжения u_Y (рис. 2.2) и параметров ППФ. Регулировкой u_1 и u_2 можно устанавливать требуемую полосу обзора. Напряжение $u_{ГO}$ поступает на пластины горизонтального отклонения луча электроннолучевой трубки ЭЛТ. Напряжению $u_{Г1}$ соответствует крайнее левое положение луча на экране ЭЛТ, а напряжению $u_{Г2}$ — крайнее правое положение. Длительность прямого хода напряжений u_Y , $u_{ГO}$ равна времени $t_{обз}$ обзора диапазона частот. Таким образом, под воздействием напряжений u_Y и $u_{ГO}$ одновременно изменяются f_Φ и положение луча ЭЛТ по горизонтали, т. е. горизонтальная ось ЭЛТ соответствует оси частот. Предельные значения $f_{\Phi 1}$, $f_{\Phi 2}$, определяют диапазон рабочих частот АС.

Входное напряжение u_{BX} поступает на сигнальный вход узкополосного ППФ. Если в процессе обзора диапазона частот в полосу пропускания ППФ попадает спектральная составляющая входного напряжения, то на выходе ППФ появляется переменное напряжение u_Φ , амплитуда которого пропорциональна амплитуде спектральной составляющей. Напряжение u_Φ детектируется амплитудным детектором Д и усиливается усилителем постоянного тока УПТ. С выхода УПТ напряжение u_{BO} поступает на пластины вертикального отклонения луча ЭЛТ. Вследствие этого отклонение луча ЭЛТ по вертикали пропорционально амплитуде выделенной ППФ спектральной составляющей.

Две соседние спектральные составляющие входного напряжения, расположенные близко по частоте, могут одновременно попасть в полосу пропускания ППФ и отображаться на экране ЭЛТ в виде одной спектральной составляющей. В этом случае изображение на экране ЭЛТ будет существенно отличаться от реальной спектрограммы исследуемого сигнала. Минимальное расстояние по оси частот между ближайшими спектральными составляющими, при котором можно измерить их частоты и уровни с допустимой погрешностью, называется разрешающей способностью АС. Разрешающая способность АС определяется полосой пропускания ППФ.

Второй способ построения АС базируется на гетеродинном преобразовании спектра исследуемого сигнала и сдвиге преобразованного спектра относительно окна прозрачности узкополосного фильтра, настроенного на фиксированную частоту. Типичным представителем АС гетеродинного типа является промышленный прибор СК4-56. Его упрощенная функциональная схема изображена на рис. 2.3.

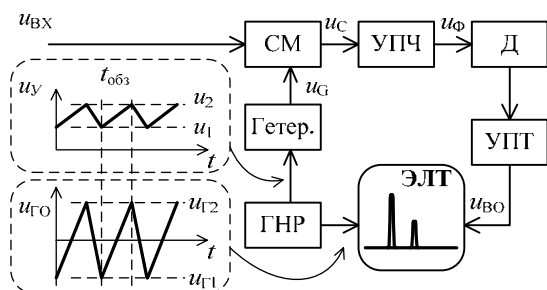


Рис. 2.3 — Упрощенная функциональная схема анализатора спектра СК4-56

Процессом анализа спектра входного периодического напряжения u_{BX} управляет генератор напряжения развертки ГНР, формирующий напряжения u_Y и $u_{ГO}$ пилообразной формы с одинаковым периодом повторения. Длительность прямого хода напряжений u_Y и $u_{ГO}$ равна времени $t_{обз}$ обзора диапазона частот.

Напряжение $u_{ГO}$ отклоняет луч ЭЛТ по горизонтали, а напряжение u_Y управляет частотой f_Γ гетеродина (вспомогательного генератора). Гетеродин вырабатывает гармоническое напряжение $u_\Gamma = U_\Gamma \sin 2\pi f_\Gamma t$, частота которого может изменяться от $f_{\Gamma 1}$ до $f_{\Gamma 2}$. Значения $f_{\Gamma 1}$ и $f_{\Gamma 2}$ определяются соответственно минимальным u_1 и максимальным u_2 значениями управляющего напряжения u_Y (рис. 2.3), которые можно регулировать, устанавливая

требуемую ширину полосы обзора $\Delta_{обз} = f_{\Gamma 2} - f_{\Gamma 1}$.

