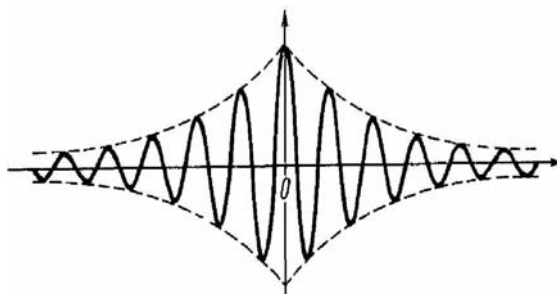


*З.Ж. Жанабаев, С.Б. Тарасов,  
Н.Е.Алмасбеков*

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

*Лабораторный практикум*



Алматы 2002

73

**Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б., Алмасбеков Н.Е.**

# **СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Учебное пособие**

БКК 22:317я73

Ж  $\frac{1604030000}{460(05) - 02}$

**Алматы 2002**

БКК 22:317я73

Ж27

*Рекомендовано к изданию  
Ученым советом физического факультета и  
Редакционно-издательским советом КазНУ им. аль-Фараби*

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор **А.С.Дробышев**;  
кандидат физико-математических наук **Ю.В.Архинов**

**Жанабаев З.Ж. и др.**

Ж27 Статистические методы радиофизики и электроники.  
Лабораторный практикум/ З.Ж. Жанабаев, С.Б. Тарасов,  
Н.Е. Алмасбеков. –Алматы: "Ақпарат" баспа үйі, 2002. –117 с.  
ISBN 9965-12-186-9

Учебное пособие посвящено описанию лабораторных работ,  
рекомендуемых для специальности "Радиофизика и электроника".

Ж  $\frac{1604030000 - 212}{460(05) - 02}$  323 - 01

БКК 22:317я73

ISBN 9965-12-186-9

© Издательство "Ақпарат" баспа үйі, 2002.

# Лабораторная работа №1

## ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ И ДИСПЕРСИИ РЕГУЛЯРНЫХ И СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

### 1.1. Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом работы приборов для измерения средних значений и дисперсии случайных сигналов.
2. Освоить методику измерений на примере исследования сигналов типичной формы (прямоугольной, пилообразной и синусоидальной) и стохастических сигналов от генератора шума или датчика термоанемометра, помещенного в турбулентную среду.

### 1.2. Краткое теоретическое введение.

Случайный процесс можно представить в виде

$$x(t) = \bar{x}(t) + x'(t), \quad (1.1)$$

где  $\bar{x}(t)$  - постоянная составляющая физической величины, характеризующей процесс,  $x'(t)$  - флуктуационная компонента.

Из (1.1) непосредственно следует, что среднее значение флуктуации равно нулю:  $\langle x'(t) \rangle = 0$ .

Реализации случайного процесса различаются лишь флуктуациями, постоянные компоненты для всех реализаций совпадают:

$$x_j(t) = \bar{x}(t) + x'_j(t). \quad (1.2)$$

Эту запись еще можно несколько уточнить, выделив постоянную и переменную составляющие флуктуации:

$$x_j(t) = \xi_0 + \xi(t). \quad (1.3)$$

Здесь  $\xi_0$  - постоянный параметр, случайным образом меняющийся от реализации и равный в среднем нулю. Используя (1.2) и (1.3) вместо (1.1) можем написать:

$$x_j(t) = \bar{x} + \xi_0 + \xi(t). \quad (1.4)$$

Усреднение будет влиять только на величины переменной компоненты  $\xi(t)$ ; ее дисперсия с ростом времени усреднения  $T$  будет стремиться к нулю:

$$\sigma_T^2 = \langle (\xi(t))^2 \rangle_T \rightarrow 0. \quad (1.5)$$

В пределе  $T \rightarrow \infty$  получим

$$\langle x(t) \rangle_t = \bar{x} + \xi_0, \quad (1.6)$$

или, если  $\bar{\xi}_0 = 0$

$$\langle x(t) \rangle_t = \bar{x}. \quad (1.7)$$

Процессы, для которых выполняется условие (1.7) называют эргодическими. Эргодический процесс при временном осреднении теряет случайный характер и стремится к некоторой величине,

равной ее среднему статистическому значению. Это свойство позволяет упростить измерение статистических средних: вместо громадного массового опыта по набору и усреднению большого количество реализаций случайного процесса оказывается достаточным усреднение одной (но длинной) реализации.

В случае эргодического процесса возрастает ценность отдельной реализации, т.к. путем ее обработки и усреднения можно получить нужные статистические характеристики процесса, не обращаясь к усреднению по ансамблю.

Возможность определения статистических характеристик стационарного случайного процесса из одной его реализации представляет большой интерес для экспериментальной радиофизики.

Реальный эксперимент проводится в течение ограниченного времени  $T$ . Обычно это диктуется условиями опыта или длительностью реализации. Поэтому практические измерения основаны на использовании формулы

$$m_x^* = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt . \quad (1.8)$$

Эта величина представляет собой не истинное среднее значение, а ее оценку  $m_x^*$ . Чем больше продолжительность реализации  $T$ , тем ближе величина оценки к истинному среднему значению.

Устройство, осуществляющее осреднение согласно формуле (1.8), называется идеальным. Это один из видов аналоговых усреднителей. К другому наиболее распространенному виду относится фильтр нижних частот.

На рис. 1.1 показана схема измерения среднего значения стационарного хаотического сигнала  $x(t)$ . После усилителя  $y$ , воспроизводящего  $x(t)$  без искажений, стоит простейший интегратор в виде  $RC$ - фильтра ( $T_0=RC$ ) и прибор для измерения напряжения.

Используя закон Кирхгофа, можно получить для фильтра следующее соотношение:

$$\dot{q} + \frac{q}{RC} = 0, \quad (1.9)$$

где  $q$ - заряд на обкладках конденсатора.

Соответствующее (1.9) уравнение свободных колебаний в общем виде

$$\dot{y} + ay = 0, \quad \alpha = 1/RC \quad (1.10)$$

имеет решение

$$y(t) = e^{-\alpha(t-\theta)}, \quad (1.11)$$

где  $1/\alpha = T = RC$  – время релаксации,  $\theta$  – значение начального момента времени.

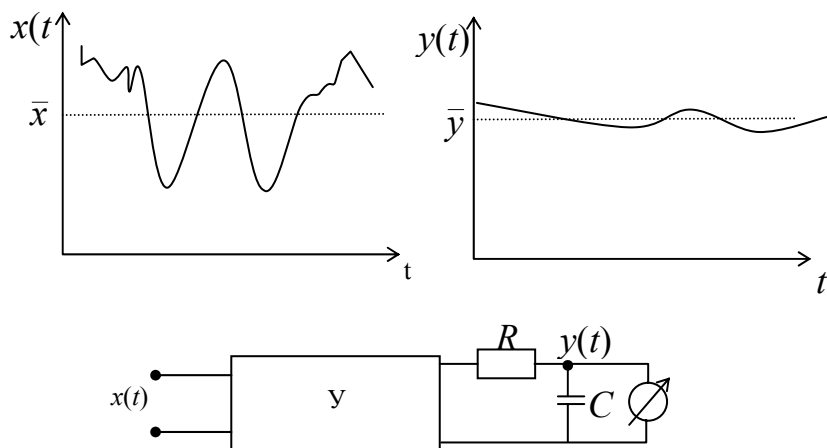


Рис. 1.1. Схема измерения среднего значения стационарного сигнала шума, использующая операцию временного усреднения.

Эффективное время усреднения фильтра зависит от формы спектра шума. Для сигнала белого шума в силу высокой плотности мод можно принять:

$$T_{\text{эфф}} = 2T,$$

где  $T=RC$  – постоянная времени  $RC$  – фильтра. В реальных условиях время усреднения  $T$  всегда конечно. Выбирается оно путем учета обеспечения необходимой точности измерений при минимальной затрате времени на измерения. Как правило, приборы для измерений средних и среднеквадратичных значений случайных сигналов позволяют производить измерения при нескольких фиксированных значениях времени осреднения. При малом времени осреднения



стрелка измерительного прибора колеблется в большом интервале так, что трудно зафиксировать какую-либо величину напряжения. В случае установки слишком большого времени осреднения много времени уходит на ожидание остановки стрелки прибора из-за её медленного приближения к среднему значению. Выбор времени осреднения считается оптимальным, если стрелка колеблется в пределах одного деления шкалы прибора. В этом случае точность измерения соответствует цене одного деления применяемого прибора. В случае использования цифрового индикатора время осреднения выбирается аналогично.

Метод дискретного усреднения используется в цифровых приборах. Принцип их работы основан на использовании алгоритма

$$m_x^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(iT_0), \quad (1.12)$$

где  $T_0$  – интервал выборок дискретных значений реализации  $x(t)$ ;  $N$  – количество выборок.

Среднеквадратичное значение сигнала можно получить, произведя выпрямление сигнала, возведение его в квадрат, осреднение, извлечение квадратного корня и измерение напряжения после этих операций стрелочным или цифровым индикатором. Существуют разные методы для получения квадратичной характеристики. Более точными являются приборы, в которых

используются операционные усилители (ОУ), включенные по схеме логарифмирующих и антилогарифмирующих усилителей. Упрощенная схема такого прибора приведена на рис. 1.2. Если предположить, что ОУ А1 и А2 – идеальные (а большинство современных ОУ можно считать таковыми), обратные токи диодов V1-V4 – малыми и постоянную времени цепи C1R2 много больше времени измерения, то выходное постоянное напряжение будет равно среднеквадратичному значению входного напряжения в масштабе, определяемом отношением сопротивлений резисторов R2/R1. В приборе, выполненном по такой схеме, может быть использован стрелочный или цифровой индикатор с линейной шкалой. Функциональная схема вольтметра среднеквадратичных значений, в основе которого лежит описанная выше схема квадрирования, усреднения и извлечения квадратного корня, приведена в разделе “Техническое описание и инструкция по эксплуатации вольтметра среднеквадратичных значений”.

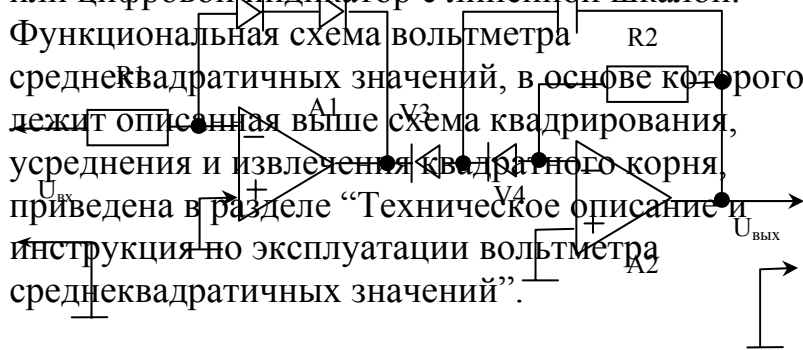


Рис.1.2. Упрощенная схема измерителя среднеквадратичных значений напряжения.

В процессе исследований наиболее часто используются следующие значения переменного напряжения:

$U_o$  – среднее значение,  $U_{cp.в}$  – средневыпрямленное,  $U_{ск}$  – среднеквадратичное,  $U_m$  – пиковое.

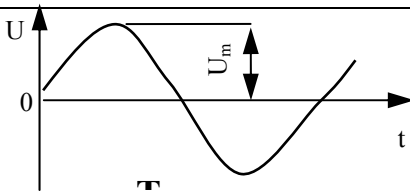
Среднее значение напряжения равно его постоянной составляющей; средневыпрямленное значение – среднему значению абсолютной величины переменного напряжения; среднеквадратичное – корню квадратному из среднеарифметического значения квадратов мгновенных значений напряжений за данный отрезок времени, а пиковое – наибольшему мгновенному значению напряжения за время измерения  $T$ . Связь между этими значениями определяется коэффициентами формы  $K_\phi$  и амплитуды  $K_a$  :

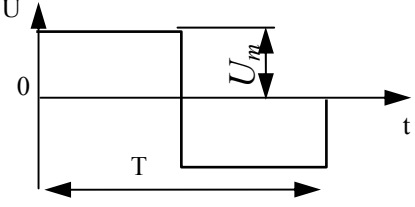
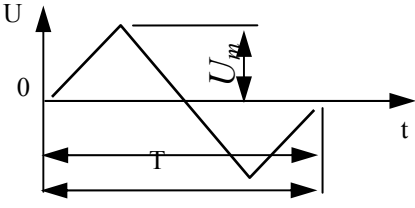
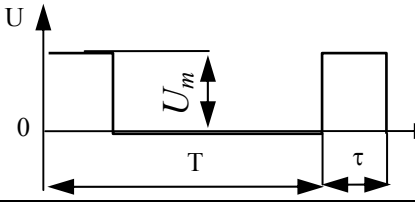
$$K_\phi = \frac{U_{ск}}{U_{cp.в}}; \quad K_a = \frac{U_m}{U_{ск}}. \quad (1.10)$$

Значения коэффициентов для напряжений некоторых форм приведены в таблице 1.

Таблица 1

Вид напряжения	$U_{ск}$	$U_{cp.в}$	$K_a$	$K_\phi$
----------------	----------	------------	-------	----------



		$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_m}{\pi}$	$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$
	$U_m$	$U_m$	1	1	
	$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	
	$U_m \sqrt{\frac{\tau}{T}}$	$U_m \cdot \frac{\tau}{T}$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$	

### 1.3 Задания.

Произвести соединение приборов (генератора сигналов специальной формы, измерителя средних значений напряжения, вольтметра среднеквадратичных значений, вольтметра средневыпрямленных значений и осциллографа)

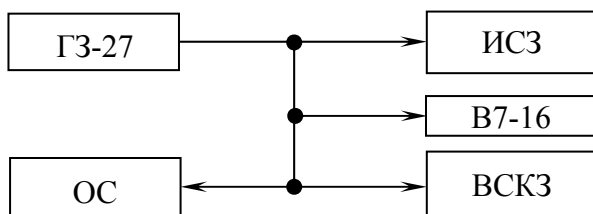


Рис. 1.3. Схема соединения приборов для измерения средних, среднеквадратичных и средневыпрямленных значений напряжения сигналов. ГЗ-27 – генератор сигналов специальной формы, ИСЗ – измеритель средних значений, ВСКЗ – вольтметр среднеквадратичных значений, В7-16 – вольтметр средневыпрямленных значений.

согласно схеме, указанной на рис. 1.3. Общий вид измерительной системы показан на рис. 1.4.



Рис 1.4. Общий вид системы приборов для определения средних значений дисперсии случайных сигналов.

Подготовить приборы к измерениям, руководствуясь описаниями.

1. Для произвольно выбранной частоты измерить пиковое и средневыпрямленное значения сигналов прямоугольной, синусоидальной, треугольной и пилообразной формы при одинаковой величине среднеквадратичных значений. Для измерения амплитуды сигнала использовать осциллограф. Повторить опыты не менее 5 раз, произведя установку нуля и тарировку осциллографа, вольтметров средневыпрямленных (СВ) и среднеквадратичных значений (СКЗ) сигналом прямоугольной формы.

Сделать подобные измерения для сигнала случайного шума. Перед включением генератора шума или термоанемометра ознакомиться с описанием и инструкцией по эксплуатации этих приборов.

По полученным данным измерений, используя формулу (1.10), определить  $K_{\phi}$ ,  $K_a$ . Построить график  $\delta_{\phi} = f(\delta_T)$ , где  $\delta_{\phi} = (K_{\phi\phi} - 1)$ ,  $\delta_T = (K_{\phi T} - 1)$  – экспериментальные и теоретические значения величины  $\delta$ , используемой при информационно-энтропийном анализе случайных процессов. Теоретические значения  $K_{\phi T}$  взять из таблицы 1. Дать анализ сравнения экспериментальных и теоретических значений  $\delta$ .

2. Произвести измерения среднего значения и среднеквадратичной величины пульсаций напряжения для трех сигналов, содержащих постоянную и переменную составляющие напряжения, от генератора случайного шума или термоанемометра. Сделать оценку точности измерений. Результаты измерений представить в виде таблицы 1.1.

**Таблица 1.1**

<b>№ п/п</b>	<b>Форма сигнала или характерный параметр</b>	<b>Измеряемая величина</b>	<b>Ошибка измерений</b>

**Контрольные вопросы:**

1. В каком случае процесс  $x(t) = a \cos(\omega t + \varphi)$  считается случайным?
2. Чем отличается оценка среднего значения

- процесса от истинного среднего значения?
3. Какие операции необходимо произвести с сигналом, чтобы получить среднеквадратичное значение сигнала?

## **Лабораторная работа №2**

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

### **2.1. Цель работы:**

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы цифровых приборов для измерения статистических характеристик электрических сигналов.
2. Научиться производить измерения нормированных функций автокорреляции и взаимной корреляции, плотности распределения вероятностей и функции распределения вероятностей на примере гармонического сигнала и гауссовского шума.

### **2.2. Краткое теоретическое введение.**

Основные свойства случайных процессов можно описать, используя четыре статистические функции:



- а) среднее значение квадрата характеристики (сигнала) случайного процесса;
- б) плотность распределения;
- в) корреляционная функция;
- г) спектральная плотность.

Среднее значение квадрата сигнала дает информацию об интенсивности процесса.

Плотность распределения характеризует распределение вероятностей в фиксированных точках. Автокорреляционная функция и спектральная плотность дают подробную информацию о процессе во времени и по частоте. Функция спектральной плотности формально не дает дополнительной информации по сравнению с автокорреляционной функцией, т.к. эти функции связаны взаимным преобразованием Фурье. Они дают информацию различного типа, но при решении той или иной задачи получение информации одного типа может оказаться более желательным.

Среднее значение квадрата сигнала случайного процесса  $x(t)$  выражается через плотность распределения следующим образом:

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx. \quad (2.1)$$

Плотность распределения, или плотность распределения вероятностей, равна

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[ \lim_{T \rightarrow 0} \frac{T_x}{T} \right]. \quad (2.2)$$

Вероятность того, что мгновенное значение  $x(t)$  не превышает величины  $x$ , характеризуется функцией  $P(x)$ , называемой функцией распределения. Она связана с плотностью распределения соотношением

$$P(x) = P[x(t) \leq x] = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi) d\xi. \quad (2.3)$$

В литературе в определении функции распределения  $P(x)$  случайной величины  $\xi$  полагают  $P(x) = P(\xi < x)$ , а не  $P(\xi \leq x)$ . Если  $P(x)$  непрерывна, то это одно и то же.

Нормированная корреляционная функция для центрированных сигналов  $x$  и  $y$  имеет вид:

$$\bar{R}_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y}}{\sqrt{\overline{x^2}} \cdot \sqrt{\overline{y^2}}}. \quad (2.4)$$

Для центрированного сигнала нормированная автокорреляционная функция равна

$$\bar{R}_x(\tau) = \frac{\overline{x(t) \cdot x(t + \tau)}}{x^2}. \quad (2.5)$$

Формально частотный спектр  $E(\omega)$  случайного процесса  $x(t)$ , обладающего свойством стационарности, вводится посредством корреляции  $R(\tau)$  этого процесса с помощью преобразования Фурье:

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (2.6)$$

где через  $\omega$  обозначена круговая частота.