Исследуемое периодическое напряжение u_{BX} и напряжение гетеродина u_Γ поступают на смеситель СМ, который перемножает напряжения u_{BX} и u_Γ . Выходное напряжение смесителя можно приближенно представить как

$$u_C = k_C u_{BX} u_\Gamma, \quad (2.3)$$

где k_C — коэффициент, характеризующий свойства смесителя.

Рассмотрим случай, когда $u_{BX} = U_1 \sin 2\pi f_1 t + U_2 \sin 2\pi f_2 t$ является суммой двух гармонических составляющих с амплитудами U_1 , U_2 и частотами f_1 , $f_2 = f_1 + \Delta f$. Будем считать, что частоты f_1 и f_2 меньше f_Γ . В соответствии с (2.3) находим

$$\begin{aligned} u_C &= k_C [U_1 \sin 2\pi f_1 t + U_2 \sin 2\pi f_2 t] U_\Gamma \sin 2\pi f_\Gamma t = \\ &= U_{C1} \cos[2\pi(f_\Gamma - f_1)t] + U_{C2} \cos[2\pi(f_\Gamma - f_2)t] - \\ &\quad - U_{C1} \cos[2\pi(f_\Gamma + f_1)t] - U_{C2} \cos[(f_\Gamma + f_2)t], \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $U_{C1} = U_1 k_C U_\Gamma / 2$, $U_{C2} = U_2 k_C U_\Gamma / 2$ — амплитуды спектральных составляющих выходного напряжения смесителя.

Амплитудные спектры напряжений u_{BX} , u_Γ и u_C показаны на рис. 2.4.

Как следует из (2.4), выходное напряжение смесителя содержит две группы спектральных составляющих. Частоты $(f_\Gamma - f_1)$ и $(f_\Gamma - f_2)$ первой группы спектральных составляющих меньше частоты f_Γ , а частоты $(f_\Gamma + f_1)$ и $(f_\Gamma + f_2)$ второй группы спектральных составляющих больше f_Γ . Соотношение амплитуд и взаимное расположение спектральных составляющих в каждой из групп полностью определяется соотношением амплитуд и взаимным расположением на оси частот спектральных составляющих u_{BX} .

При изменении частоты гетеродина от $f_{\Gamma 1}$ до $f_{\Gamma 2}$ спектральные составляющие u_C перемещаются по оси частот вслед за частотой гетеродина и поочередно попадают в полосу пропускания усилителя промежуточной частоты УПЧ. Амплитудно-частотная характеристика УПЧ показана условно пунктирной линией на рис. 1.4, б. В данном случае минимальная частота гетеродина $f_{\Gamma 1}$ совпадает с частотой настройки УПЧ.

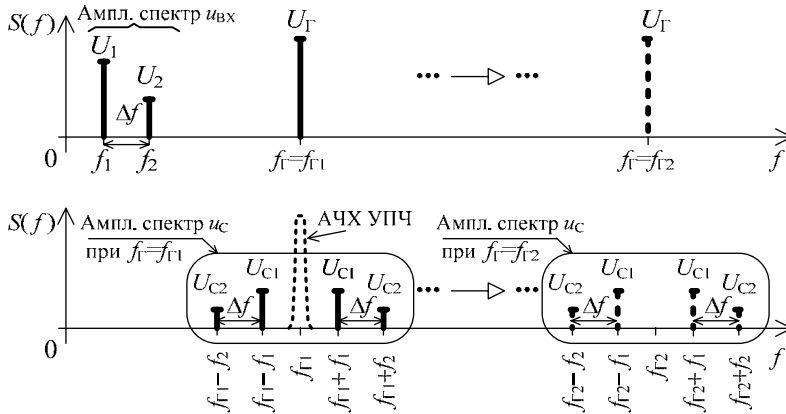


Рис. 2.4 — Амплитудные спектры напряжений u_{BX} , u_Γ (а) и u_C (б)

С постепенным увеличением f_G все спектральные составляющие u_C смещаются вправо по оси частот. Когда f_G становится равной $f_{G1} + f_1$, в полосу пропускания УПЧ попадает спектральная составляющая с частотой $(f_G - f_1)$. На выходе УПЧ формируется напряжение u_Φ , пропорциональной амплитуде U_{C1} , которая, в свою очередь, пропорциональна U_1 . Через некоторое время f_G увеличится до значения $f_{G1} + f_2$ и в полосу пропускания УПЧ попадет спектральная составляющая с частотой $(f_G - f_2)$. При этом амплитуда u_Φ

станет пропорциональной U_2 .