Так как корреляция  $R(\tau)$  стационарного процесса симметрична относительно задержки времени  $\tau$ , то спектр (2.6) есть вещественная функция частоты и его можно представить еще и так:

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \cos(\omega\tau) R(\tau) d\tau. \quad (2.7)$$

Справедливо и обратное преобразование Фурье:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega = 2 \int_0^{\infty} \cos(\omega\tau) E(\omega) d\omega, \quad (2.8)$$

откуда для частного случая  $\tau=0$  имеем:

$$\sigma^2 = R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) d\omega = 2 \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega, \quad (2.9)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия случайного процесса.

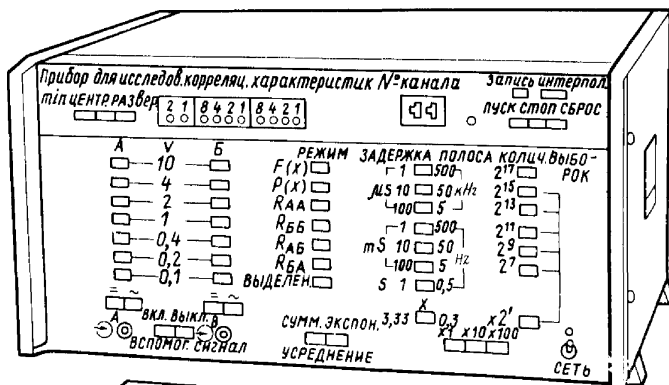
Соотношение (2.9) позволяет понять физический смысл  $E(\omega)$ . Оно показывает что мощность рассматриваемых колебаний, равная дисперсии  $\sigma^2$ , есть сумма мощностей отдельных гармонических составляющих этих колебаний. На этом основании частотный спектр  $E(\omega)$  называют *спектром мощности*.

Для измерения перечисленных выше статистических характеристик (функций) используется система приборов Х6-4, Х6-8, подробные описания и инструкции по

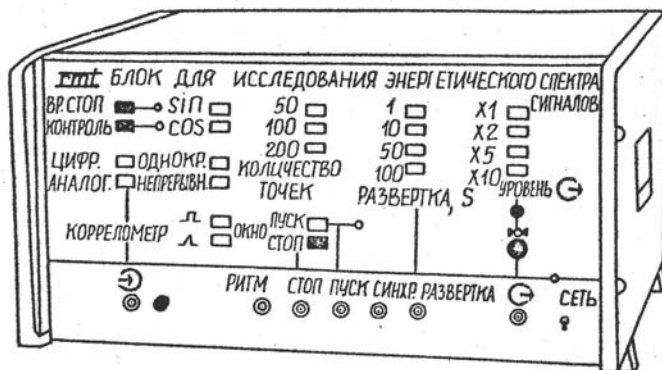
эксплуатации которых прилагаются к приборам. Внешний вид экспериментальной установки и блоков системы приборов для измерения характеристик сигналов приведен на рис. 2.1 и 2.2.



Рис. 2.1. Общий вид экспериментальной установки.



а



б

Рис. 2.2. Внешний вид блоков для измерения статистических характеристик сигналов: а - прибора Х6-4 для исследования плотности распределения и корреляционных функций; б - блока для исследования энергетического спектра сигналов.

### 2.3. Задания.

Перед работой необходимо изучить техническое описание, инструкцию по эксплуатации к прибору Х6-4 (см. Приложение 2) и ознакомиться со схемами, приведенными в альбоме (см. альбом схем к прибору Х6-4). Более внимательно и подробно изучить схемы основных узлов прибора: преобразователей аналог-код, устройства задержки и умножителя цифрового.

В присутствии преподавателя или сотрудника лаборатории подготовить прибор к работе.

Подсоединить источник синусоидального сигнала к разъему на передней панели коррелятора.

Измерить дискретные значения функции корреляции, распределения и плотности распределения вероятностей для синусоидального сигнала.

Произвести аналогичные измерения, подав на вход измерителя корреляционных характеристик сигнал от генератора шума.

#### *Таблица 1*

**Характеристики исследуемого сигнала**

Номер точки $n$	Плотность распределения $p(x)$	Функция распределения $P(x)$	Автокорреляционная функция $R_x(\tau)$
--------------------	-----------------------------------	---------------------------------	---

...			
n			

Результаты измерений представить в виде таблиц и графиков, используя обозначения, принятые в теории.

### **Контрольные вопросы:**

1. Как выбираются шаг задержки и оптимальное время усреднения в процессе измерения автокорреляционной функции?
2. В чем заключается принцип работы узлов прибора, обеспечивающих измерение вероятностных характеристик?
3. Какие этапы обработки проходят сигналы в цифровом измерителе корреляционных характеристик?

## **Лабораторная работа №3**

### 3.1. Цель работы:

1. Освоить методику измерений автокорреляционных функций случайных сигналов.
2. Проанализировать связь формы автокорреляционной функции с формой исследуемого сигнала.

### 3.2. Краткое теоретическое введение.

Корреляционная функция и коэффициент корреляции.

Взаимосвязь между случайными величинами  $y_p$  и  $y_q$  характеризует функция корреляции, имеющая название корреляционный момент, или просто корреляция

$$B_{pq} = \langle (y_p - \bar{y}_p)(y_q - \bar{y}_q) \rangle, \quad (3.1)$$

где  $\bar{y}_p$  и  $\bar{y}_q$  - средние значения, соответствующие постоянной составляющей случайных процессов. Большое значение (по модулю) величины (3.1) свидетельствует о сильной статистической связи, т.е. флуктуации в значительной степени взаимообусловлены. Малое значение корреляции соответствует слабой статистической связи, т.е. флуктуации в значительной степени независимы.



Корреляция как мера статистической связи имеет один существенный недостаток: ее значение зависит от амплитуд самих флуктуаций. Более удобным для анализа является коэффициент корреляции, представляющий собой корреляцию, нормированную произведением стандартных отклонений рассматриваемых случайных величин. Коэффициент корреляции, соответствующий функции корреляции (3.1), выглядит следующим образом:

$$R_{pq} = \frac{B_{pq}}{\sigma_p \sigma_q} = \frac{\overline{y_p y_q} - \bar{y}_p \bar{y}_q}{\sqrt{(\overline{y_p^2} - \bar{y}_p^2)(\overline{y_q^2} - \bar{y}_q^2)}} . \quad (3.2)$$

Из (3.2) видно, что коэффициент корреляции ограничен по абсолютной величине

$$-1 \leq R_{pq} \leq +1, \quad (3.3)$$

причем  $R_{pq}=0$  для статистических независимых  $y_p$  и  $y_q$ . В соответствии с (3.3)  $B_{pq}$  также может иметь как положительные, так и отрицательные значения:

$$-\sigma_{y_p} \sigma_{y_q} \leq B_{pq} \leq \sigma_{y_p} \sigma_{y_q} . \quad (3.4)$$

Если  $y_p$  и  $y_q$  - значения одного и того же случайного процесса в разные моменты времени:

$$y_p = x(t), \quad y_q = x(t + \tau) \equiv x_\tau, \quad (3.5)$$

где  $\tau$  - временной сдвиг, то соответствующая корреляционная функция имеет вид:

$$B(t, \tau) \equiv \overline{xx_\tau} - \bar{x} \cdot \bar{x}_\tau . \quad (3.6)$$

Если процесс стационарен, то остается зависимость только от  $\tau$ , т.е.

$$B(\tau) = \overline{xx_\tau} - \bar{x}^2, \quad (3.7)$$

тогда

$$R(\tau) = \frac{\overline{xx_\tau} - \bar{x}^2}{\sigma^2}. \quad (3.8)$$

Необходимо отметить, что  $B(\tau)$  и  $R(\tau)$  – четные функции  $\tau$ :

$$B(-\tau) = B(\tau), \quad R(-\tau) = R(\tau),$$

т.к. согласно (3.1)  $B_{pq} = B_{qp}$ .

При  $\tau = 0$  значение функции корреляции максимальное:

$$B(\tau)_{\max} = B(0) = \sigma^2.$$

Статистическая зависимость между  $x$  и  $x_\tau$  становится все более слабой при увеличении  $\tau$ ,  $\overline{xx_\tau} \rightarrow \bar{x} \cdot \bar{x}_\tau = \bar{x}^2$ , поэтому

$$B(\infty) = 0, \quad R(\infty) = 0.$$

Измерение функции  $B(\tau)$  с ростом  $\tau$  может быть монотонным или принимать осциллирующий характер в зависимости от вида частотного спектра исследуемого случайного процесса. Подобным образом меняется и коэффициент корреляции.

На практике обычно из полного сигнала выделяется его переменная составляющая путем установки конденсатора на входе измерителя корреляционных характеристик. Тогда средние значения таких центрированных сигналов равны нулю, и взаимный коэффициент корреляции для двух сигналов  $x$  и  $y$  принимает вид:

$$R_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y}}{\sqrt{\overline{x^2}} \sqrt{\overline{y^2}}} . \quad (3.9)$$

Для центрированного сигнала нормированная автокорреляционная функция равна

$$R_x(\tau) = \frac{\overline{x(t) \cdot x(t + \tau)}}{\overline{x^2}} . \quad (3.9)$$

Примеры автокорреляционных функций приведены на рис. 3.1 и 3.2 и табл. 3.1.

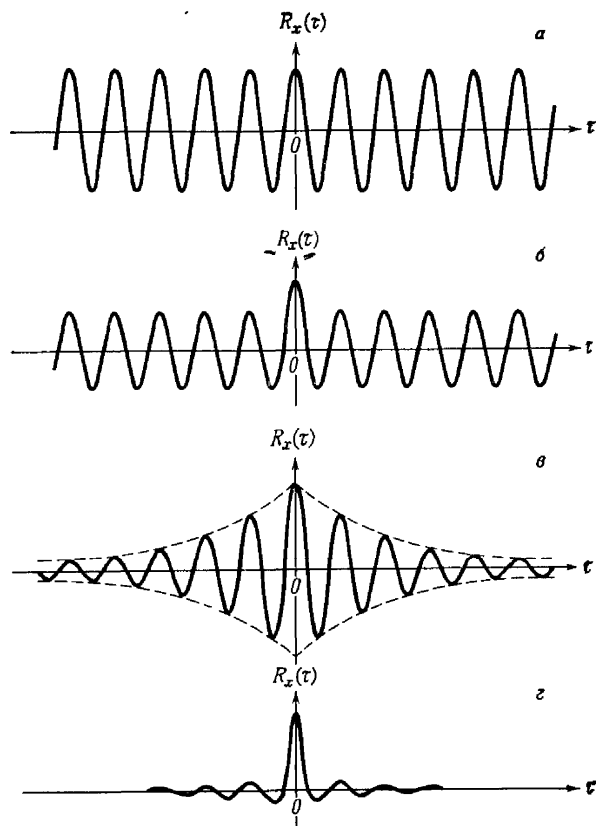


Рис. 3.1. Графики автокорреляционных функций (автокоррелограммы): *a* — гармонический процесс; *b* — сумма гармонического процесса и случайного шума; *v* — узкополосный случайный шум; *z* — широкополосный случайный шум.

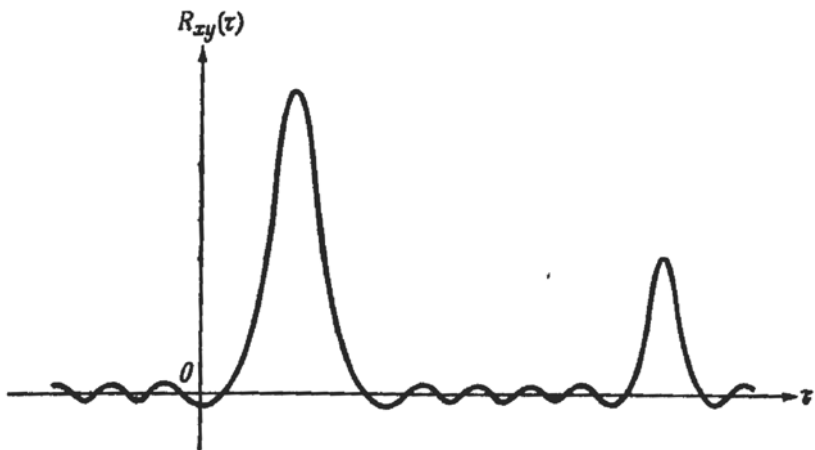
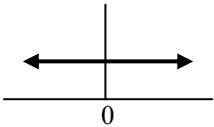
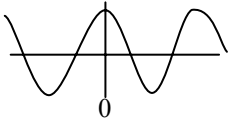
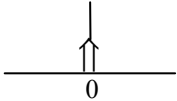
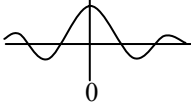

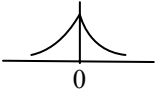
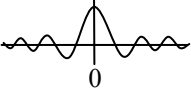
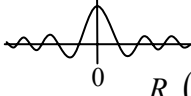


Рис. 3.2. Типичный график взаимной корреляционной функции (взаимная коррелограмма).

Таблица 3.1

### Некоторые автокорреляционные функции

Тип	Автокорреляционная функция	
Постоянная величина		$R_x(\tau) = c^2$
Гармонический процесс		$R_x(\tau) = \frac{X^2}{2} \cos 2\pi f_0 \tau$
Белый шум		$R_x(\tau) = a\delta(\tau)$
Белый шума на выходе фильтра нижних частот		$R_x(\tau) = aB \left( \frac{\sin 2\pi B \tau}{2\pi B \tau} \right)$
Белого шума на выходе полосового фильтра		$R_x(\tau) = aB \left( \frac{\sin \pi B \tau}{\pi B \tau} \right) \cos 2\pi f_0 \tau$
Экспонента		$R_x(\tau) = e^{-a \tau }$
Экспонента, умноженная на косинус		$R_x(\tau) = e^{-a \tau } \cos 2\pi f_0 \tau$
Экспонента, умноженная на синусоидальную функцию		$R_x(\tau) = e^{-a \tau } (\cos 2\pi f_0 \tau + c \sin 2\pi f_0  \tau )$

Цифровые коррелометры. Устройства этого типа, осуществляющие дискретизацию времени и квантование по уровню, производят вычисления согласно алгоритмам:

$$R_x(k\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{кв}(i\Delta\tau)x_{кв}(i\Delta\tau + k\Delta\tau), \quad (3.10)$$

$$R_{xy}(k\Delta\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{кв}(i\Delta\tau)y_{кв}(i\Delta\tau + k\Delta\tau), \quad (3.11)$$

где  $x_{кв}(i\Delta\tau)$  и  $y_{кв}(i\Delta\tau)$  – квантованные значения центрированных реализаций  $x(t)$  и  $y(t)$  в дискретные моменты времени;  $k\Delta\tau$  – интервал сдвига.

Такие устройства позволяют получить высокую точность и представляют собой специализированные электронные вычислительные установки, многие блоки и узлы которых аналогичны применяемым в универсальных цифровых машинах.

На рис. 3.3. показана функциональная схема цифровых коррелометров, работа которых основана на методе умножения. На этой схеме приведены лишь основные узлы. Подробное описание таких узлов дано в техническом описании прибора для исследования корреляционных характеристик Х6-4. Внешний вид блока приведен на рис. 3.4.

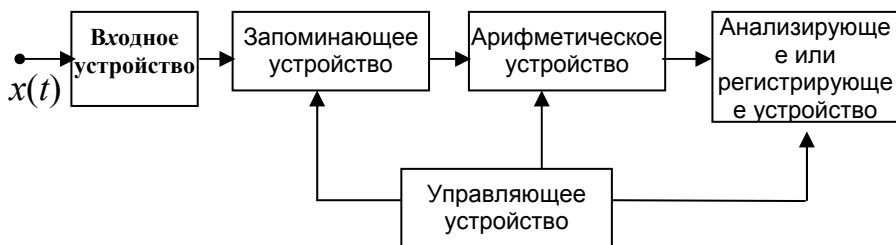


Рис. 3.3. Общая функциональная схема цифрового коррелометра.

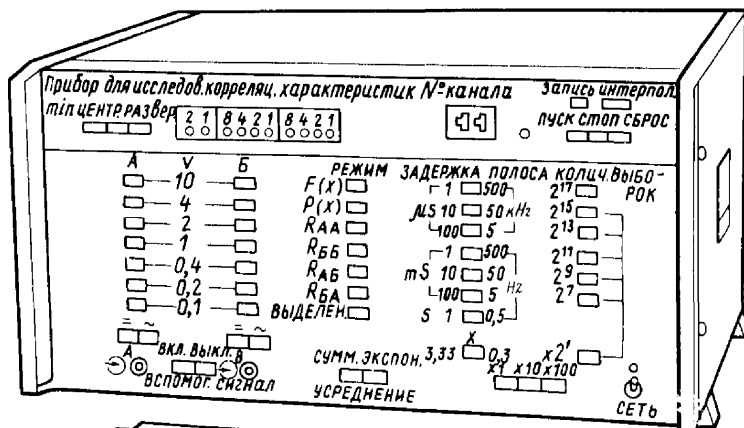


Рис. 3.4. Внешний вид прибора Х6-4.

### 3.3. Описание установки и методика измерений.

Для исследования корреляционных характеристик используется выходной сигнал генератора шума или термоанемометра.

В соответствии с описанием прибора для корреляционных характеристик Х6-4 подготовить его к работе (разд. 8. Подготовка к работе). Затем, соблюдая требования разд. 9 Порядок работы, произвести необходимые измерения (см. Приложение 2).



### 3.4. Задания.

1. Соединить приборы в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.5.
2. Измерить дискретные значения автокорреляционных функций сигналов специальной формы (синусоидальной, треугольной, прямоугольной) и сигнала случайного шума. Произвести запись дискретных значений автокорреляционных функций для 3-х сигналов разной формы, полученных путем смешения синусоидального сигнала и сигнала широкополостного шума при разных отношениях сигнал/шум (большом, среднем, малом).

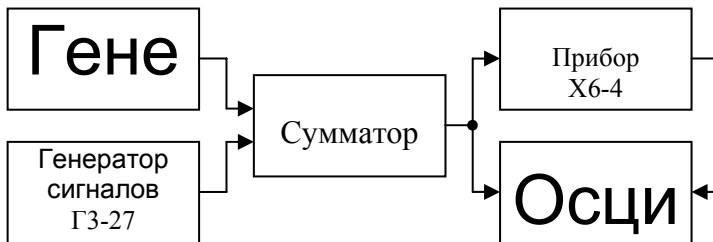


Рис. 3.5. Схема соединения приборов для исследования корреляционных функций случайных сигналов.

Построить графики  $R=R(\tau)$  для исследованных сигналов, сделать сравнение и анализ ошибок измерений.

**Распределение дискретных значений  
автокорреляционной функции**

№ канала задержки	$\tau$	$R(\tau)$
00		
.		
.		
99		

3. По форме полученных автокорреляционных функций, используя таблицу 3.1, определить, к какому типу относятся исследуемые сигналы.