Спектральные составляющие, последовательно выделяемые УПЧ из спектра u_C , детектируются амплитудным детектором Д и, после усиления УПТ, поступают на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ в виде напряжения u_{BO} . Таким образом, отклонение луча ЭЛТ в вертикальном направлении пропорционально уровню сигнала в узкой полосе частот, ширина которой равна ширине полосы пропускания УПЧ.

В отличие от АС с ППФ, у которого частота настройки фильтра сдвигается относительно спектральных составляющих сигнала, в анализаторах спектра гетеродинного типа амплитудный спектр сигнала сдвигается относительно полосы пропускания УПЧ, настроенного на фиксированную частоту. При этом изменение частоты гетеродина не изменяет ширины полосы пропускания УПЧ, т. е. разрешающая способность АС в полосе рабочих частот остается постоянной.

Современные АС позволяют оператору изменять ширину $\Delta f_{ПЧ}$ полосы пропускания УПЧ в широких пределах. В анализаторе спектра СК4-56 можно ступенчато изменять $\Delta f_{ПЧ}$ от 3 Гц до 300 Гц. От соотношения $\Delta f_{ПЧ}$, времени обзора $t_{обз}$ и полосы обзора $\Delta f_{обз}$ существенно зависят динамические погрешности измерения амплитудного спектра, вызванные переходными процессами в УПЧ.

Ранее предполагалось, что напряжение на выходе УПЧ пропорционально его коэффициенту усиления и амплитуде воздействующей спектральной составляющей. Такой подход справедлив, если частота гетеродина изменяется настолько медленно, что переходные процессы в УПЧ успевают полностью закончиться.

Узкополосным фильтрам, к которым относится УПЧ, свойственна инерционность. Ее принято оценивать временем установления t_y напряжения на выходе фильтра от 0,1 до 0,9 установившегося значения. Как известно, для фильтров с различной формой частотной характеристики и шириной полосы пропускания $\Delta f_{ПЧ}$, время установления оценивают как $t_y = A/\Delta f_{ПЧ}$, где A — коэффициент, зависящий от типа фильтра, примененного в УПЧ. Так, для одноконтурного контура $A=0,73$, для системы связанных контуров с критической связью $A=0,72$. При приближенных расчетах можно полагать $A=1$ и $t_y = 1/\Delta f_{ПЧ}$.

Для установления выходного напряжения УПЧ, спектральная составляющая должна находиться в пределах его полосы пропускания в течение времени $t_{ПП} \geq t_y$. Время пребывания спектральной составляющей в полосе пропускания УПЧ определяем, как $t_{ПП} = \Delta f_{ПЧ} t_{ОБЗ} / \Delta f_{ОБЗ}$. Следовательно, $\Delta f_{ПЧ}$, $t_{ОБЗ}$ и $\Delta f_{ОБЗ}$ должны удовлетворять неравенству $\Delta f_{ПЧ} t_{ОБЗ} / \Delta f_{ОБЗ} \geq 1/\Delta f_{ПЧ}$. Из данного неравенства получаем оценку минимального времени обзора

$$t_{ОБЗ} = \frac{\Delta f_{ОБЗ}}{(\Delta f_{ПЧ})^2}, \quad (2.5)$$

которое обеспечивает незначительные динамические погрешности измерения амплитуд спектральных составляющих. Время обзора, определяемое соотношением (2.5), может достигать десятков секунд, поэтому в анализаторах спектра используют ЭЛТ с большим временем послесвечения или запоминающие ЭЛТ, способные сохранять изображение на экране длительное время.

В практике измерений возникает необходимость исследования периодических сигналов, у которых амплитуды спектральных составляющих, находящихся в диапазоне обзора АС, могут отличаться в сотни и тысячи раз. Для исследования таких сигналов в АС применяют УПЧ с логарифмической амплитудной характеристикой. Коэффициент усиления такого УПЧ уменьшается с увеличением амплитуды усиливаемого сигнала, т. е. спектральные составляющие с малыми амплитудами усиливаются больше, чем спектральные составляющие с большими амплитудами. Это дает возможность увидеть на экране ЭЛТ амплитудный спектр сигнала с большим отношением амплитуд спектральных составляющих. Обычно АС имеют переключатели для перевода индикации из линейного режима в логарифмический режим. В логарифмическом режиме индикации проводят общую оценку амплитудного спектра сигнала, а линейный режим индикации используют для детального анализа выбранного участка амплитудного спектра. Амплитудные спектры одиночных импульсов можно исследовать анализатором последовательного действия при их предварительной записи с малыми искажениями. В этом случае появляется возможность неоднократного воспроизведения сигнала и увеличения времени анализа.

1.2.4. Цифровые анализаторы спектра

Цифровой АС определяет амплитуды спектральных составляющих посредством цифровой обработки ряда последовательных во времени отсчетов (выборок) входного сигнала и строит зависимость амплитуд спектральных составляющих от частоты. В основе алгоритма анализа спектра лежит дискретное преобразование Фурье.

Если имеется конечное число отсчетов непрерывного сигнала $s(t)$ (например, импульса напряжения), взятых на интервале времени от 0 до $t_{изм}$ через одинаковые промежутки времени Δt , то непрерывному сигналу $s(t)$ можно сопоставить его дискретное представление $s_d(t)$ на интервале $(0, t_{изм})$ в виде последовательности δ -импульсов:

$$s_d(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \delta(t - k\Delta t), \quad (2.6)$$

где s_k — значение k -того отсчета; $k=0, 1, 2, \dots (N-1)$ — номер отсчета; N — число отсчетов сигнала за время $t_{изм}$.

Чем больше N (чем меньше Δt), тем точнее дискретный сигнал $s_d(t)$ отражает свойства непрерывного сигнала $s(t)$.

Если дискретный сигнал имеет период повторения T , то его можно представить комплексным рядом Фурье

$$s_d(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C(jn\omega_0) \exp(jn\omega_0 t), \quad (2.7)$$

где $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — целое действительное число; $\omega_0 = 2\pi/T$ — разность частот соседних спектральных составляющих, равная частоте повторения сигнала; $C(jn\omega_0)$ — комплексная амплитуда n -ной спектральной составляющей

Комплексная амплитуда определяется как

$$C(jn\omega_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp(-jn\omega_0 k\Delta t).$$

При $\Delta t = T/N$ имеем

$$C(jn\omega_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp\left(-j2\pi \frac{nk}{N}\right). \quad (2.8)$$

В соответствии с формулой Эйлера выражение (2.8) можно представить в виде

$$C(jn\omega_0) = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=0}^{N-1} s_k \cos \frac{2\pi nk}{N} + j \sum_{k=0}^{N-1} s_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \right] = C_n + jS_n, \quad (2.9)$$

где действительная часть C_n и мнимая часть S_n комплексной амплитуды $C(jn\omega_0)$ определяются следующими выражениями:

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \cos \frac{2\pi nk}{N}, \quad S_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k \sin \frac{2\pi nk}{N}. \quad (2.10)$$

Из выражения (2.9) находим амплитуду n -ной спектральной составляющей

$$C(n\omega_0) = |C(jn\omega_0)| = \sqrt{C_n^2 + S_n^2}. \quad (2.11)$$

На рис. 2.5, а показаны сигнал $s(t)$ и его отсчеты s_k . На рис. 2.5, б показан амплитудный спектр сигнала $s(t)$, т. е. зависимость $C(n\omega_0)$ от частоты.