**Контрольные вопросы:**

1. Чем отличается корреляционный момент от коэффициента корреляции?
2. Чему равен коэффициент корреляции для статистически независимых процессов?
3. Как определить дисперсию по известной функции автокорреляции?

# Лабораторная работа №4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

### 4.1. Цель работы:

1. Изучить принцип работы приборов для измерения функций распределения и плотности распределения вероятностей случайных сигналов.
2. Освоить методику измерений на примере исследования указанных характеристик для сигналов специальной формы (прямоугольной, пилообразной и синусоидальной).
3. Научиться исследовать функции распределения и плотности распределения вероятностей случайных сигналов разной формы.

### 4.2. Краткое теоретическое введение.

#### 4.2.1. Плотность распределения.

Плотность распределения случайного процесса определяет вероятность того, что значения характеристик процесса в произвольный момент времени будут находиться в определенном интервале. На рис. 4.1. показан пример реализации процесса как функции времени.

Вероятность того, что значения  $x(t)$  попадают в интервал от  $x$  до  $(x+\Delta x)$ , можно определить,

вычисляя отношение  $T_x/T$ , где  $T_x$  — суммарная продолжительность нахождения процесса в интервале  $(x, x+\Delta x)$  за время наблюдения  $T$ . Это отношение точнее описывает вероятность такого события при стремлении  $T$  к бесконечности. Записать данное утверждение можно следующим образом:

$$P[x < x(t) \leq x + \Delta x] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T}. \quad (4.1)$$

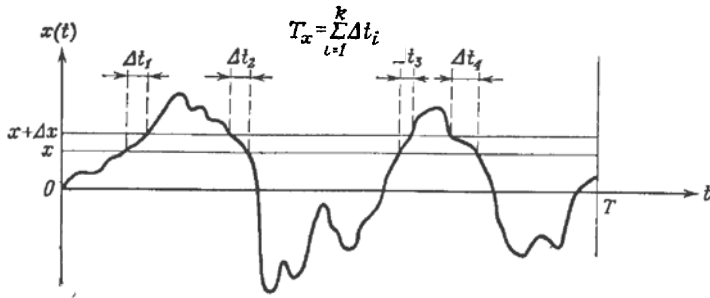


Рис. 4.1. Схема определения плотности распределения вероятности.

В случае малых  $\Delta x$  *одномерная плотность распределения*  $p(x)$  определяется соотношением

$$P[x < x(t) \leq x + \Delta x] \approx p(x)\Delta x \quad (4.2)$$

Более строго

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right]. \quad (4.3)$$

Плотность распределения  $p(x)$  есть всегда действительная неотрицательная функция.

Вероятность того, что мгновенное значение  $x(t)$  не превышает некоторой величины  $x$ ,

характеризуется функцией  $P(x)$ . Она равна интегралу от плотности распределения в пределах от минус бесконечности до  $x$  и называется *функцией распределения*, или *кумулятивной функцией распределения*:

$$P(x) = P[x(t) \leq x] = \int_{-\infty}^x p(\xi) d\xi. \quad (4.4)$$

Функция распределения ограничена значениями нуль и единица, так как вероятность того, что  $x(t)$  меньше  $-\infty$ , очевидно, равна нулю, а вероятность того, что  $x(t)$  меньше  $+\infty$ , равна единице (достоверное событие). Вероятность попадания  $x(t)$  в некоторый интервал  $(x_1, x_2)$  составляет

$$P(x_2) - P(x_1) = P[x_1 < x(t) \leq x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (4.5)$$

Среднее значение функции  $x(t)$  рассчитывается через плотность распределения следующим образом:

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx. \quad (4.6)$$

Аналогично среднее значение квадрата

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx, \quad (4.7)$$

Его называют центральным моментом второго порядка, или дисперсией.

Для иллюстрации практического значения плотности распределения рассмотрим четыре примера реализации, которые могут встретиться на практике: а) гармоническое колебание; б)

гармоническое колебание процесса и случайного шума; в) случайный узкополосный шум; г)

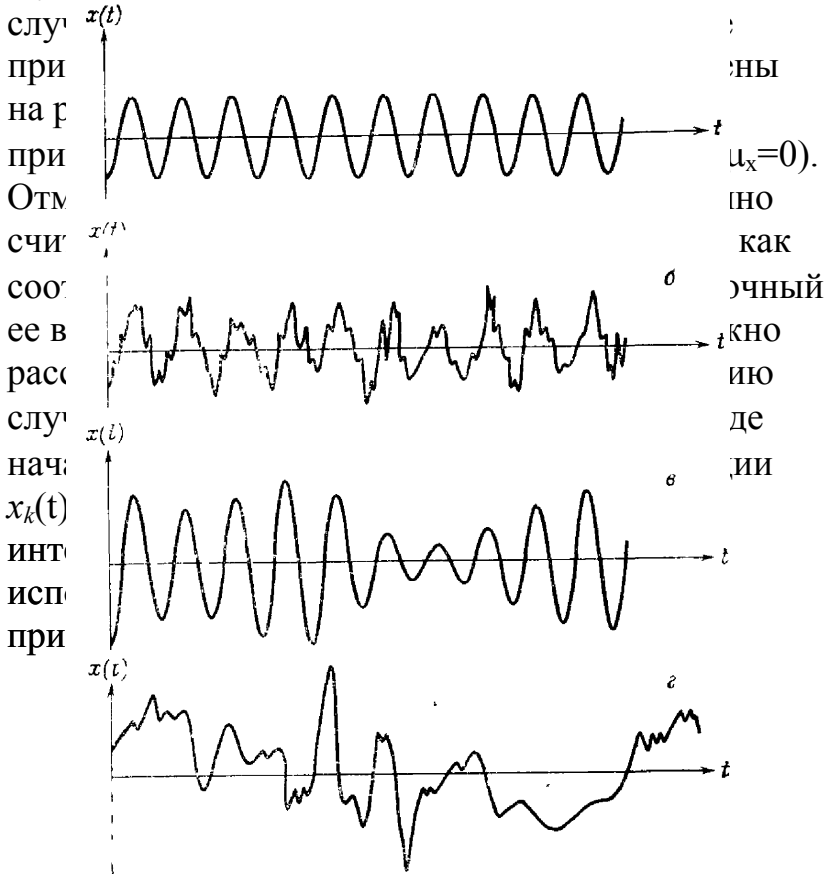


Рис. 4.2. Четыре примера функций времени: *a* – гармоническое колебание; *б* – гармоническое колебание процесса и случайного шума; *в* – узкополосный случайный шум; *г* – широкополосный случайный шум.

Типичные графики плотности распределения в виде функций непрерывного аргумента (зависимость  $p$  от  $x$ ) для всех четырех примеров представлены на рис. 4.3. Кривая чашеобразной формы, характеризующая плотность распределения гармонического колебания (рис.4.3а), определяется формулой:

$$p(x) = \begin{cases} (\pi\sqrt{X^2 - x^2})^{-1} & \text{при } |x| < X, \\ 0 & \text{при } |x| \geq X. \end{cases} \quad (4.8)$$

Кривые колоколообразной формы (рис. 4.3в и г) характеризуют узкополосный и широкополосный случайные процессы. В идеальном случае эти кривые плотности распределения описываются классической формулой Гаусса:

$$p(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} e^{-x^2/2\sigma_x^2}, \quad (4.9)$$

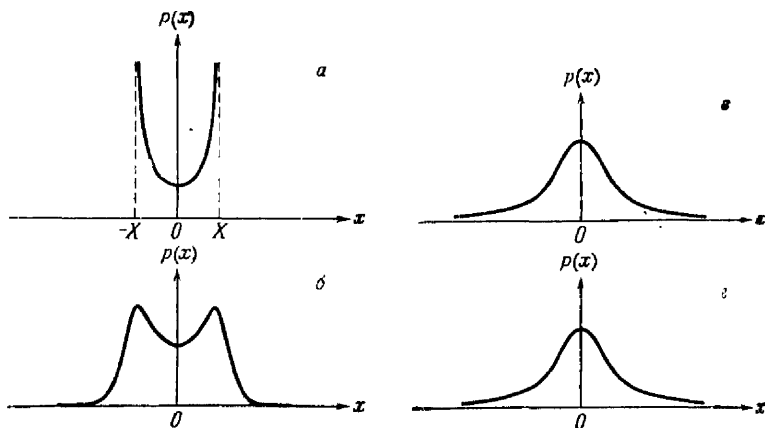


Рис. 4.3. Графики плотности распределения: а – гармонический процесс; б – сумма гармонического процесса и случайного шума; в – узкополосный случайный шум; г – широкополосный случайный шум.

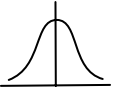
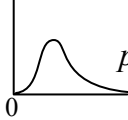
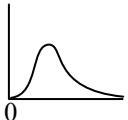
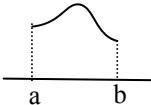
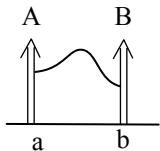
Плотность распределения суммы гармонического колебания и случайного шума обладает характерными чертами плотностей распределения обоих этих процессов, как это видно из рис. 4.3б. Приведенные на рис. 4.3 примеры показывают, как меняется вид кривой плотности распределения при переходе от гармонического процесса к широкополосному случайному процессу. Некоторые плотности распределения, встречающиеся на практике, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

### Некоторые плотности распределения

Вид распределения	Плотность распределения
Дискретное	$p(x) = A\delta(x-a) + B\delta(x-b) + \dots$ $\dots + N\delta(x-n),$ <p style="text-align: center;">где <math>A+B+\dots+N=1</math></p> 
Однородное (прямоугольное)	 $p(x) = \begin{cases} (b-a)^{-1} & \text{при } a \leq x \leq b, \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$
Гармонического процесса	 $p(x) = \begin{cases} \left(\pi\sqrt{X^2 - x^2}\right)^{-1} & \text{при } x < X, \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$



Гауссовское (нормальное)	 $p(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} e^{-(x-\mu_x)^2 / 2\sigma_x^2}$
Рэлея	 $p(x) = \begin{cases} \frac{x}{c^2} e^{-x^2/2c^2} & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$
Максвелла	 $p(x) = \begin{cases} \frac{x^2}{c^3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-x^2/2c^2} & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{при других } x \end{cases}$
Усеченное	 <p>В предположении, что исходная плотность распределения <math>p_1(x)</math> определена на интервале <math>(-\infty, \infty)</math>, усеченное распределение имеет вид <math>p(x) = Cp_1(x)</math> при <math>a \leq x \leq b</math>; <math>p(x) = 0</math> при других <math>x</math>, где</p> $\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = C \int_a^b p_1(x) dx = 1$
Срезанное	<p>В предположении, что исходная плотность распределения <math>p_1(x)</math> определена на интервале <math>(-\infty, \infty)</math>, срезанное распределение имеет вид</p>  $p(x) = \begin{cases} p_1(x) & \text{при } a < x < b, \\ A\delta(x-a) & \text{при } x = a, \\ B\delta(x-b) & \text{при } x = b, \\ 0 & \text{при } x < a \text{ или } x > b, \end{cases}$ <p>где <math>\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(x) dx + A + B = 1</math></p>

Измерение и анализ плотности распределения физического процесса позволяет установить вероятностные законы для его мгновенных значений. Эту функцию можно использовать

также и для того, чтобы отличить гармонический процесс от случайного. Кроме того, плотность распределения дает возможность опытному специалисту выявить нелинейные физические эффекты.

#### 4.2.2. Совместная плотность распределения.

Совместная плотность распределения двух случайных процессов определяет вероятность того, что значения процессов в произвольный момент времени будут заключены одновременно в двух определенных интервалах. Для примера рассмотрим две реализации  $x(t)$  и  $y(t)$ , представленные на рис. 4.4. Вероятность того, что *одновременно* значения  $x(t)$  заключены в интервале от  $x$  до  $x+\Delta x$ , а значения  $y(t)$  — в интервале от  $y$  до  $y+\Delta y$ , можно определить, вычисляя отношение  $T_{x,y}/T$ , где  $T_{x,y}$  — суммарная продолжительность одновременного нахождения значений  $x(t)$  и  $y(t)$  в интервалах  $(x, x+\Delta x)$  и  $(y, y+\Delta y)$  соответственно за время наблюдения  $T$ . При стремлении  $T$  к бесконечности это отношение будет точнее описывать вероятность такого события. *Совместную плотность распределения* можно определить теперь как величину

$$p(x, y) = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_{x,y}}{T} \right] \quad (4.10)$$

Плотность распределения  $p(x, y)$  всегда действительна и неотрицательна.

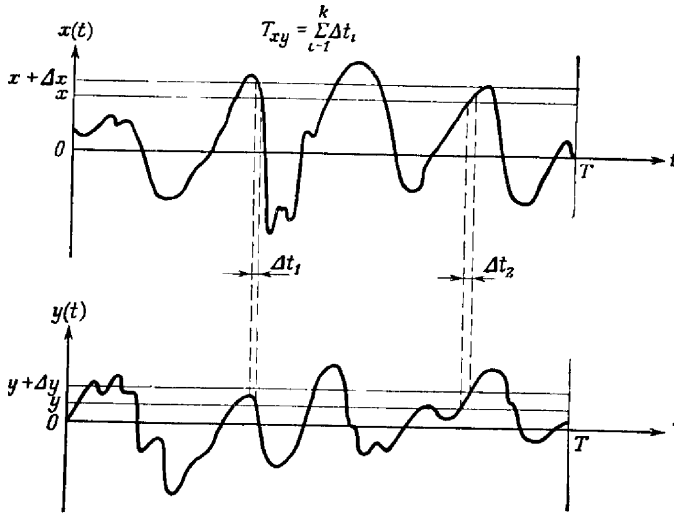


Рис. 4.4. Определение совместной плотности распределения.

Вероятность того, что мгновенные значения  $x(t)$  и  $y(t)$  не превышают некоторых величин  $x$  и  $y$ , характеризуется *совместной функцией распределения*

$$P(x, y) = P[x(t) \leq x, y(t) \leq y] = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y p(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (4.11)$$

Для статистически независимых процессов,

$$p(x, y) = p(x)p(y), \quad (4.12)$$

т. е. совместная плотность распределения равна произведению одномерных плотностей распределения.

На рисунке 4.5 приведен типичный график совместной плотности распределения как функции двух непрерывных аргументов (зависимость  $p$  от

аргументов  $x, y$ ) для двух случайных процессов. Заметим, что график имеет три оси координат. Объем, заключенный под поверхностью, соответствующей совместной плотности распределения, в пределах прямоугольника, ограниченного прямыми  $x=x_1, x=x_2, y=y_1, y=y_2$ , равен вероятности того, что значения  $x(t)$  и  $y(t)$  в любой данный момент одновременно будут попадать в соответствующие интервалы. Суммарный объем под всей поверхностью составляет, очевидно, единицу, так как вероятность того, что два случайных процесса одновременно принимают какие-либо произвольные значения, должна быть равна единице.

Совместная плотность распределения используется для вероятностного описания явлений, которые характеризуются двумя процессами, некоторым образом связанными между собой. Часто бывает необходимо найти связь между вероятностью осуществления двух событий и вероятностью осуществления одного из них. Случаи использования рассматриваемой функции встречаются при вычислении ожидаемого числа пересечений нулевого или произвольного порогового уровня некоторым физическим процессом, а также при прогнозе распределения пиковых значений и экстремальных величин.

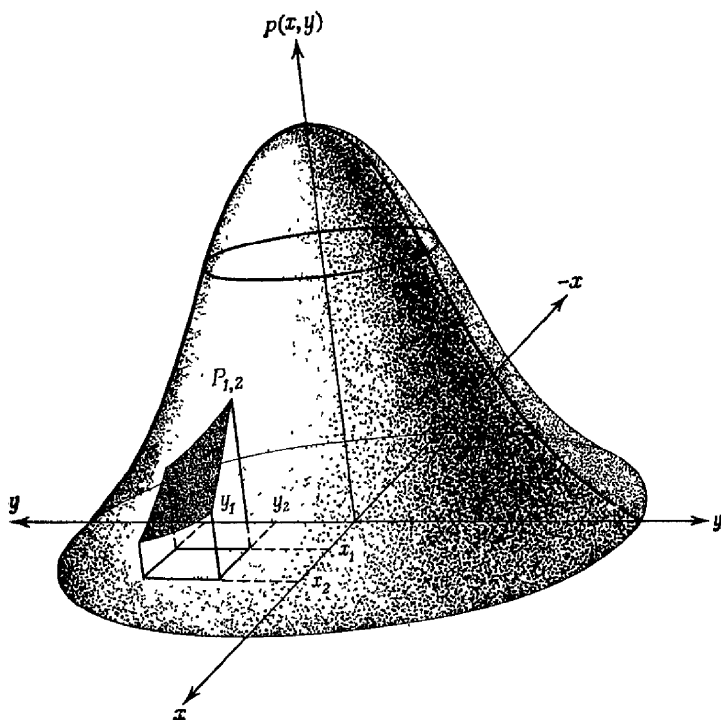


Рис. 4.5. Типичный график совместной плотности распределения.

### 4.3. Подготовка к работе.

Перед работой необходимо изучить техническое описание, инструкцию по эксплуатации и ознакомиться со схемами, приведенными в описи альбома 3.031.037 ОП измерителя вероятностных характеристик (блок Х6-4 Приложение 2).

#### 4.4. Задания.

Произвести соединение приборов (Х6-4, генератора сигналов специальной формы Г6-27 и осциллографа) в соответствии с разд. 6 "Подготовка к работе" и разд. 9 "Порядок работы" технического описания прибора (см. Приложение 2).

Измерить дискретные значения распределения и плотности распределения вероятностей сигналов специальной формы (синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной) для одной произвольной частоты и амплитуды.

Соединить приборы для измерения  $\rho(u/\sigma)$  и  $P(u/\sigma)$  выходного сигнала смесительного устройства (см. рис. 3.5 лабораторной работы №3). Измерить указанные характеристики сигнала генератора случайного шума у 3-х сигналов, полученных путем смешения синусоидального сигнала и случайного шума. Отношение сигнал/шум установить близким к значениям  $\sigma_S / \sigma_N \approx 20; 1; 0,2$ ; где  $\sigma_S$  и  $\sigma_N$  – доли среднеквадратичных значений синусоидальных колебаний и случайного шума в суммарном сигнале на выходе смесителя.

Результаты исследований оформить в виде таблиц данных измерений и графиков. При оформлении графиков использовать обозначения, принятые в теории (см. разд. "Краткое теоретическое введение"). В процессе регистрации

экспериментальных данных можно использовать обозначения, принятые в описании к прибору. Произвести сравнение формы распределений  $\rho(u/\sigma)$  и  $P(u/\sigma)$ , полученных в опытах, с известными распределениями. Определить вид опытных распределений.

## **Контрольные вопросы:**

1. Как осуществляется квантование сигнала по времени в цифровом измерителе вероятностных характеристик?
2. Чем отличается экспоненциальный способ усреднения от способа суммирования?
3. Как меняется вид кривой плотности распределения вероятностей сигнала при уменьшении в нем доли гармонической части по отношению к случайному шуму?

## **Лабораторная работа № 5**

### **СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ**

#### **5.1. Цель работы:**

1. Ознакомиться с принципом работы приборов для спектрального анализа случайных сигналов.
2. Освоить порядок работы с аппаратурой для спектрального анализа.
3. Произвести измерение частотного спектра выходного сигнала генератора шума или термоанемометра. Определить тип его спектральной плотности.



## 5.2. Краткое теоретическое введение.

Для статистической радиофизики и электроники особое значение имеют спектральные представления случайных процессов. Основой теории является обобщение спектральных представлений, развитых в теории регулярных сигналов и полей на случайные сигналы и поля.

### 5.2.1. Спектральная плотность.

Спектральная плотность, или спектр случайного процесса, является функцией частоты и интерпретируется как распределение среднего квадрата значений функции  $x(t)$  процесса по частотам. Средний квадрат  $x(t)$  процесса в интервале частот от  $f$  до  $f + \Delta f$  можно получить, подавая эту реализацию на вход полосового фильтра с узкой полосой пропускания и осредняя возведенную в квадрат функцию на выходе фильтра. Это осредненное значение квадрата приближается к точному его значению при стремлении  $T$  к бесконечности:

$$\Psi_x^2(f, \Delta f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt. \quad (5.1)$$

Здесь  $x(t, f, \Delta f)$  — составляющие функции  $x(t)$ , имеющие частоты в интервале от  $f$  до  $f + \Delta f$ . При малых  $\Delta f$  спектральную плотность  $G_x(f)$  можно определить, пользуясь приближенным равенством

$$\Psi_x^2(f, \Delta f) \approx G_x(f) \Delta f \quad (5.2)$$

Более строго

$$G_x(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(f, \Delta f)}{\Delta f} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (5.3)$$

Величина  $G_x(f)$  — всегда действительная, неотрицательная функция.

Важное свойство спектральной плотности заключается в ее связи с автокорреляционной функцией. В частности, для стационарного процесса эти функции связаны преобразованием Фурье

$$G_x(f) = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) e^{-2\pi f \tau} d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau. \quad (5.4)$$

Переход к последнему выражению возможен потому, что  $R_x(\tau)$  есть четная функция аргумента  $\tau$ .

Среднее значение функции  $x(t)$  определяется спектральной плотностью в соответствии с формулой

$$\mu_x = \left[ \int_{0^-}^{0^+} G_x(f) df \right]^{1/2}, \quad (5.5)$$

где  $0^-$  и  $0^+$  означают, что нижний предел интегрирования берется слева, а верхний — справа. Иными словами, среднее значение функции  $x(f)$  входит в функцию  $G_x(f)$  через дельта-функцию Дирака при нулевой частоте. Это среднее равно положительному значению корня квадратного из площади, лежащей под дельта-функцией (см. формулу (5.7)).

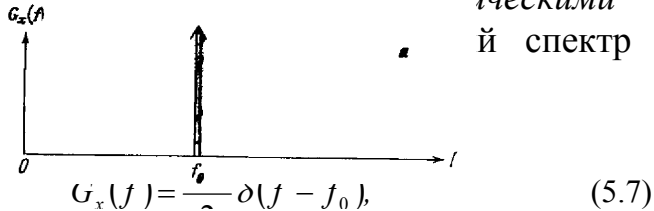
Среднее значение квадрата функции  $x(f)$  описывается зависимостью

$$\Psi_x^2 = \int_0^{\infty} G_x(f) df, \quad (5.6)$$

где подразумевается, что нижний предел интегрирования берется слева с тем, чтобы учесть формулу (5.5). Следовательно, среднее значение квадрата равно общей площади под кривой спектральной плотности как функции частоты.

*Примеры.* На рис. 5.1 показаны типичные графики спектральной плотности как функции частоты (зависимости  $G_x$  от  $f$ ) для сигналов различного типа. Эти

графики называются *энергетическими спектрами*. *а* — гармонический спектр



где  $\delta(f-f_0)$  — *б* — спектральная плотность гармонического процесса с бесконечными значениями частоты. Одно из значений спектра, взятый

в любых пределах, истинно равно себе частоту гармонического процесса. Это значение,  $\frac{1}{T}$ . Относительно гладкий спектр на рис. 5.1г

осредняется по частоте. *в* — спектр случайных процессов рассматриваемого типа используется термин «узкополосный случайный шум». *г* — широкополосный случайный шум. Энергия шума одинакова на всех частотах.

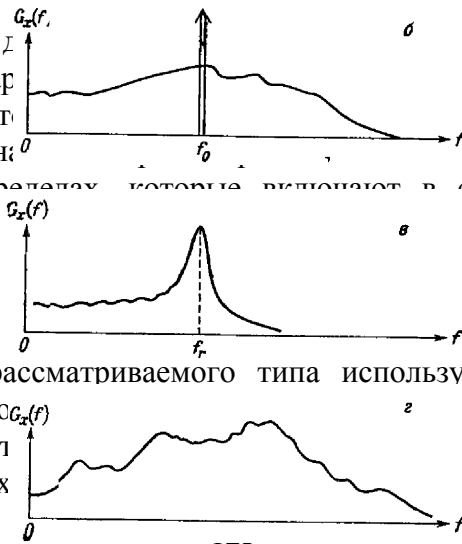


Рис. 5.1. Графики спектральной плотности: *а* — гармонический процесс; *б* — сумма гармонического процесса и случайного шума; *в* — узкополосный случайный шум; *г* — широкополосный случайный шум.

Энергетический спектр суммы гармонического колебания и случайного шума равен просто сумме спектров гармонического колебания и случайного шума, как показано на рис. 5.1б. С другой стороны, энергетический спектр узкополосного шума (рис. 5.1в) содержит, как и в случае гармонического колебания, узкий пик (отсюда и термин «узкополосный»), но все же он имеет вид гладкой непрерывной кривой, как и спектр случайного шума. Четыре примера на рис. 5.1 показывают, как меняется вид энергетического спектра при переходе от гармонического процесса к широкополосному случайному процессу.

*Применение.* Спектральная плотность физического процесса применяется прежде всего для исследования его частотной структуры, которая в свою очередь дает важную информацию об основных характеристиках исследуемых физических систем.

### 5.2.2. Односторонняя и двусторонняя спектральные плотности.

Описанный выше подход приводит к *односторонним* спектральным плотностям  $G(f)$ , существующим только в интервале неотрицательных частот  $(0, \infty)$ . Математически более удобно спектральные плотности определять как преобразования Фурье соответствующих корреляционных функций, включая область

отрицательных частот. Такой подход ведет к *двусторонним* спектральным плотностям

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau, \quad (5.9)$$

заданным на всей частотной оси от  $-\infty$  до  $\infty$ . Эта функция существует, если существует функция  $R(\tau)$  и если

$$\int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)| d\tau < \infty. \quad (5.10)$$

Обратное преобразование Фурье функции  $S(f)$  дает

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{2\pi j f \tau} df. \quad (5.11)$$

Предположим теперь, что авто и взаимные корреляционные функции  $R_x(\tau)$ ,  $R_y(\tau)$  и  $R_{xy}(\tau)$ , существуют. Тогда *двусторонние* спектральные и взаимные спектральные плотности имеют вид:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau, \quad (5.12)$$

$$S_y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau,$$

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-2\pi j f \tau} d\tau. \quad (5.13)$$

Для решения практических задач оказывается полезным исследовать функции  $R(\tau)$  и  $S(f)$  с помощью дельта-функций. Уравнения (5.12) и (5.13), а также приводимые ниже эквивалентные

равенства называются *соотношениями Винера — Хинчина*.

Из свойств симметрии корреляционных функций стационарного процесса следует, что:

$$S_x(-f) = S_x(f), \quad (5.14)$$

$$S_y(-f) = S_y(f),$$

$$S_{xy}(-f) = S_{xy}^*(f) = S_{yx}(f). \quad (5.15)$$

Как видно из этих формул, двусторонние спектральные плотности представляют собой действительные, неотрицательные и четные функции частоты  $f$ , а взаимные спектральные плотности — комплексные функции частоты  $f$ .

Соотношения (5.12) могут быть приведены к виду:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad (5.16)$$

$$S_y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_y(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau.$$

И обратно:

$$R_x(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_x(f) \cos 2\pi f \tau df, \quad (5.17)$$

$$R_y(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_y(f) \cos 2\pi f \tau df.$$

*Односторонние* спектральные плотности  $G_x(f)$  и  $G_y(f)$  с частотами  $f$  в интервале  $(0, \infty)$  имеют вид:

$$\begin{aligned}
 G_x(f) &= \begin{cases} 2S_x(f) \text{ при } 0 \leq f < \infty, \\ 0 \text{ при других } f, \end{cases} \\
 G_y(f) &= \begin{cases} 2S_y(f) \text{ при } 0 \leq f \leq \infty, \\ 0 \text{ при других } f. \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Именно эти характеристики измеряются на практике путем прямой фильтрации. Однако при математических выкладках анализ часто упрощается за счет использования функций  $S_x(f)$  и  $S_y(f)$ , определенных во всей области частот от  $-\infty$  до  $\infty$ , и экспонент с мнимыми показателями степени. Необходимо уметь правильно обращаться с обоими представлениями спектральных плотностей. Соотношение между функциями  $S(f)$  и  $G(f)$  иллюстрируется рисунком 5.2. Примеры спектров различных типов сигналов приведены в таблице 5.1.

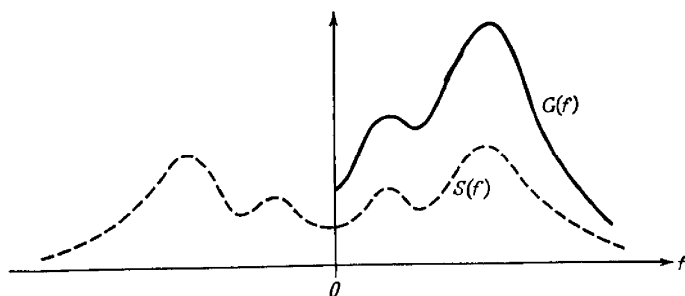

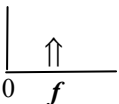
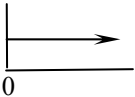
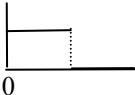
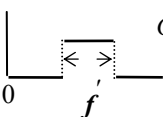
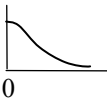
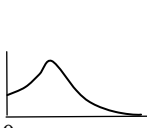


Рис. 5.2. Односторонняя и двусторонняя спектральные плотности.

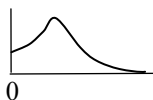
**Таблица 5.1**

## Некоторые спектральные плотности

Тип функции	Спектральная плотность (односторонняя)
Постоянной величины	 $G_x(f) = c^2 \delta(f)$
Гармонического процесса	 $G_x(f) = \frac{X^2}{2} \delta(f - f_0)$
Белого шума	 $G_x(f) = \begin{cases} a & \text{при } f \geq 0, \\ 0 & \text{при других } f \end{cases}$
Белого шума на выходе фильтра нижних частот	 $G_x(f) = \begin{cases} a & \text{при } 0 \leq f \leq B, \\ 0 & \text{при других } f \end{cases}$
Белого шума на выходе полосового фильтра	 $G_x(f) = \begin{cases} a & \text{при } f_0 - (B/2) \leq f \leq f_0 + (B/2), \\ 0 & \text{при других } f \end{cases}$
Процесса с автокорреляционной функцией в виде экспоненты	 $G_x(f) = \frac{4a^2}{a^2 + 4\pi^2 f^2}$
Процесса с автокорреляционной функцией в виде экспоненты, умноженной на косинус	 $G_x(f) = 2a \left[ \frac{1}{a^2 + 4\pi^2 (f + f_0)^2} + \frac{1}{a^2 + 4\pi^2 (f - f_0)^2} \right]$



Процесса с автокорреляционной функцией в виде экспоненты, умноженной на синусоидальную функцию



$$G_x(f) = \frac{2ab + 4\pi(f + f_0)}{a^2 + 4\pi^2(f + f_0)^2} + \frac{2}{a^2 + 4\pi^2(f - f_0)^2}$$

Односторонние спектральные плотности  $G_x(f)$  и  $G_y(f)$  связаны с корреляционными функциями  $R_x(\tau)$  и  $R_y(\tau)$  стационарного процесса соотношениями

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad 0 \leq f < \infty, \quad (5.19)$$

$$G_y(f) = 4 \int_0^{\infty} R_y(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad 0 \leq f < \infty,$$

И обратно

$$R_x(\tau) = \int_0^{\infty} G_x(f) \cos 2\pi f \tau df, \quad (5.20)$$

$$R_y(\tau) = \int_0^{\infty} G_y(f) \cos 2\pi f \tau df.$$

### 5.3. Задания.

1. Изучить описание и инструкцию по эксплуатации измерительной системы для исследования энергетического спектра сигналов X6-8. Внешний вид системы X6-8 показан на рис. 5.3.

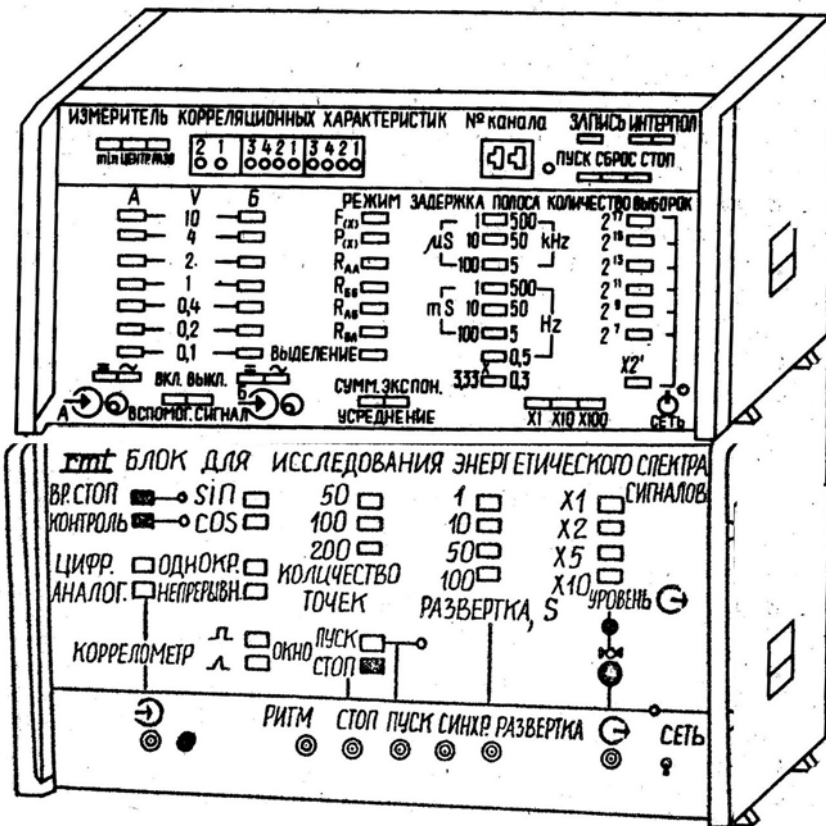


Рис. 5.3. Внешний вид измерительной системы X6-8.

2. В присутствии преподавателя или сотрудника лаборатории подготовить прибор к работе, руководствуясь разделами "8. Подготовка к работе" и "9. Порядок работы" описания к прибору.

3. Подать на вход прибора сигнал от генератора случайных сигналов или термоанемометра, датчик которого находится в турбулентном потоке.

4. Произвести запись дискретных значений спектра случайного сигнала при количестве точек  $m=100$ , используя двухкоординатный самописец или цифровой вольтметр при максимальном времени осреднения ( $T=100с$ ).

5. Построить частотный спектр в безразмерном виде

$$G_x = \frac{G_x(k\Delta f)}{G_{max}},$$

где  $k$  - номер точки;

$\Delta f$ - интервал дискретизации спектра по частоте;

$G_{max}$  – максимальное значение спектральной функции.

6. По форме полученного спектра, используя таблицу спектральных плотностей 5.1, определить тип (или промежуточный тип) функции процесса.

7. Построить спектр в логарифмических координатах

$$\ln G = F(\ln f_k).$$

Определить область линейной зависимости, если она имеется, и частоту максимума в полученном спектре.

8. Подать на вход измерительной системы сигнал от смесительного устройства с величиной отношения сигнал/шум  $\sigma_S/\sigma_N=1$ . Значения  $\sigma_S$  и  $\sigma_N$ , представляющие собой доли среднеквадратичных значений гармонической части и случайного шума в выходном сигнале смесителя, установить путем регулирования их уровня на входе смесительного

устройства. Произвести запись дискретных значений спектра с помощью двухкоординатного самописца или цифрового вольтметра. Сделать подобные измерения при  $\sigma_S/\sigma_N=5$  и 0,2.

9. Результаты опытов оформить в виде таблиц и графиков.

### **Контрольные вопросы:**

1. Чем отличается форма энергетического спектра узкополосного шума от спектра суммы гармонического колебания и случайного шума?
2. Какие основные этапы обработки проходит сигнал в цифровом анализаторе спектра?
3. Чему равна величина дисперсии белого шума?

## **Лабораторная работа № 6**

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА ИЗ ШУМА МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ  
АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

### **6.1. Цель работы:**

1. Ознакомиться с принципом работы устройств, предназначенных для выделения сигнала из шума.
2. Освоить порядок работы с прибором для исследования корреляционных характеристик при измерениях в режиме "Выделение".

3. Методом измерения автокорреляционной функции определить форму периодического сигнала, скрытого в шуме.

## **6.2. Краткое теоретическое введение.**

### Оптимальные фильтры и корреляторы.

Методы обнаружения и выделения сигналов, основанные на применении фильтров особенно эффективны, когда спектры сигнала и шума существенно различаются, именно в этой ситуации оптимальные фильтры обеспечивают минимальные ошибки при обнаружении и выделении сигналов. Оптимальная фильтрация достигается путем выбора характеристик фильтра, при которых достигается наибольшее отношение сигнал/шум. Частота сигнала  $\omega_c$  должна совпадать с резонансной частотой фильтра  $\omega_0$ , полоса пропускания фильтра  $\Delta\omega_\phi$  должна обеспечить наименьшее прохождение шума.

В случае, если различаются спектры, то различаются и корреляционные функции сигнала и шума. Поэтому для обнаружения и выделения сигналов наряду с оптимальными фильтрами могут быть предложены и «сопряженные по Фурье» методы — методы, основанные на измерении автокорреляционных и взаимно-корреляционных функций.

Предположим, что речь идет о выделении гармонического сигнала

$$S(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad w(\varphi) = \varphi/2\pi,$$

на фоне стационарного шума; сигнал и шум будем считать независимыми. Здесь  $\varphi$  – фаза,  $w(\varphi)$  – плотность вероятностей случайной фазы.