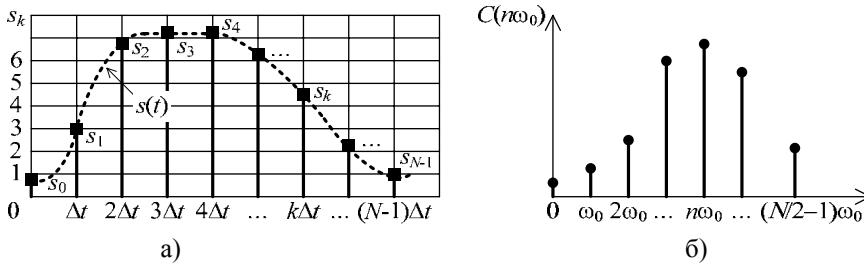


Рис. 2.5 — Сигнал $s(t)$ (а) и его амплитудный спектр (б)

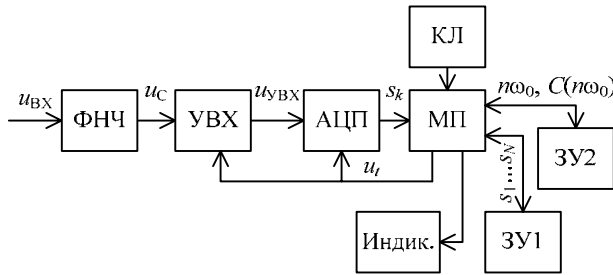


Рис. 2.6 — Структурная схема цифрового АС

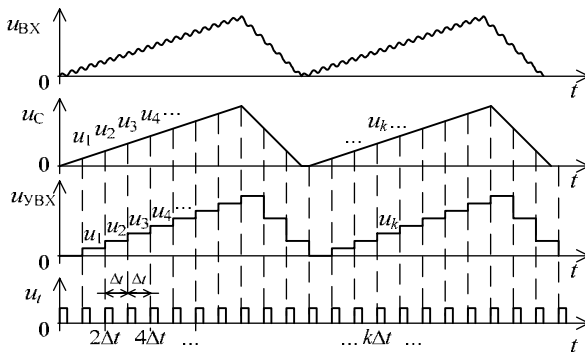


Рис. 2.7 — Временные диаграммы напряжений цифрового АС

выборку напряжения u_C и запоминает его на время Δt . Напряжение выборки u_k определяется значением u_C в момент прихода k -того импульса u_t . Таким образом, напряжение $u_{УВХ}$, образованное последовательностью u_k , представляет собой ступенчатую аппроксимацию напряжения u_C . Необходимость ступенчатой аппроксимации u_C продиктована требованием постоянства входного напряжения АЦП во время преобразования u_k в цифровые отсчеты s_k . Рабочий диапазон частот цифровых АС определяется в основном быстродействием АЦП.

Цифровые отсчеты s_k записываются в запоминающее устройство ЗУ1, пока не будет достигнут требуемое чис-

В современных АС применяют алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данный алгоритм ускоряет вычисление $C(n\omega_0)$ за счет уменьшения числа математических операций. Применение БПФ дает выигрыш по времени вычислений примерно в 200 раз в случае $N=1024$ и примерно в 650 раз при $N=4096$.

На рисунках 2.6 и 2.7 показаны структурная схема и временные диаграммы напряжений цифрового АС.

Исследуемое напряжение $u_{ВХ} = u_C + u_{П}$ может содержать полезный сигнал u_C и напряжение помехи $u_{П}$, спектр которой расположен за пределами рабочей полосы частот АС. На рис. 2.7 полезный сигнал u_C имеет вид напряжения пилообразной формы. Если в качестве помехи $u_{П}$ выступает высокочастотное гармоническое напряжение, то для ее подавления напряжение $u_{ВХ}$ пропускают через фильтр нижних частот ФНЧ, граничная частота которого меньше частоты помехи.

С выхода ФНЧ напряжение u_C , «очищенное» от помехи, поступает на сигнальный вход устройства выборки-хранения УВХ, которое управляется импульсами напряжения u_t , формируемыми микропроцессором МП через равные интервалы времени Δt (рис. 2.7). С приходом очередного импульса u_t устройство выборки-хранения осуществляет

ло N отсчетов. После этого процессор обрабатывает накопленные в ЗУ1 отсчеты $s_1 \dots s_N$, рассчитывая в соответствии с (2.10) (2.11) цифровые значения $C(n\omega_0)$, которые записывает в запоминающее устройство ЗУ2. Полученная зависимость $C(n\omega_0)$ от частоты отображается на экране индикатора.