Пусть суперпозиция сигнала и шума

$$\eta = S(t) + \xi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) + \xi(t),$$

подается на коррелятор (рис. 6.1). На выходе коррелятора имеем значение корреляционной функции

$$R_\eta = \langle \eta \eta_\tau \rangle = \langle S S_\tau \rangle + \langle S \xi_\tau \rangle + \langle S_\tau \xi \rangle + \langle \xi \xi_\tau \rangle. \quad (6.1)$$

При  $\langle S \rangle = \langle \xi \rangle = 0$

$$\langle S \xi_\tau \rangle = \langle S_\tau \xi \rangle = 0 \quad (6.2)$$

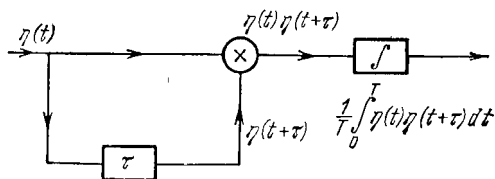


Рис. 6.1. Схема коррелятора.

Поскольку для гармонического сигнала

$$\langle S S_\tau \rangle = \frac{A^2}{2} \cos \omega_0 \tau, \quad \text{то окончательно получим}$$

$$R_\eta(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega_0 \tau + R_\xi(\tau). \quad (6.3)$$

Если шум  $\xi$  стационарен, то  $R_\xi(\tau) \approx 0$  при  $\tau \gg \tau_K$ .

Таким образом, на выходе прибора, измеряющего корреляционную функцию  $R_\eta(\tau)$ , при  $\tau \gg \tau_K$

$R_n(\tau) \approx \frac{A^2}{2} \cos \omega_0 \tau$  независимо от отношения сигнал/шум на входе. Это значит, что при больших задержках появляется возможность обнаружения сколь угодно слабого гармонического сигнала на фоне шума (рис. 6.2).

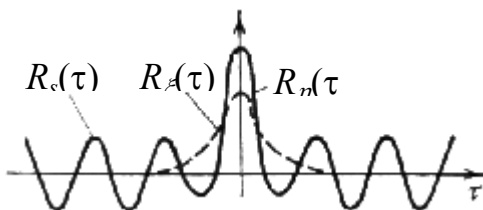


Рис. 6.2. Корреляционные функции.

С принципиальной точки зрения методы обнаружения гармонического сигнала на фоне шума с помощью узкополосного фильтра или коррелятора совершенно эквивалентны; выигрыш в отношении сигнал/шум получается за счет увеличения времени измерения; напомним, что постоянная времени фильтра  $T_f \sim 1/\Delta\omega_f$ .

Практически же создание коррелятора с большими временами задержки часто оказывается более простым делом, нежели создание очень узкополосного фильтра.

### 6.3. Описание установки и методики измерений.

Для выделения полезного сигнала, скрытого в шуме, используется выходной сигнал смесительного устройства, или термоанемометрический сигнал пульсаций скорости турбулентного течения.

Перед выполнением работы необходимо изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации к прибору для исследования кор-

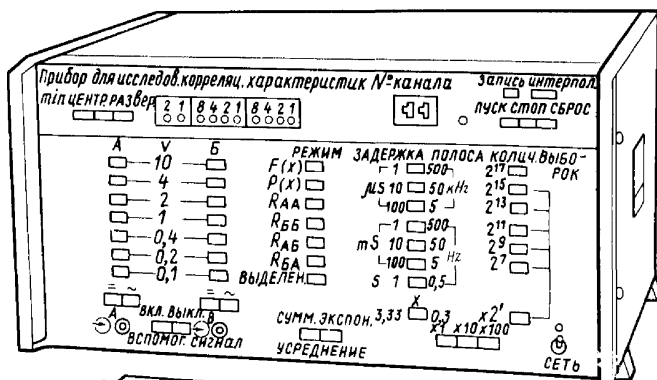


Рис. 6.3. Внешний вид прибора Х6-4

реляционных характеристик Х6-4. Внешний вид прибора Х6-4 показан на рис. 6.3. Подробное описание и инструкция по эксплуатации приведены в разд. "Приложение 2". Произвести соединения с объектом исследования в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.4.



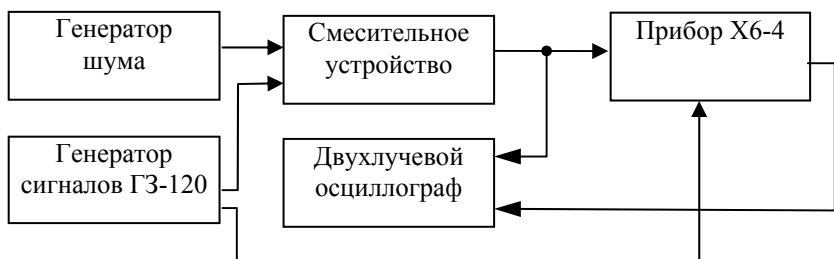


Рис. 6.4. Схема соединения приборов для получения и исследования смешенных сигналов.

Подготовить прибор Х6-4 к работе, руководствуясь требованиями разд.8 технического описания и инструкции по эксплуатации (см. Приложение 2).

## 6.4. Задания.

1. Измерить дискретные значения функции автокорреляции трех сигналов с разным отношением сигнал/шум ( $\sigma_S/\sigma_N \approx 0,5; 0,1; 0,05$ ), соблюдая порядок работы, изложенный в разд. 9 описания прибора Х6-4 (см. Приложение 2). Величину отношения сигнал/шум  $\sigma_S/\sigma_N$  определить путем измерения доли среднеквадратичного значения (СКЗ) случайного шума  $\sigma_N$  и гармонической части СКЗ  $\sigma_S$  в сигнале на выходе смесительного устройства.

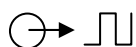
Выбрать шаг задержки времени  $\Delta\tau$  таким, чтобы наблюдаемая на осциллографе форма корреляционной функции была примерно такая же, как на рис. 6.2 (правая часть кривой  $R_\eta(r)$  относительно середины). Измерения произвести при большом количестве выборок (со временем осреднения  $\sim 30$ сек). Часть кривой, обозначенная функцией  $R_S(\tau)$  и имеющая форму, периодически повторяющуюся с увеличением  $\tau$ , несет информацию о форме скрытого в шуме сигнала. Определить характерный период  $\tau_x$  по форме корреляционной функции в области  $R_S(\tau)$ , подсчитав количество точек на одном периоде осцилляций. Характерный период определится как

$$\tau_x = n \cdot \Delta\tau,$$

где  $n$  – число точек на одном периоде,  $\Delta\tau$  – шаг задержки времени  $\tau$ .

2. Подать на вход Х6-4 сигнал с малой величиной отношения сигнал/шум ( $\sigma_S/\sigma_N < 0,1$ ). Включить прибор Х6-4 в режим "Выделение". Подобрать шаг времени задержки, чтобы на экране осциллографа наблюдалась форма периодического сигнала (см. Приложение 2 разд.9.7. "Выделение периодического сигнала из шума" описания прибора Х6-4). Произвести измерения дискретных значений выделенного сигнала.

В случае невозможности выделения сигнала указанным выше способом необходимо подать на разъем «синхр., вход» (на задней панели прибора



Х6-4) синхроимпульсы от генератора сигналов ГЗ-120, используя его выходной разъем «            ».

Необходимо при этом переключатель «синхр.» прибора Х6-4 поставить, положение «ВНЕШН» (см. п.9.7. описания прибора Х6-4), затем повторить п.6.4.2. задания.

Результаты измерений представить в виде таблиц 4.1 и графиков  $R=R(\tau)$ .

Таблица 4.1

№ канала задержки	$\tau$	$R(\tau)$	№ канала задержки	$\tau$	$R(\tau)$

### Контрольные вопросы:

1. При каких условиях реализуется оптимальная фильтрация сигнала?
2. От каких характеристик шума и сигнала зависит необходимое время задержки при выделении сигнала из шума методом измерения автокорреляционных функций?
3. Какие этапы обработки проходит сигнал в измерителе корреляционных характеристик при работе в режиме «Выделение»?

# Лабораторная работа №7

АППАРАТУРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

## 7.1. Цель работы:

1. Изучить устройство и работу приборов для измерения энтропии электрических сигналов.
2. Освоить методику измерений энтропии на примере исследования сигналов специальной формы (синусоидальной, прямоугольной, треугольной и пилообразной).
3. Научиться экспериментально определять величину энтропии сигналов сложной формы.

## 7.2. Краткое теоретическое введение.

Информационной энтропией или энтропией Шеннона называют величину, рассчитываемую по формуле

$$S = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (7.1)$$

где  $x$  – реализация случайного процесса,  $p(x)$  - плотность вероятности величины  $x$ .

В теории информации количеством информации  $J(A/B)$ , которое заключено в событии  $B$  относительно  $A$ , называют число

$$J(A/B) = \log \frac{P(A/B)}{P(A)}, \quad (7.2)$$

где  $P(A), P(A/B)$  - соответственно вероятности события  $A$  и события  $B$  при условии реализации события  $A$ .

Появление события  $B=A$  можно интерпретировать как сообщение о том, что наступило событие  $A$ .

Число  $J(A/A) = J(A)$  называется количеством информации  $J(A)$ , заключающейся в событии  $A$ :

$$J(A/A) = J(A) = -\log P(A). \quad (7.3)$$

Величина  $J$  всегда положительна, так как  $0 \leq P \leq 1$ . В зависимости от выбора основания логарифма в формуле (7.3) количество информации может измеряться в “битах”, “дитах”, “натах” соответственно в случаях двоичных, десятичных и натуральных логарифмов. Наиболее часто используется единица измерения “бит” - количество информации в эксперименте с двумя взаимоисключающими равновероятными событиями. Например, информация, извлекаемая из исхода бросания симметричной монеты, равна:

$$J = -\log_2 \frac{1}{2} = \log_2 2 = 1 \text{ бит}. \quad (7.4)$$

Если события  $A$  и  $B$  независимы, то  $J(A/B) = 0$ .

Это означает, что событие  $B$  не несет в себе никакой информации относительно  $A$  и наоборот. Энтропия, вычисленная по соотношению (7.1.), представляет собой среднее значение информации

и является мерой относительной степени упорядоченности изучаемого случайного процесса.

Для измерения энтропии электрических сигналов применяют специальные цифровые приборы, предполагающие дискретизацию времени и квантование сигнала (по многим уровням). Они представляют собой специализированные электронные вычислительные установки, в которых используются многие блоки и узлы, аналогичные применяемым в универсальных цифровых машинах.

Структурная схема вычислителя энтропии приведена на рис.7.1.

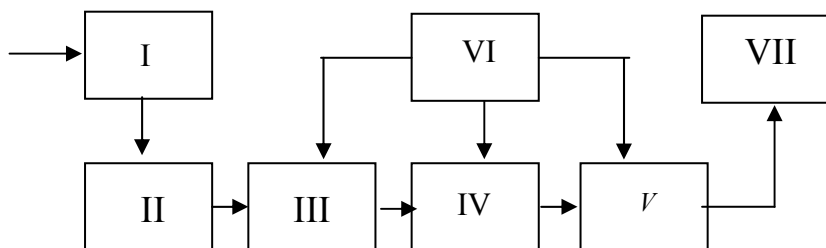


Рис.7.1. Структурная схема вычислителя энтропии: I – измеритель плотности распределения вероятностей; II – матрица логарифмическая; III – сумматор накапливающий; IV – коммутатор; V – преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный код; VI – управление; VII – индикатор цифровой.

Дискретные значения плотности вероятности  $P(x_i)$  в двоичном коде вводятся в матрицу логарифмическую, где проводится логарифмирование дискретных значений  $P(x_i)$  и вычисление произведения  $P(x_i) \log P(x_i)$ .

В результате получается значение энтропии  $S$ :

$$S = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i) \quad (7.5)$$

Далее через коммутатор значение  $S$  поступает на преобразователь «двоичный код в двоично-десятичный код» (ДК-ДДК) и на индикатор цифровой, позволяющий отсчитывать значение энтропии десятичным числом.

### **7.3. Описание установки и методики измерений.**

На рис. 7.2 показана схема соединения приборов для проведения исследования энтропии сложного сигнала, полученного путем суммирования гармонического сигнала с сигналом шума.

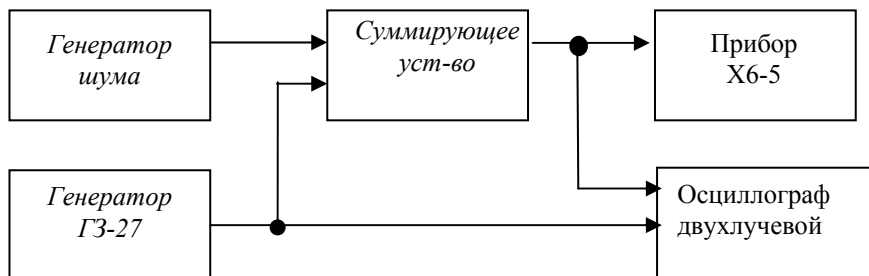


Рис. 7.2. Схема соединения приборов для исследования энтропии сложных сигналов.

Суммирующее устройство, производящее операцию сложения гармонического и случайного сигналов, позволяет регулировать величину отношения сигнал/шум в широких пределах. Двухлучевой осциллограф используется для одновременного наблюдения формы гармонического сигнала и выходного сигнала суммирующего устройства. Прибор Х6-5 позволяет производить непосредственное измерение энтропии исследуемого сигнала. Внешний вид его показан на рис. 7.3.



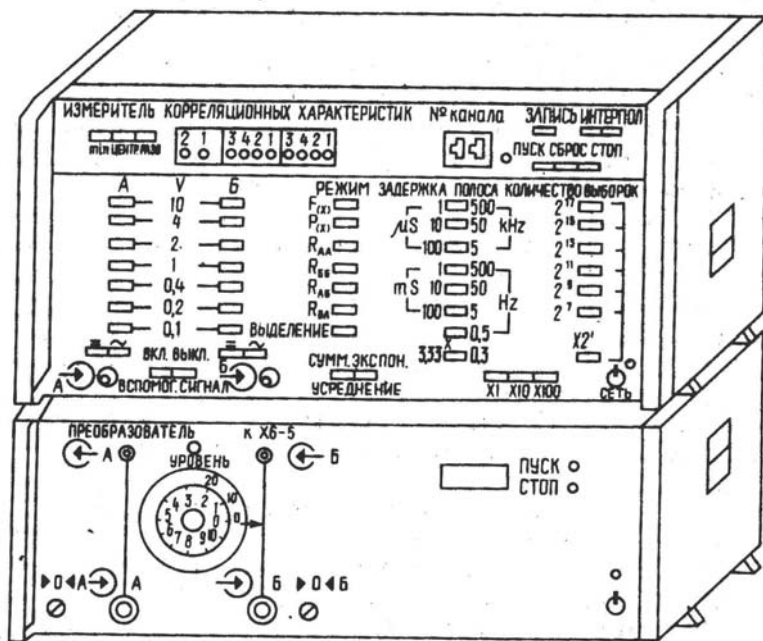



Рис 7.3. Прибор X6-5.

## 7.4. Подготовка прибора X6-5 к работе.

1. Перед тем, как начать работу с прибором X6-5, необходимо изучить его техническое описание и инструкцию по эксплуатации, а также техническое

описание и инструкцию по эксплуатации прибора Х6-4.

2. До включения прибора в сеть произведите следующие операции:

- соедините клемму  с шиной защитного заземления;
- убедитесь в наличии сетевых предохранителей;
- соедините между собой прибор Х6-4 и преобразователь 3.036.031 кабелем соединительным 4.853.286 согласно схеме электрических соединений 1.400.209 Э4;
- подключите вилки шнуров питания к розеткам питания;
- включите тумблеры СЕТЬ прибора Х6-4 и преобразователя 3.036.031.

### *Примечания:*

1. Необходимо для контроля к разъемам ОСЦИЛЛОГРАФ X, Y, Z прибора Х6-4 подсоединить осциллограф универсальный СІ-65 или подобного типа.
2. После прогрева прибора необходимо в преобразователе выставить нулевой уровень канала А или Б (в зависимости от того, какой канал предполагается использовать). Для этого в приборе Х6-4 нажать кнопки: 100  $\mu$ s Р(х), СУММ., 2<sup>13</sup>, ~, 2V входа  $\rightarrow$ )Б, РАЗВЕРТКА, x10, СБРОС; переключатель № КАНАЛА установить на 50 и метку пятидесятой точки (с помощью ручки  $\leftrightarrow$  осциллографа) установить в центре осциллографа, Отключить кабель от входа  $\rightarrow$ )Б преобразователя. Соединить вход  $\rightarrow$ )Б прибора Х6-4 кабелем с выходом ( $\rightarrow$ ) Б преобразователя. Нажать кнопку ПУСК в приборе Х6-4. Вращением оси потенциометра УСТАНОВКА НУЛЯ "  $\blacktriangleright$  0  $\blacktriangleleft$  Б" на панели преобразователя переместить по вертикали точку на экране осциллографа и установить в центре экрана (при наличии нескольких перемещающихся по вертикали точек установку произвести по точке, скорость перемещения которой по вертикали максимальная).

Установку нулевого уровня прибора необходимо проверять во время работы периодически (примерно через 1 час работы). Аналогично установить нулевой уровень канала А преобразователя. Для этого вход →) прибора Х6-4 соединить кабелем с выходом (→ А преобразователя. После установи нулевого уровня в приборе Х6-4 переключатель № КАНАЛА поставить в положение 00 и нажать кнопки 1  $\mu$ s R<sub>ББ</sub>. Подключить кабель ко входу →) Б преобразователя. Если верхняя частота исследуемого сигнала меньше 250 кГц, то его подключение производится непосредственно по входу А и Б блока Х6-4. При этом установку нулевого уровня каналов А и Б преобразователя можно не проводить.

### 7.4.3. Опробование прибора произведите следующим образом:

- подготовьте прибор согласно п.7.5.1;
- установите переключатель ЭНТРОПИЯ-КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА в положение КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА;
- проведите измерение согласно п.7.5.2. Цифровой индикатор прибора должен показывать значение коэффициента качества между 0.00 и 0.99;
- отключите кабель от входа прибора и проведите измерение согласно п.9.2. Цифровой индикатор прибора должен показывать 0.00.

## 7.5. Порядок работы.

### 7.5.1. Подготовка к проведению измерений.

Выполните операции, изложенные в разд. 7.4.

Прибор готов к проведению измерений через 30 минут после включения. Затем подготовьте прибор Х6-4 следующим образом:

- нажмите кнопки переключателей А и Б 2 V ;
- нажмите кнопку переключателя ВОПОМОГАТ. СИГН. ВЫКЛ.;
- нажмите кнопку переключателя РЕЖИМ R<sub>ББ</sub>;
- нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ СУММ;
- наберите цифры 00 на переключателе № КАНАЛА;
- нажмите кнопку переключателя ЗАДЕРЖКА I  $\mu$ s ;
- нажмите кнопки x10; РАЗВЕРТКА; ~ ;
- нажмите кнопку переключателя КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК 2<sup>13</sup>;
  
- установите переключатель ТАКТ.ЧАСТОТА на задней панели прибора в положение ВНУТР.

Подготовьте преобразователь 3.036.031 следующим образом:

- поставьте ручку потенциометра УРОВЕНЬ в крайнее правое положение;
- переключите ручку аттенюатора УРОВЕНЬ в положение 29 дБ;

- установите переключатель ЭНТРОПИЯ-КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА на задней панели преобразователя в положение КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА, если требуется измерить коэффициент качества шума, или в положение ЭНТРОПИЯ, если требуется измерить энтропию.

### 7.5.2. Проведение измерений. Установку уровня сигнала проведите следующим образом:

- подключите кабель соединительный ВЧ 4.851.346-09 Сп между разъемом →) Б преобразователя 3.036.031 и объектом исследования. В случае, если полоса частот исследуемого сигнала находится в пределах  $0 \div 250$  кГц, то сигнал от объекта подключается непосредственно по входу А или Б блока Х6-4.

#### *Примечание.*

В процессе измерения недопустимо попадание на вход смесителя напряжения более 1 В, так как это может привести к пробоем смесительных диодов. Во избежание этого необходимо соблюдать соответствие положения ручки аттенюатора величине напряжения или мощности измеряемого сигнала. Ориентировочное положение ручки приведено в табл. 7.1.

**Таблица 7.1**

Эффективное напряжение, В, не более	Мощность, мВт, не более	Минимально допустимое положение ручки аттенюатора УРОВЕНЬ, В	Примечание
1	20	4	Без дополни-

2	80	10	тельного аттенюатора
3	180	14	
4	300	6	С дополнитель- ным аттенюа- тором Д2-31
5	500	8	
6	700	10	
7	900	11	
8	1200	12	
9	1600	13	
10	2000	14	

- нажмите кнопку ПУСК;
- установите уровень сигнала с помощью переключателя аттенюатора и ручки потенциометра УРОВЕНЬ таким, чтобы показание цифрового индикатора прибора Х6-4 для нулевого канала было  $228 \pm 2$  при измерении функции распределения и плотности вероятностей или  $196 \pm 2$  при измерении энтропии и коэффициента качества.

*Примечания:*

1. После регулировки уровня для проведения измерения нажимайте последовательно кнопки СБРОС, ПУСК прибора Х6-4.
2. При недостаточном уровне сигнала допускается нажать кнопку I в входа Б.
3. Показания цифрового индикатора прибора Х6-4 отсчитываются после окончания вычислений. Момент окончания вычисления соответствует погасанию сигнальной лампочки, расположенной слева от кнопки ПУСК прибора Х6-4.

Последовательность действий при измерении дискретных значений плотности распределения вероятностей:

- подсоедините источник исследуемого сигнала кабелем 4.850.223 к разъему Б на передней панели коррелометра;
- установите переключатель № КАНАЛА в положение 00 и нажмите кнопки  $R_{ББ}$ , X10;
- нажмите кнопку ПУСК и, когда лампочка покажет конец вычислений, отсчитайте показание цифрового индикатора. Поочередным нажатием кнопки СБРОС, кнопки переключателя Б и кнопки ПУСК добейтесь показания цифрового индикатора, близкого к 228;
- нажмите кнопку СБРОС, а затем кнопки  $P(x)$  и 100 мкс;
- нажмите кнопку ПУСК и, когда лампочка покажет конец вычислений, отсчитайте показания цифрового индикатора при всех положениях переключателя № КАНАЛА. Определите значения плотности распределения следующим образом:

$$P(x) = (A_n - 128)K,$$

где  $P(x)$  – значение плотности распределения;

$A_n$  – показание цифрового индикатора для определенного номера канала;

$K$  – коэффициент ( $K = 0,010714$ );

- в случае измерения маленьких значений плотности распределения рекомендуется пользоваться множителем  $\times 10$  или  $\times 100$ ;
- при необходимости можете включить режим экспоненциального усреднения. Для этого перед нажатием кнопки ПУСК нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ ЭКСПОН., а также обратите внимание на пп. 9.3.10, 9.3.11 настоящего технического описания.

Измерение коэффициента качества шума и энтропии проведите в следующей последовательности:

- установите переключатель ЭНТРОПИЯ - КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА в соответствующее положение;
- установите уровень сигнала;
- нажмите кнопки  $P(x)$ ; 100  $\mu\text{s}$ ;  $\times 10$ ;
- нажмите кнопку СБРОС прибора Х6-4;
- нажмите кнопку ПУСК прибора Х6-4;
- после окончания отсчета нажмите последовательно кнопки СБРОС и ПУСК преобразователя 3.036.031;
- на цифровом индикаторе преобразователя 3.036.031 отсчитайте значение измеряемой характеристики.

## 7.6. Задания.



1. В присутствии преподавателя или сотрудника лаборатории подготовить прибор к работе, руководствуясь разделами «Подготовка к работе» и «Порядок работы» технического описания и инструкции по эксплуатации прибора Х6-5.

2. Произвести соединение приборов согласно схеме, показанной на рис. 7.2.

3. Измерить дискретные значения плотности вероятности и величину информационной энтропии сигналов специальной формы (синусоидальной, пилообразной и прямоугольной) при нулевом значении сигнала шума или при непосредственной подаче сигнала от генератора ГЗ-27 на вход блока Х6-4 линии смесителя. По полученным распределениям плотности вероятностей рассчитать величину энтропии сигналов специальной формы по формуле (7.5). Сравнить результаты расчета с измеренными значениями энтропии.

4. Произвести измерения дискретных значений плотности вероятности и величину энтропии сигнала шума.

5. Исследовать зависимость величины энтропии от соотношения  $\sigma_N^2/\sigma_S^2$ , где  $\sigma_N^2$  и  $\sigma_S^2$  - долевые значения дисперсии сигнала шума и синусоидального сигнала на выходе смесителя. Получить не менее 7 значений энтропии при

разных величинах  $\sigma_N^2/\sigma_S^2$ . Измерить дискретные значения плотности вероятностей в 3-х характерных областях распределения  $S = S(\sigma_N^2/\sigma_S^2)$  (при малой, средней и большой величине  $\sigma_N^2/\sigma_S^2$ ).

6. Исследовать зависимость величины энтропии смеси двух синусоидальных сигналов разной частоты от соотношения  $\sigma_{S_1}^2/\sigma_{S_2}^2$ , где  $\sigma_{S_1}^2$  и  $\sigma_{S_2}^2$  - долевые значения дисперсии сигналов с частотами  $f_1$  и  $f_2$  соответственно. Получить не менее 7 значений энтропии в диапазоне  $0 < \sigma_{S_1}^2/\sigma_{S_2}^2 < 1$ .

Измерить дискретные значения плотности вероятностей в 3-х характерных областях распределения  $S = S(\sigma_N^2/\sigma_S^2)$  (при малой, средней и большой величине  $\sigma_N^2/\sigma_S^2$ ).

7. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков

$$\left\{ P = P(x_i/\sigma), \quad S/S_0 = F(\sigma_N^2/\sigma_S^2), \quad S/S_0 = F(\sigma_{S_1}^2/\sigma_{S_2}^2) \right\}.$$

### Контрольные вопросы:

1. С какой характеристикой сигнала связана величина его информационной энтропии?

2. Какие стадии обработки проходит сигнал в цифровом измерителе информационной энтропии?
3. Как изменяется величина информационной энтропии сложного сигнала при увеличении соотношения сигнал/шум?

#### Литература

##### Основная:

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука, 1981. – 640 с.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976.
3. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. – М.: Энергия, 1972.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа/ Пер. с англ. – М: Мир, 1983. –312 с.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов/ Пер. с англ. – М: Мир, 1974.

##### Дополнительная:

1. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 319с.
2. Жанабаев З. Ж. Лекции по нелинейной физике: Учебное пособие. – Алматы: 2000. –72 с.
3. Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б., Турмухамбетов А.Ж. Фракталы. Информация. Турбулентность. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 228 с.
4. Липкин И. А. Основы статистической радиотехники, теории информации и кодирования. – М.: Сов. радио, 1978. – 240 с.

1. Измерение средних значений и дисперсии регулярных и случайных сигналов .....	3
2. Изучение работы приборов для исследования статистических характеристик случайных сигналов .....	13
3. Измерение корреляционных характеристик случайных сигналов. ....	20
4. Исследование вероятностных характеристик сложных сигналов .....	30
5. Спектральный анализ случайных сигналов .....	42
6. Выделение сигнала из шума методом измерения автокорреляционных функций .....	54
7. Аппаратурное определение информационной энтропии сложных сигналов .....	60
Литература .....	73
<i>Приложение 1</i> .....	74
<i>Приложение 2</i> .....	80

## *Приложение 1*

### Техническое описание и инструкция по эксплуатации вольтметра среднеквадратичных значений

#### ***1. Назначение прибора.***

Вольтметр среднеквадратичных значений (далее - вольтметр СКЗ) предназначен для измерения среднеквадратичного значения пульсационной составляющей исследуемого сигнала.

Измерения можно производить как с помощью встроенного стрелочного прибора, так и с помощью внешнего цифрового вольтметра постоянного тока, подключаемого к разъему "ВЫХОД".

## ***2. Технические характеристики.***

- 2.1. Частотный диапазон - от 1 до 100 кГц.
- 2.2. Диапазон измеряемых напряжений - от 1 мВ до 10 В.
- 2.3. Время осреднения - от 1 до 30 с.
- 2.4. Погрешность измерения - не более 3 %.
- 2.5. Питание от сети – 220 В  $\pm$  15 %, частота – 50 Гц.
- 2.3. Габаритные размеры - 115x200x230 мм.
- 2.7. Рабочая температура окружающего воздуха - от +10 до +40<sup>0</sup>С; относительная влажность воздуха - до 85 %.
- 2.8. Коэффициент амплитуды < 10.

## ***3. Устройство и принцип работы прибора.***

### 3.1. Устройство прибора.

Вольтметр СКЗ представляет собой настольный

прибор, выполненный в малогабаритном корпусе со съемными боковыми и верхней крышками. Прибор конструктивно разделен на три части: блок питания, основной функциональный блок и входной делитель.

На передней панели смонтированы: входной делитель, стрелочный прибор и органы управления. На задней панели укреплен Блок питания, тумблер "СЕТЬ", держатель предохранителя и разъем "ВЫХОД".

Монтаж прибора выполнен на печатных платах с использованием полупроводниковых приборов и микросхем.

### 3.2. Схема электрическая принципиальная.

На входе прибора стоит двухступенчатый входной делитель (рис.1.3) ( $R_1, R_2; R_8 \div R_{13}$ ), который позволяет производить дискретное ослабление входного сигнала. Первая ступень 1:1, 1:100 и вторая 3:16. Там же расположен определитель диапазона  $R_3, R_4 \div R_7$ , предназначенный для определения коэффициента деления с помощью ЭВМ.

Сигнал, прошедший через делитель, усиливается предварительным двухкаскадным усилителем DA1, DA2, (см. рис.1). Коэффициент усиления предварительного усилителя - 316 ( $K_1 = 17,9; K_2 = 17,7$ ).

Усиленный сигнал поступает в узел квадрирования DA3÷DA6. На микросхеме DA3 выполнен двухполупериодный детектор. На микросхемах DA4÷DA6 собран одноквадрантный квадратор с неявным извлечением корня.

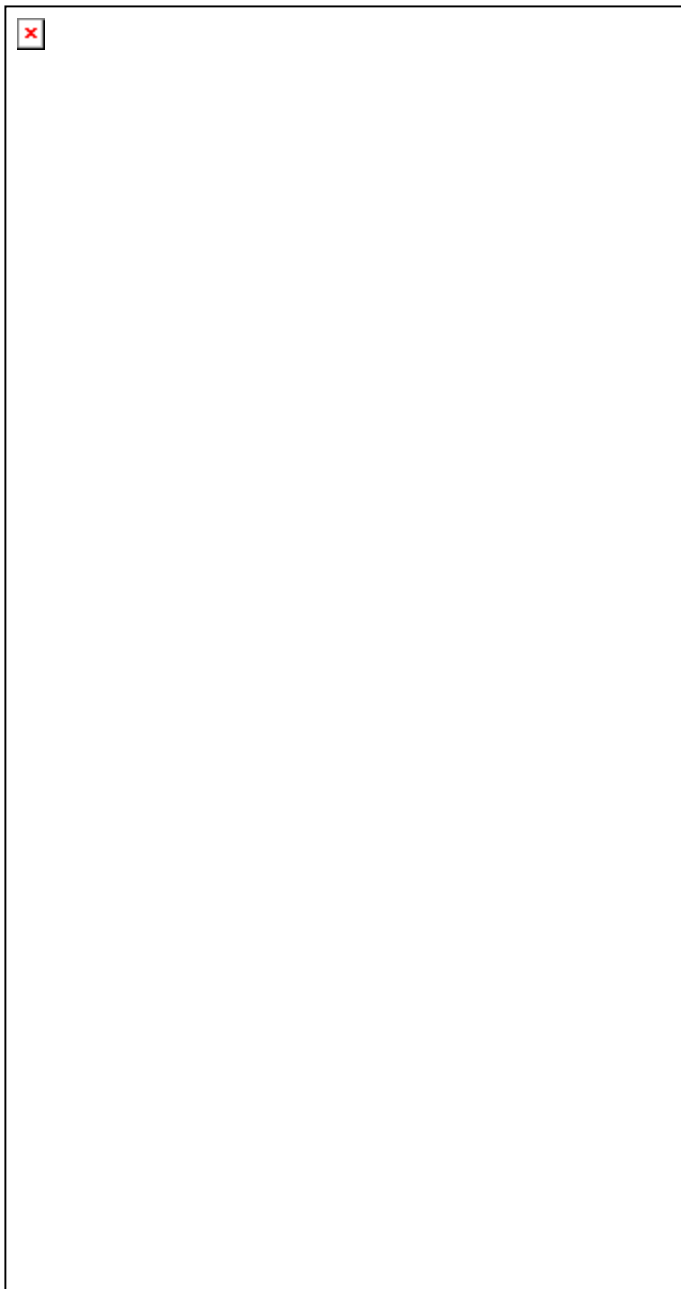


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема вольтметра СКЗ.



Постоянное напряжение, полученное после преобразования основным функциональным блоком, подается на выход прибора и на встроенный стрелочный прибор PV1.

Переключатели SB1÷SB3 осуществляют выбор времени осреднения.

Полевой транзистор VT1 вместе с RC-цепочкой образует схему защиты индикатора от броска тока при включении прибора.

### 3.3. Органы управления вольтметром СКЗ.

Расположение органов управления:

Разъем "ВХОД" - для подключения исследуемого сигнала,  $R_{вх} = 8 \text{ кОм}$ .

Переключатели "x1, x100" и "3,10,30,100 мВ, выкл." - для выбора необходимого диапазона измеряемого напряжения.

Переключатели "ОСРЕД." - для выбора удобного для регистрации времени осреднения в пределах от 1 до 30 с.

На задней панели расположен выключатель сети и предохранитель на 0,5 А.

Разъем "ВЫХОД" - для подключения внешнего регистрирующего прибора или подключения к ЭВМ. На этот же разъем выведен переменный сигнал с выхода усилителя.

Индикатор включения прибора "СЕТЬ" расположен на передней панели.

### 3.4. Указания мер безопасности.

Для обеспечения мер безопасности необходимо следить за исправным состоянием сетевого шнура и вилки.

Перед началом работы с прибором подсоедините клемму "з", размещенную на задней панели, с защитным заземлением рабочего веста.

При работе с вольтметром СКЗ и его ремонте **ПОМНИТЕ**, что цепи сетевого питания, предохранитель и силовой трансформатор находятся под напряжением сети.

Замена предохранителя и ремонт, связанный с перепайкой элементов электрической схемы, производите только после отключения прибора от сети.

### 3.5. Подготовка прибора к работе.

#### 3.5.1. Положение органов управления.

Перед включением прибора установите органы управления в следующее положение:

- тумблер "СЕТЬ" на задней панели в положение "выключено";
- переключатель "x1, x100" в положение "x100";
- переключатель "мВ - 3,10, 30, 100, выкл." в положение "выкл.";
- переключатель "ОСРЕД." в положение "выключено" (все кнопки отжаты).

3.5.2. Включение прибора и подготовка его к работе.

Включите прибор тумблером "СЕТЬ" и прогрейте его в течение 15 минут.

Подключив ко входу прибора исследуемый сигнал, можно приступить к измерениям.

В процессе измерений производится выбор диапазона измеряемых напряжений. Для измерений с наименьшими погрешностями следует работать во второй половине шкалы стрелочного прибора. Время осреднения выбирается из условия отсутствия значительных колебаний стрелки измерительного прибора.

3.5.3. Выключение прибора.

Закончив измерения, переключите тумблер "x1, x100" в положение "x100", переключатель "мВ-3, 10, 30, 100, выкл." поставьте в положение "ВЫКЛ". Выключить тумблером "СЕТЬ".

## *Приложение 2*

# **ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК Х6-4**

## 1. Назначение

1.1. Прибор для исследования корреляционных характеристик Х6-4 3.031.037 предназначен для измерения нормированных функций автокорреляции и взаимной корреляции, выделения периодического сигнала из шума, измерения плотности распределения вероятностей, функции распределения вероятностей стационарных эргодических случайных процессов и воспроизведения результатов измерения на внутреннем индикаторе, двухкоординатном самописце, внешнем осциллографе, цифropечатающем устройстве или перфораторе.

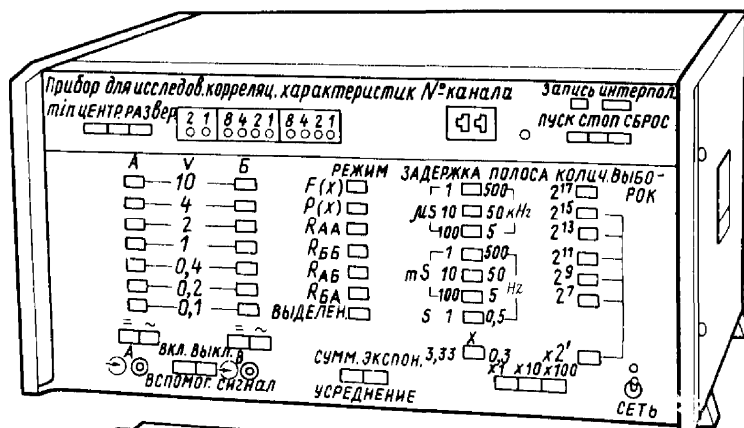


Рис. 1. Внешний вид прибора Х6-4.

1.2. Прибор может работать в следующих условиях эксплуатации:

- температура окружающей среды - от 278 до 313 К (от 5

- до 40 °С);
- атмосферное давление –  $(100+4)$  кН/м<sup>2</sup>;
- атмосферная влажность воздуха – 95% при температуре 303 К;
- относительная влажность воздуха – 95% при температуре 303 К;
- питание прибора от сети переменного тока
- напряжением  $(220+22)$  В.