1.2.5. Основные характеристики анализатора спектра

Рассмотрим основные параметры гетеродинных АС низкочастотного и высокочастотного диапазонов.

Диапазон рабочих частот АС определяется минимальной и максимальной частотами, между которыми могут находиться спектральные составляющие исследуемого сигнала.

Погрешность измерения частоты спектральных составляющих входного напряжения обычно указывают в герцах или мегагерцах. Для СК4-56 этот параметр составляет $\pm(10^{-4}f + \Delta f_{AC} + 1)$ Гц, где Δf_{AC} — полоса пропускания анализатора спектра; f — измеренное значение частоты спектральной составляющей.

Полоса пропускания анализатора спектра на уровне 3 дБ определяется полосой пропускания УПЧ. Для СК4-56 этот параметр может быть установлен равным 3, 10, 30, 100, 300 герц.

Уровень собственных шумов (приведенный ко входу) указывают в единицах напряжения. При этом также указывают, на какой частоте измерен этот параметр, какова полоса пропускания АС и каково внутреннее сопротивление источника сигнала. Для СК4-56 этот параметр составляет 30 нВ на частоте 50 Гц, при $\Delta f_{AC} = 3$ Гц сопротивлении источника сигнала 600 Ом.

Пределы измеряемых уровней сигнала характеризуют минимальное и максимальное значения входного напряжения, при которых АС обеспечивает требуемые метрологические характеристики. Входной сигнал очень высокого уровня может вывести из строя входные цепи анализатора спектра. В связи с этим для конкретного АС указывают максимальный уровень входного сигнала.

Неравномерность АЧХ характеризует зависимость чувствительности АС в диапазоне рабочих частот. Малая неравномерность АЧХ очень важна, поскольку с помощью АС решается задача сравнения амплитуд спектральных составляющих сигнала на различных частотах. Для этого в АС применяют смесители, у которых коэффициент преобразования не зависит от частоты.

Динамический диапазон — это отношение максимального и минимального сигналов, которые могут одновременно наблюдаться на экране индикатора АС без заметных искажений.

1.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1.3.1. Лабораторная установка и измерительные приборы

Структурная схема лабораторной установки изображена на рис. 2.8, а. Она состоит из, генератора импульсных сигналов Г5-63, осциллографа С1-65 и анализатора спектра СК4-56.

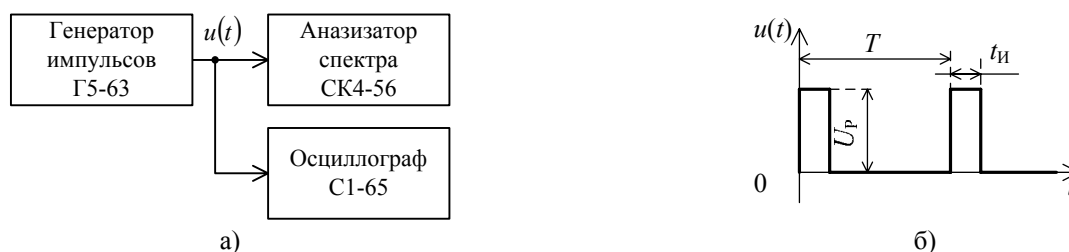


Рис. 2.8 — Структурная схема лабораторной установки (а) и временная диаграмма исследуемого сигнала (б)

Генератор импульсов Г5-63 формирует исследуемый сигнал $u(t)$, представляющий собой последовательность импульсов напряжения прямоугольной формы. Напряжение размаха U_p , длительность $t_{и}$ и период следования T импульсов можно устанавливать с помощью органов управления Г5-63, расположенных на его передней панели.

Осциллограф обеспечивает возможность наблюдения исследуемых импульсов напряжения с целью сопоставления временных и частотных характеристик сигнала.