1.3. Прибор имеет следующие основные области применения:

- исследование степени идентичности двух сложных сигналов;
- настройка двух и более трактов радиоэлектронной аппаратуры на идентичность их комплексных характеристик;
- обнаружение причин возникновения шумов и паразитных колебаний в сложной радиоэлектронной аппаратуре в генераторах СВЧ, в высокостабильных генераторах и аппаратуре связи;
- исследование нелинейности трактов без перерыва в работе системы на время измерения;
- исследование нелинейных искажений сложных по форме сигналов;
- измерение переходного затухания в системах многоканальной техники связи без перерыва в работе системы на время измерения;
- обнаружение источников вибраций в самолетах и кораблях, в скоростном железнодорожном транспорте, в двигателях и прогнозирование отказов их оборудования и частей;
- исследование шумов и сигналов в акустике и гидроакустике;
- исследование отражающих и поглощающих свойств различных материалов при звуковых воздействиях;

- выделение периодических сигналов из шума;
- исследования в биологии и в медицине;
- исследования в физике плазмы;
- исследования в радиоастрономии;
- исследования в сейсмологии.

Все измерения и исследования прибора позволяют проводить в непосредственной близости от исследуемого объекта. Одновременное измерение 100 значений корреляционной функции или закона распределения вероятностей обеспечивает большую производительность труда. Предусмотрена совместная работа прибора с ЭВМ для более сложных вычислений на базе данных измерений.

## **2. Технические данные.**

2.1. Прибор обеспечивает измерение характеристик входных сигналов в частотном диапазоне от 0 до 250 кГц по А и Б.

2.2. Прибор обеспечивает измерение характеристик входных сигналов с максимальным значением напряжения от  $(40 \pm 4)$  мВ до  $(10 \pm 1)$  В.

2.3. Входное сопротивление входа А и входа Б - не менее 1 МОм и входная емкость - не более 100 пФ.

2.4. Шаг задержки времени  $1,0 \pm 0,01$ ,  $3,33 \pm 0,03$ ,  $10 \pm 0,1$ ,  $33 \pm 0,3$ ,  $100 \pm 1$ ,  $333 \pm 1$ ,  $1000 \pm 10$  мкс;  $3,33 \pm 0,03$ ,  $10 \pm 0,1$ ,  $33,3 \pm 0,3$ ,  $100 \pm 1$ ,  $333 \pm 3$ ,  $1000 \pm 10$  мс.

2.5. Прибор обеспечивает нормальную работу при подключении внешнего тактового генератора со следующими параметрами положительных прямоугольных импульсов: амплитуда -  $(3,5 \pm 1)$  В, частота повторения - не более 1 МГц, длительность импульсов - не менее 0,5 мкс.

2.6. Прибор обеспечивает экспоненциальное усреднение

(цифровой эквивалент усреднения в RC-фильтре) с временем усреднения  $12.8 \pm 2$ ,  $25.6 \pm 4$ ,  $51 \pm 8$ ,  $102 \pm 16$ ,  $204 \pm 20$ ,  $409 \pm 40$ .  $819 \pm 80$  мс,  $1.6 \pm 0.16$ ,  $3.2 \pm 0.3$ ,  $6.5 \pm 0.6$ ,  $13.1 \pm 1.3$ ,  $131 \pm 13$ ,  $1311 \pm 131$  и т.д. до  $10^7$  с.

2.7. Прибор обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум на выходе коррелометра не меньше 20 дБ для соотношения полосы усреднителя (интегратора) к полосе сигнала не более  $10^{-4}$ , при флюктуационной погрешности - не более  $\pm 15$  %.

2.8. Погрешность измерения дискретных значений нормированной функции автокорреляции и взаимной корреляции определяется как среднее значение абсолютной величины отклонения нормированного результата измерения от расчетного значения и не должна превышать допустимого значения 5% при отношении полосы интегратора к полосе сигнала не более 10.

2.9. Погрешность измерения дискретных значений плотности вероятности определяется как среднее значение абсолютной величины нормированного отклонения результата измерения от расчетного значения и не должна превышать допустимого значения 12% при отношении полосы интегратора к полосе сигнала не более  $10^{-4}$ .

2.10. Погрешность измерения дискретных значений функции распределения вероятности определяется как среднее значение абсолютной величины нормированного отклонения результата измерения от расчетного значения и не должна превышать допустимого значения 10% при отношении полосы интегратора к полосе сигнала не более  $10^{-4}$ .

2.11. На гнезде X САМОПИСЕЦ прибор имеет пилообразное напряжение, размах которого – не менее 1,0 В и длительность –  $(100 \pm 10)$  с.

2.12. На гнезде X ОСЦИЛЛОГРАФ прибор имеет

импульсы синхронизации с частотой следования -  $(100\pm 10)$  Гц, длительностью  $(0,5\pm 0,3)$  мкс и амплитудой не менее 2,4 В.

2.13. На гнезде Y прибор имеет отрицательное постоянное напряжение по абсолютному значению не менее 1,0 В.

2.14. На гнезде Z САМОПИСЕЦ прибор имеет положительное постоянное напряжение не менее 2,4 В.

2.15. На гнезде Z ОСЦИЛЛОГРАФ прибор имеет импульсы с амплитудой не менее 2,4 В, длительностью  $(1,0\pm 0,5)$  мкс и частотой следования  $(10\pm 1)$  кГц.

2.16. На контактах Б2 Б3, Б4, Б5, Б6 разъема КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ прибор имеет постоянные напряжения  $5\pm 0,15$ ; минус  $12\pm 0,4$ ;  $+12\pm 0,4$ ;  $27\pm 0,8$ ; минус  $27\pm 0,8$ В соответственно относительно корпуса Б1.

2.17. В приборе есть возможность дистанционного управления запуском, остановкой и сбросом результата измерения.

2.18. На контактах разъема ЦВМ прибор имеет следующие напряжения: А1...А8 - постоянное напряжение - не более 0,5В; на Б6 - меандр частотой 10кГц, амплитудой - не менее 2.4В; на Б7 - импульсы синхронизации частотой  $(100\pm 10)$  Гц длительностью  $(0,5\pm 0,3)$  мкс; Б1-корпус.

2.19. На разъеме СИНХР. ВНУТР. прибор имеет импульсы с частотой следования  $(10\pm 1)$  кГц, длительностью  $(0,5\pm 0,3)$  мкс и напряжением - не менее 2,4 В.

2.20. Прибор в режиме ВЫДЕЛЕНИЕ сигнала из шума имеет возможность подключения внешнего синхронизирующего импульсного генератора импульсов со следующими параметрами: амплитудой  $(3,5\pm 1,0)$  В, частотой следования  $(8\pm 1)$  кГц, длительностью  $(1,0\pm 0,5)$  мкс.



2.21. Прибор обеспечивает свои технические характеристики в пределах норм, установленных техническими условиями, после самопрогрева в течение 15 мин.

2.22. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением  $(220 \pm 22)$  В, частотой  $(50 \pm 0,5)$  Гц при содержании гармоник до 5 %.

2.23. Потребляемая мощность при напряжении сети 220В - не более 150 Ватт.

2.24. Нароботка на отказ - не менее 1000 ч.

## 2. Комплект поставки

3.1. Прибор поставляется в комплекте, указанном в табл.1.

*Таблица 1*

<b>Наименование изделий комплекта</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Количество, шт.</b>	<b>Примеч.</b>
Прибор для исследования корреляционных характеристик Х6-4	3.031.037	1	
Лампа СМИ 10-55 -2	16 0.535.014-74	1С	
Вставка плавкая ВП1-1-3А	0.480.003	2	
Кабель соединительный	4.850.223	5	
Кабель соединительный	4.853.209	1	
Кабель питания	4.853.216	1	
Плата ремонтная	6.121.145	1	
Техническое описание и инструкция по эксплуатации	3.031.037 ТО	1	С альбомом электрических схем
Формуляр	3.031.037 ФС	1	
Ящик укладочный	4.161.415-01	1	
Ящик укладочный	4.161.044-01	1	

## 4. Устройство и работа изделия и его составных частей.

### 4.1. Принцип действия.

4.1.1. Прибор для измерения корреляционных характеристик Х6-4 является сложным цифровым прибором.

Чтобы легче понять принцип его действия, рассмотрим принцип работы аналогового эквивалента.

Теоретическое определение корреляционной функции двух сигналов  $a(t)$  и  $b(t)$  имеет вид:

$$R_{ab}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t) \cdot b(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где  $\tau$  - время задержки;  $T$  - время усреднения.

Практически невозможно измерить корреляционную функцию в соответствии с (1), так как технически трудно осуществлять время усреднения, приближающееся к бесконечному значению. Поэтому измеряется оценка корреляционной функции:

$$R_{ab}^*(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) \cdot b(t - \tau) dt, \quad (2)$$

где время усреднения  $T$  имеет конечное значение.

Конечное время усреднения обязательно вызывает появление случайной погрешности из-за остаточного шума на выходе коррелометра равной разнице между корреляционной функцией (1) и ее оценкой (2):

$$\Delta R_{ab}(\tau) = R_{ab}(\tau) - R_{ab}^*(\tau). \quad (3)$$

Чем больше время усреднения  $T$ , тем меньше

случайная погрешность  $\Delta R_{ab}(\tau)$ .

Если сигналы  $a(t)$  и  $b(t)$  поступают от разных источников или разных трактов аппаратуры, функция обычно называется *функцией взаимной корреляции*.

Если не задержанный сигнал  $a(t)$  и задержанный сигнал  $b(t)$  поступают от одного источника, функция корреляции часто называется *функцией автокорреляции* и может быть записана в упрощенном виде:

$$R_{ab}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t) \cdot a(t - \tau) dt, \quad (4)$$

а ее оценка:

$$R_{aa}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) \cdot a(t - \tau) dt. \quad (5)$$

Указанные выражения объясняют работу аналогового коррелометра, который должен осуществить следующие операции: задержку во времени одного исследуемого сигнала, перемножение исследуемых сигналов и усреднение результата перемножения.

4.1.2. Последовательно перейдем к рассмотрению цифрового коррелометра. На рис. 2 показан принцип квантования сигналов во времени с целью их цифровой обработки.

На перемножитель поступают не аналоговые сигналы, а их выборки,  $a_1, a_2, a_3$  и т.д. и  $b_1, b_2, b_3$  и т.д. Такие сигналы называются *квантованными во времени*. Дальше они перемножаются и усредняются (рис. 2а).

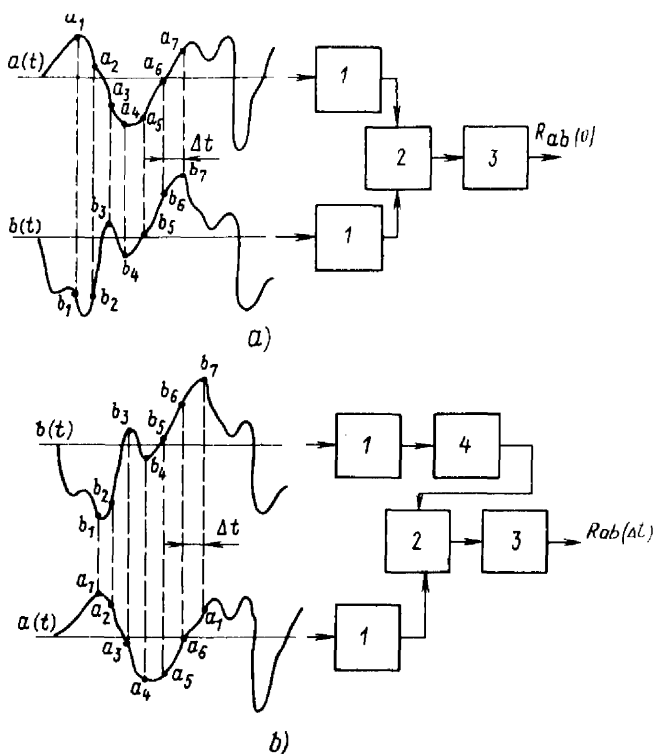


Рис. 2. Принцип квантования сигналов во времени:

а) без задержки времени;

б) при времени задержки  $\Delta t$ :

1 - квантователь; 2 - перемножитель; 3 - усреднитель;

4 - задержка времени.

Устройство задержки времени коррелометра работает таким образом, что оно задерживает дискретное значение квантованного сигнала  $b(t)$  на величину  $\Delta t$ , равную интервалу между двумя выборками, например,  $b_1$  и  $b_2$  или  $b_2$  и  $b_3$ . Тогда значения сигнала  $a_1$  и  $b_2$  поступают одновременно с  $a_1$ , а  $b_2$  одновременно с  $a_3$  и т.п., но между значениями сигналов  $a(t)$  и  $b(t)$  уже введена задержка времени, равная  $\Delta t$  (рис.2б). После перемножения

получаются два значения функции корреляции при времени задержки  $\Delta t=0$  (рис. 2а) и при времени задержки  $\Delta t$  (рис. 2б).

Количество дискретных значений функции корреляции можно неограниченно увеличивать, если в схеме будет использовано неограниченное количество устройств задержки времени с одинаковым шагом задержки  $\Delta t$ .

На рис. 3а показана электрическая структурная схема, объединяющая схемы рис. 2а и рис. 2б, а на рис. 3б показана электрическая структурная схема, одновременно измеряющая 100 значений корреляционной функции, что позволяет наблюдать на регистрирующем устройстве (на экране осциллографа) сразу весь график функции корреляции.

4.1.3. Все управление работой перемножителя и интегратора производится с помощью логических электронных схем.

Для этого работа узлов прибора синхронизирована таким образом, что продукты переключения дискретных значений исследуемых сигналов с определенной задержкой времени разделены во времени и поэтому легко сканируются (распределяются) в отдельные ячейки дискретной памяти. На рис. 4 показана упрощенная схема принципа работы коррелометра.

Представим себе, что оба круга (в устройстве задержки времени и в устройстве дискретной памяти) вращаются с одинаковой скоростью в указанном стрелками направлении. При этом дискретные значения квантованного сигнала  $b(t)$  поочередно записываются в ячейках устройства задержки времени и перемножаются на

дискретные значения сигнала  $a(t)$ . За время  $\Delta(t)$  одно дискретное значение сигнала успевает перемножаться на 100 дискретных значений сигнала  $b(t)$ .

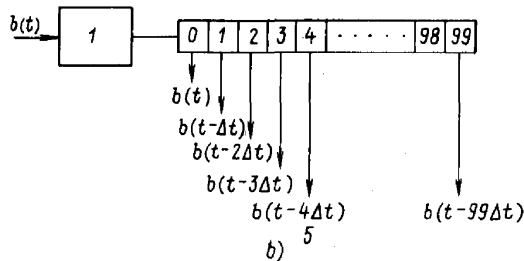
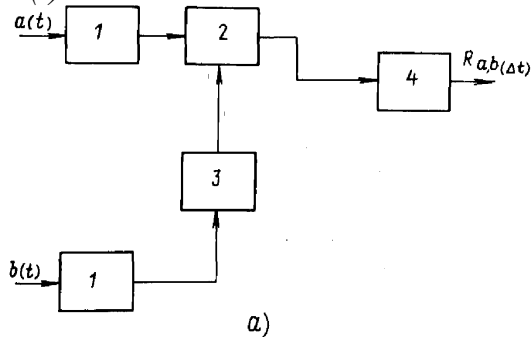


Рис. 3. Структурная схема измерения корреляционной функции:  
 а) последовательного действия; б) параллельного действия:  
 1 - квантователь; 2 - перемножитель; 3 - задержка времени;  
 4 - интегратор.

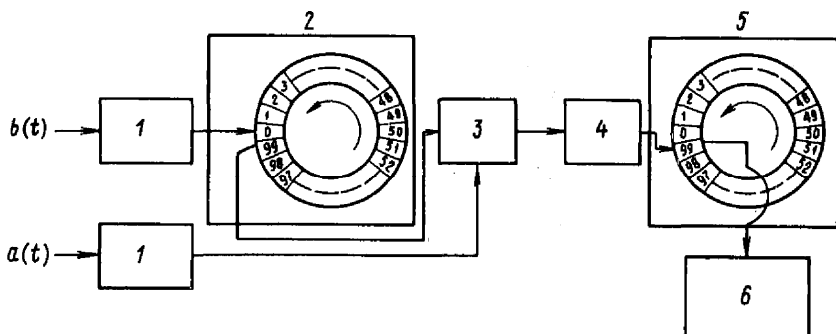


Рис. 4. Принцип работы коррелометра:

1 - квантователь; 2 - устройство задержки времени; 3 - перемножитель; 4 - усреднитель; 5 - устройство дискретной памяти; 6 - цифровой или аналоговый индикатор.

Благодаря жесткой синхронизации работы обоих кругов результаты перемножения записываются в соответствующие ячейки дискретной памяти и не могут смешиваться между собой. Поэтому каждой ячейке дискретной памяти соответствует та же самая задержка времени, что и в ячейках устройства задержки с равномерным шагом  $\Delta t$ . После интервала времени  $100 \Delta t$  опять повторяется цикл записи новых дискретных значений сигнала  $\Delta(t)$  и перемножения с квантованным сигналом  $a(t)$ . В дискретной памяти начинается накопление результатов перемножения, которое продолжается определенное время, часто называемое временем усреднения или интегрирования. Один цикл перемножения длится 100 мкс.

С устройства дискретной памяти сигналы последовательно поступают на входной индикатор любого вида: цифровой или аналоговый, которыми могут служить счетчик, ЦПМ, перфоратор, самописец или осциллограф. Использование ЦПМ позволяет сохранить документальное подтверждение измерений, а перфоратор позволяет использовать результаты измерения для дальнейших вычислений с помощью ЭВМ. Осциллограф обеспечивает одновременное наблюдение всех 100 значений корреляционной функции на экране электронно-лучевой трубки. Отсюда возник термин "измерение в реальном масштабе времени".

4.1.4. В приборе предусмотрены два способа усреднения: суммирование и экспоненциальное усреднение.

На рис.5 показана упрощенная схема суммирования. При этом способе производится последовательное

суммирование каждого нового результата переключения со старым результатом, ранее записанным в определенной ячейке дискретной памяти. Когда заканчивается весь цикл суммирования, результаты измерения запоминаются к даже при выключенных входных сигналах  $a(t)$  и  $b(t)$  индикатор будет показывать результаты измерения до момента выключения питания прибора.

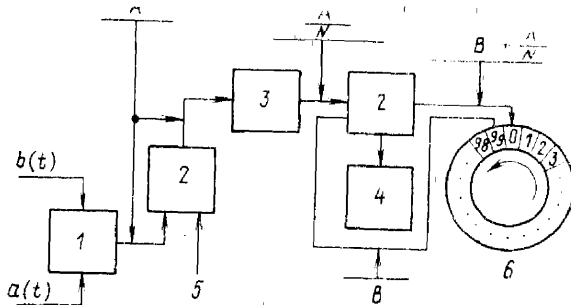


Рис. 5. Принцип суммирования результатов перемножения:  
 А - новый результат перемножения; В - старый результат перемножения; 1 - перемножитель; 2 – сумматор; 3 - делитель; 4 - индикатор. 5 - сигнал отсутствует; 6 - дискретная память.

4.1.5. На рис.6 показана упрощенная схема экспоненциального усреднения.