Анализатор спектра СК4-56 предназначен для измерения параметров амплитудного спектра периодических электрических сигналов и уровней слабых сигналов в диапазоне частот от 10 Гц до 60 кГц. Его принцип действия поясняет структурная схема, изображенная на рис. 2.3. Полосу пропускания СК4-56 можно установить в пределах от 3 Гц до 300 Гц переключателем «ПОЛОСА Нз». Цену деления сетки экрана по оси частот, которая в итоге определяет полосу обзора частот, устанавливают переключателем «ОБЗОР». Скорость обзора диапазона частот, устанавливают переключателем «S/ДЕЛЕН». Наряду с указанными органами регулировки СК4-56 имеет ряд дополнительных органов регулировки параметров, повышающих эффективность использования прибора.

1.3.2. Измерение амплитудного спектра сигнала

ВНИМАНИЕ! Во избежание повреждения ЭЛТ включайте кнопку «ПАМЯТЬ» только при минимальной яркости луча (ручка «*» должна быть установлена в крайнее левое положение), а затем устанавливайте необходимую яркость.

1.3.2.1. Установите основные органы управления и контроля СК4-56 в следующие положения:

— переключатель «ЛИНЕЙН./ЛОГ.» в положение «ЛИНЕЙН»;

- переключатель «КАЛИБР. АМПЛ.» «ВЫКЛ.»;
- переключатель «ВИДЕОФИЛЬТР» «ВЫКЛ.»;
- ручка «НОМИН. УРОВЕНЬ» внешний диск установлен на специальную отметку;
- внутренний диск установлен в крайнее левое положение.

Включите тумблер «СЕТЬ». При этом на индикаторе должна загореться сигнальная лампочка и цифровой индикатор частотомера.

Установите ручкой «*» необходимую яркость метки на экране ЭЛТ.

1.3.2.2. Для исследования амплитудного спектра сигнала произведите следующие установки органов управления СК4-56:

- переключатель «ПАМЯТЬ» установите в положение «ОТКЛ»;
- переключателем «ОБЗОР» установите цену деления сетки экрана по оси частот (оси абсцисс) 2 kHz/дел ;
- ручкой «ПОЛОСА Hz » установите полосу пропускания анализатора равной «30» Hz ;
- переключатель скорости развертки «S/ДЕЛЕН» установите на отметку «1 S».

1.3.2.3. Выполните калибровку частотной шкалы СК4-56. Для этого:

- переключатель «РАЗВЕРТКА» поставьте в положение «РУЧ»;
- вращая ручку «РУЧНАЯ» установите луч в левый нижний угол сетки экрана;
- вращая ручки «ЧАСТОТА (ГРУБО, ТОЧНО)» добейтесь нулевого показания частотомера.

1.3.2.4. Переключатель «РАЗВЕРТКА» поставьте в положение «ОДИН» (одиночный запуск), а переключатель «ПАМЯТЬ» переведите в положение «ДЛИТ» (длительное хранение изображения амплитудного спектра).

1.3.2.5. Органами управления Г5-63 установите период повторения T выходных импульсов положительной полярности равной 1000 мкс.

1.3.2.6. Установите напряжение размаха U_p выходных импульсов Г5-63 приблизительно равным 100 мВ. Напряжение размаха контролируйте с помощью осциллографа.

1.3.2.7. Рассчитайте длительность импульсов генератора $t_{И1}$, обеспечивающую при $T=1000$ мкс скважность импульсной последовательности $Q_1 = N + 2$, где N — номер лабораторной бригады по журналу.

1.3.2.8. Соответствующей ручкой регулировки генератора установите длительность импульсов $t_{И1}$.

1.3.2.9. Очистите экран СК4-56 кнопкой «X» и, нажатием кнопки «ОДИН», произведите одиночный запуск СК4-56. На экране анализатора появится изображение амплитудного спектра. Если амплитуда первой гармоники менее 6 вертикальных делений (или выходит за рамки сетки экрана), то увеличьте (или уменьшите) выходное напряжение генератора и после очистки экрана вновь запустите СК4-56. Подбором выходного напряжения генератора добейтесь отметки U_1 первой гармоники на уровне 6...7 делений сетки экрана.

1.3.2.10. Проведите измерение уровней U_i , $i=1, 2, 3, 4, 5$ первых пяти спектральных составляющих последовательности импульсов. Отсчет уровней произведите по сетке экрана СК4-56, учитывая, что одному вертикальному делению сетки соответствует напряжение 8 мВ. Результаты измерений занесите в соответствующие графы таблицы 2.1.

1.3.2.11. Рассчитайте длительность импульсов генератора $t_{И2}$, обеспечивающую при $T=1000$ мкс скважность импульсной последовательности $Q_2 = N + 4$.

1.3.2.12. Соответствующей ручкой регулировки генератора Г5-63 установите длительность импульсов $t_{И2}$ и произведите измерения в соответствии с пунктами 9 и 10 данного раздела.

Таблица 2.1 — Результаты измерений и расчетов

Q	$t_{И}$, мкс	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_3 , мВ	U_4 , мВ	U_5 , мВ	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5

1.3.2.13. Рассчитайте длительность импульсов генератора $t_{И3}$, обеспечивающую при $T=1000$ мкс скважность импульсной последовательности $Q_3 = N + 6$.

1.3.2.14. Соответствующей ручкой регулировки генератора Г5-63 установите длительность импульсов $t_{И3}$ и произведите измерения в соответствии с пунктами 9 и 10 данного раздела

1.3.2.15. По результатам измерений рассчитайте экспериментальные значения нормированных уровней спектральных составляющих $u_i = U_i / U_1$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

1.3.2.16. Для трех значений скважности последовательности прямоугольных импульсов рассчитайте и занесите в таблицу 2.1 теоретические значения нормированных уровней спектральных составляющих первых пяти спектральных составляющих

$$e_i = \frac{E_i}{E_1} = \left| \frac{\sin \frac{i\pi}{Q}}{i \cdot \sin \frac{\pi}{Q}} \right|,$$

где E_i — теоретическое значение амплитуды i -той спектральной составляющей последовательности прямоугольных импульсов $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

1.3.2.17. Для трех значений скважности постройте экспериментальные и теоретические нормированные спектрограммы импульсных последовательностей. Теоретические и экспериментальные спектрограммы, относящиеся к одной скважности импульсов, объедините в один рисунок.

1.4. Содержание отчета

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- структурную схему АС с перестраиваемым гетеродином;
- рисунки спектрограмм и осциллограмм исследуемых напряжений;
- спектрограммы экспериментальные и теоретические;
- расчетные формулы и результаты расчетов;
- выводы по результатам работы.

1.5. Контрольные вопросы

1. Нарисуйте структурную схему и поясните принцип работы АС с перестраиваемым фильтром.
2. Нарисуйте структурную схему и поясните принцип работы АС с перестраиваемым гетеродином.
3. Нарисуйте структурную схему АС параллельного анализа и поясните принцип его работы.
4. Нарисуйте структурную схему цифрового АС и поясните принцип его работы.
5. Перечислите основные параметры АС.
6. Как полоса пропускания АС влияет на разрешающую способность и чувствительность АС?
7. Как будет изменяться спектрограмма, если уменьшать полосу пропускания АС, сохраняя постоянным время обзора?

Литература по теме лабораторной работы: [1, с. 249 — 263], [2, с. 213 — 221] [3, с. 225 — 260], [4, с. 183 — 185] [5, с. 430 — 462], [6, с. 330 — 348], [7, с. 143 — 153]

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения / В.Д. Кукуш. — М.: Радио и связь, 1985. — 368 с.
2. Кушнир Ф.В. Измерения в технике связи / Ф.В. Кушнир, В.Г. Савенко, С.М. Верник. — М.: Высш. шк., 1976. — 432 с.
3. Мирский Г.Я. Электронные измерения / Г.Я. Мирский. — М.: Радио и связь, 1986 — 440 с.
4. Основы метрологии и электрические измерения. Учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. — 6 изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
5. Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 512 с.
6. Нефедов В.И. Метрология и радиоизмерения / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков. — М.: Высш. шк., 2006. — 526 с.
7. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения. Учебное пособие для вузов / Б. В. Дворяшин. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
8. Измеритель L , C , R универсальный Е7-11. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / НИИРИТ. — Каунас: НИИРИТ, 1980. — 97 с.