Способ экспоненциального усреднения позволяет лучше исследовать изменяющиеся средние характеристики, например, при исследовании нестационарных процессов таких, как шум океана, биопотенциалы мозга человека, где нежелательно запоминание всех старых результатов измерения. При исследовании же стационарных процессов, средние характеристики которых не изменяются во времени, этот способ не уступает способу суммирования во всех отношениях, за исключением того, что он не запоминает результатов измерения (при включении сигналов  $a(t)$  и



$b(t)$ . Результаты измерения автоматически стираются. На рис.6 достаточно наглядно проиллюстрировано складывании и вычитание старого результата измерения и нового результата перемножения, что дает полное представление о принципе экспоненциального усреднения.

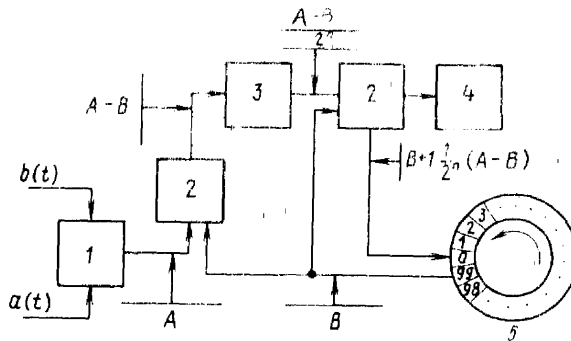


Рис.6. Принцип экспоненциального усреднения результатов перемножения А - новый результат перемножения; В - старый результат перемножения; 1 - перемножитель; 2 - сумматор; 3 - делитель; 4 - индикатор; 5 - дискретная память.

4.1.6. В приборе используется квантование не только по времени, но также и по уровню. Сигнал  $b(t)$ , который необходимо задерживать во времени, квантуется грубо (рис. 7) согласно выражению:

$$b^k(i\Delta t) = \begin{cases} -(k+1)C_2, & \text{при } -b_{k+1} < b(i\Delta t) \leq -b_k \\ 0, & \text{при } -b_0 < b(i\Delta t) \leq b_0 \\ (k+2)C_2, & \text{при } -b_{k+1} < b(i\Delta t) \leq b_{k+1}, \end{cases}$$

где -  $i$  - номер дискретного значения;

$k$  - 0; 1; 2;

$C_2$  - разность между соседними уровнями квантования (см.

рис.7)

$b_k$  - пороги квантования по уровню (см. рис. 7).

Квантованный сигнал  $b^k(\Delta t)$  поступает в устройство задержки, которое выполнено на регистрах сдвига.

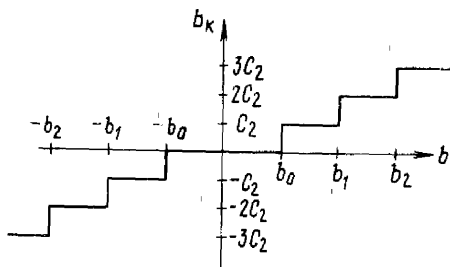


Рис. 7. Характеристика грубого квантования по уровню.

В другом канале прибора, где задержка времени не вводится, квантование сигнала  $a(t)$  производится на  $128 = 2^7$  уровней, т.е. объем квантования составляет 7 битов. Квантованный сигнал  $a(i\Delta t)$  поступает на устройство перемножения в цифровой форме. Поэтому вся дальнейшая обработка сигналов производится в цифровых устройствах перемножения, суммирования и запоминания, что обеспечивает высокую точность и стабильность работы прибора.

4.1.7. Теми же самыми устройствами цифрового коррелометра обеспечиваются измерения плотности распределения и функции распределения вероятностей, а также режим выделения периодического сигнала из шума.

Для измерения плотности распределения вероятностей необходимо иметь так называемое дифференциальное окно. Измеряя время пребывания исследуемого напряжения в этой окне, определяют плотность распределения вероятностей, которая

пропорциональна измеренному времени. Функции дифференциальных коридоров выполняют 100 уровней квантования канала А.

Дискретное значение исследуемого напряжения соответствует определенному уровню. Схема прибора вырабатывает импульс, время появления которого пропорционально уровню напряжения. Этот импульс записывается в соответствующую ячейку дискретной памяти. После некоторого времени суммирования, или усреднения, накапливаются количества импульсов в отдельных ячейках памяти, пропорциональные плотности распределения вероятности. Каждая ячейка памяти строго соответствует определенному уровню исследуемого напряжения.

При измерении функции распределения в ячейки дискретной памяти записываются тактовые импульсы квантования с частотой повторения 3 МГц в течение времени, пропорционального амплитуде квантованного исследуемого сигнала.

Таким образом, без дополнительных устройств по сравнению с режимом измерения корреляционных функций коррелометр Х6-4 обеспечивает выполнение совершенно новых функций измерения законов распределения вероятностей.

В режиме выделения периодического сигнала из шума происходит измерение взаимокорреляционной функции между синхроимпульсами, которые отмечают периоды исследуемого полезного сигнала, и суммарным сигналом (периодический сигнал и шум).

## 4.2. Конструкция прибора.

Измеритель корреляционных характеристик состоит из одного блока. Блок выполнен в корпусе.

Блок состоит из следующих частей:

- узла питания,
- корпуса с платами на печатном монтаже,
- передней панели,
- задней панели.

Все узлы блока разработаны с применением большого количества унифицированных деталей.

Все платы с печатным монтажом устанавливаются при помощи разъемов типа ГРПМ-61 и ГРПМ-31. Ширина плат – 200 мм и высота – 120 мм и 170 мм берутся из соображения возможности размещения радиоэлементов по функциональному назначению, компоновки блока питания и передней панели. Задняя панель к остальной части конструкции присоединяется при помощи винтов и разъемов.

Расположение деталей на печатных платах дано в сборочных чертежах 3.051.152 СБ, 3.051.153 СБ, 2.068.012 СБ, 3.051.154 СБ, 3.051.156 СБ, 3.045.030 СБ, 3.051.173 СБ, 3.051.157 СБ, 6.283.000 СБ, 5.406.152 СБ, 5.002.023 СБ, 5.408.027 СБ, 5.406.153 СБ, 5.406.154 СБ, 5.108.056 СБ, 5.108.053 СБ, 5.087.073 СБ, 3.051.174 СБ.

На задней панели размещены элементы блока питания. В качестве радиаторов нагреваемых полупроводниковых приборов служит задняя панель. Крышка защищает от случайного прикосновения к полупроводниковым приборам, находящимся под

напряжением. Платы с печатным монтажом для удобства настройки и ремонта устанавливаются на металлической плате, прикрепленной также к задней панели. Для обеспечения лучшей жесткости и во избежание механического резонанса трансформаторы узла питания крепятся к той же металлической плате и к боковым кронштейнам корпуса и через разъемы подсоединяются к остальной части прибора.

Прежде чем приступить к работе с прибором, ознакомьтесь с органами управления, разъемами, контрольными гнездами и их назначением. На рис. 19 и 20 представлены передняя и задняя панели измерителя корреляционных характеристик. Перечни органов управления и разъемов измерителя корреляционных характеристик и их назначение приведены в табл. 2 и 3.

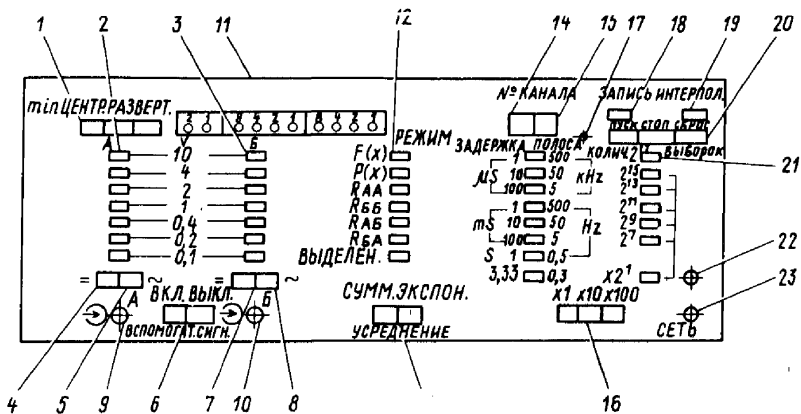


Рис. 19. Внешний вид передней панели прибора Х6-4.

Таблица 2

Обозначение на рис. 19	Наименование органа управления или разъема, его изображение на передней панели коррелометра	Назначение
1	Переключатель min ЦЕНТР., РАЗВЕРТКА	Выбор формата изображения измеряемой характеристики на внешнем осциллографе или самописце
2	Кнопки переключателя: А,	Выбор уровня первого исследуемого сигнала А
3	Кнопки переключателя Б,	Выбор уровня второго исследуемого сигнала Б
4	Кнопка переключателя А,	Включение входа, пропускающего постоянную составляющую сигнала А
5	Кнопка переключателя А,	Включение входа, не пропускающего постоянной составляющей сигнала А для диапазона частот от 0Гц до 200 кГц
6	Кнопки переключателя ВСПОМОГАТ. СИГНАЛ ВКЛ., ВЫКЛ.	Включение и выключение вспомогательного сигнала
7	Кнопка переключателя Б, =	Включение входа, пропускающего постоянную составляющую сигнала Б
8	Кнопка переключателя Б, ~	Включение входа, не пропускающего постоянной составляющей сигнала Б для диапазона частот от 0 до 25 кГц
9	Разъем А,	Подключение исследуемого сигнала А

10	Разъем Б,	Подключение исследуемого сигнала Б
11	Лампочки цифрового индикатора:	
	I и II слева 2, 1	Регистрация значений результата измерения, равных соответственно 200 и 100
	III, IV, V, VI слева 8, 4, 2, 1	Регистрация значений результата $f$ измерений, равных соответственно 80, 40, 20, 10
	VII, VIII, IX, X слева 8, 4, 2, 1	Регистрация значений результата измерений, равных соответственно 8, 4, 2, 1
12	Кнопки переключателя:	
	РЕЖИМ: F(x)	Включение режима измерения функции распределения
	P(x)	Включение режима измерения плотности распределения
	RR <sub>AA</sub> , R <sub>BB</sub>	Включение режимов измерения функций автокорреляции сигнала А или сигнала Б
	RR <sub>AB</sub> , R <sub>BA</sub>	Включение режимов измерения соответствующих функций взаимной корреляции между сигналом А и задержанным сигналом Б или между сигналом Б и задержанным сигналом А

	ВЫДЕЛЕНИЕ	Включение режима выделения периодического сигнала, отмеченного синхроимпульсами, из шума
13	Кнопки переключателя УСРЕДНЕНИЕ:	
	СУММ.	Включение режима усредняющего суммирования (идеального интегратора)
	ЭКСПОН.	Включение режима экспоненциального усреднения (цифрового эквивалента RC-фильтра)
14	Переключатель №КАНАЛА	Подключение цифрового индикатора к определенному номеру выходного канала для измерения значения исследуемой характеристики, соответствующего данному номеру канала (точки)
15	Кнопки переключателя ЗАДЕРЖКА, ПОЛОСА	Включение шага задержки времени от 1 мкс до 3,33 с для коррелометра или соответственно частотной полосы от 0,15 Гц до 500 кГц для преобразования Фурье
16	Кнопки: x1, xTO, x100	Включение множителя уровня выходного сигнала
17	Лампочка ПУСК	Индикация окончания времени усреднения
18	Кнопка ЗАПИСЬ	Включение развертки самописцу
19	Кнопка ИНТЕРПОЛЯЦИЯ	Соединение отдельных точек исследуемой характеристики на самописце и экране внешнего осциллографа
20	Кнопки переключателя:	



	ПУСК, СТОП. СБРОС	Пуск процесса измерения, Остановка процесса измерения, Сброс результатов измерения
21	Кнопки переключателя	
	КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК	Установка числа дискретных значений исследуемых сигналов во времени от $2^7$ до $2^{17}$ значений
22	Лампочка	Сигнализация включения сети переменного тока
23	Переключатель СЕТЬ	Включение и выключение питания от сети переменного тока

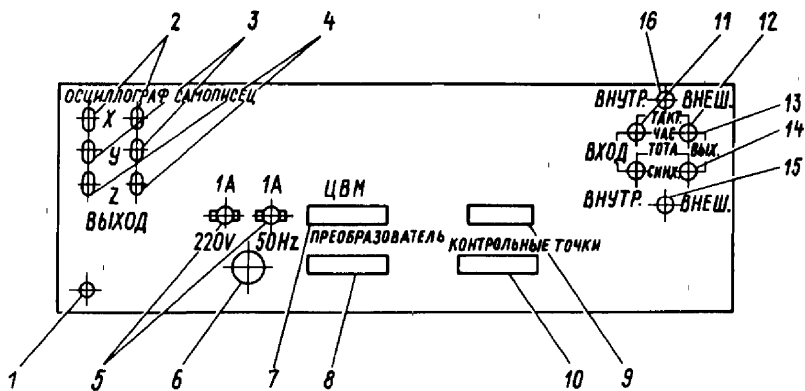


Рис. 20. Внешний вид задней панели прибора Х6-4.

Таблица 3

Обозначение на рис.20	Наименование органа управления или разъема, его изображение на передней панели коррелометра	Назначение
1	Клемма ⊥	Подсоединение провода заземления
2	Разъемы ОСЦИЛЛОГРАФ, САМОПИСЕЦ, X	Подключение синхроимпульсов к осциллографу и напряжения развертки к самописцу
3	Разъем ОСЦИЛЛОГРАФ, САМОПИСЕЦ, Y	Подключение результатов измерения к осциллографу или самописцу
4	Разъемы ОСЦИЛЛОГРАФ, САМОПИСЕЦ, Z	Подключение напряжения для автоматического управления яркостью электронного луча осциллографа и управления опусканием и поднятием пера самописца
5	Предохранители I A. 2 шт.	Защита схемы коррелометра от перегрузок
6	Разъем 220 V 50 Hz	Подсоединение шнура питания к сети переменного тока
7	Разъем ЦВМ	Подключение результатов измерения к цифropечатающему механизму или перфоратору
8	Разъем ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	Подключение результатов измерения коррелометра к блоку преобразования
9	Счетчик	Регистрация времени наработки прибора

10	Разъем КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ	Контроль напряжений питания прибора, а также подключение напряжений дистанционного управления прибором (команды ПУСК, СТОП, СБРОС)
11	Разъем ТАКТ, ЧАСТОТА, ВХОД	Подключение внешнего генератора тактовой частоты
12	Разъем ТАКТ, ЧАСТОТА, ВЫХОД	Контроль тактовых импульсов
13	Разъем СИНХР., ВХОД	Подключение внешних синхроимпульсов в режиме выделения периодического сигнала из шума
14	Разъем СИНХР., ВЫХОД	Подключение внутренних синхроимпульсов к исследуемому объекту при работе в режиме выделения
15	Переключатель ВНУТР., ВНЕШН.	Переключение внешних или внутренних синхроимпульсов

## 5. Маркировка и пломбирование.

5.1. На платах печатного монтажа маркировка элементов производится согласно электрическим принципиальным схемам со стороны дорожек.

## 6. Общие указания по эксплуатации.

6.1. Перед началом эксплуатации следует произвести визуальный осмотр прибора в целом, проверить наличие пломб и штампов ОТК на изделии.

6.2. Комплектность прибора проверяется путем

слияния деталей, имеющихся в наличии, с данными формуляром о КОМПЛЕКТЕ ПРИБОРА.

6.3. Проверка измерителя корреляционных характеристик Х6-4 на функционирование производится в следующей последовательности:

- заземлите корпус прибора;
- подключите прибор к сети;
- нажмите на приборе Х6-4 следующие кнопки: РЕЖИМ F(x), ЗАДЕРЖКА 1ms, КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК 2<sup>9</sup>, xl, УСРЕДНЕНИЕ СУММ, РАЗВЕРТКА, СПРОС, ПУСК.

При этом цифровой индикатор прибора Х6-4 на точках 01-49 должен показывать  $128 \pm 3$ , а на точках 51-98 не менее 252.

## **7. Указание безопасности.**

7.1. При проведении регулировочных и ремонтных работ требуется вскрытие прибора-измерителя корреляционных характеристик Х6-4, при этом необходимо выполнить общие правила работы с электрическими установками.

7.2. Замену любого элемента производить только при отключенном от напряжения сети приборе.

7.3. Во избежание случайного поражения обслуживающего персонала током до включения вилки в сеть необходимо заземлить прибор.

7.4. Замените вспомогательные приборы, примененные при настройке и ремонте приборов.

7.5. Проверить напряжение питания прибора  $220 \pm 22$ В от сети переменного тока частотой  $(50 \pm 0,5)$  Гц.

7.6. Транзисторы, находящиеся на задней панели прибора под крышкой с надписью "ВНИМАНИЕ!

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ", имеют напряжение 36 В.

## 8. Подготовка к работе.

8.1. Перед работой, необходимо изучить техническое описание, инструкцию по эксплуатации и ознакомиться со схемами, приведенными в описи альбома 3.031.037 ОП.

8.2. Выньте прибор из укладочного ящика и убедитесь в отсутствии внешних повреждений.

8.3. Заземлите корпус коррелометра с помощью провода заземления, подключаемого к соответствующей клемме на задней панели прибора. Включите вилку шнура питания в розетку сети 220 В 50Гц.

8.4. Подготовьте измеритель следующим образом:

- а) нажмите кнопки переключателей А и Б 10 V;
- б) нажмите кнопку переключателя ВСПОМОГ. СИГНАЛ ВЫКЛ.;
- в) подключите присоединительные кабели к разъемам А и Б ;
- г) нажмите кнопку переключателя РЕЖИМ  $R_{AA}$  или  $R_{BB}$  в зависимости от того, к какому каналу будет подключаться исследуемый объект;
- д) нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ СУММ;
- е) наберите цифру на переключателе № КАНАЛА "00";
- ж) нажмите кнопку переключателя ЗАДЕРЖКА, 1  $\mu$ s;
- з) нажмите кнопку X10;
- и) нажмите кнопки переключателя КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК  $2^{13}$  и  $2^1$ ;
- к) нажмите кнопку "~";
- л) нажмите кнопку РАЗВЕРТКА;
- м) включите тумблер СЕТЬ;
- н) проведите прогрев прибора в течение 15 мин и нажмите

- кнопку СБРОС;
- о) подключите внешний осциллограф типа СІ-65 или самописец типа ПДП4-С02 к соответствующим разъемам на задней панели;
  - п) если предполагается регистрация результатов измерения на ЦВМ или перфораторе ЦВМ, подключите их к разъему ЦВМ на задней панели прибора.

*Примечание 1.*

Для регистрации результатов измерения на самописце. надо иметь в виду, что запись на самописце производится только при наличии в памяти прибора Х6-4 измеренного результата и после нажатия кнопки ЗАПИСЬ. По истечении времени записи, равного 100 с., прибор автоматически переходит в режим работы с осциллографом.

*Примечание 2.*

На разъеме ЦВМ выведена информация о результате измерения в двоичном коде восемью разрядами, импульсный сигнал, указывающий начало функции, а также тип меандра с частотой следования 10 кГц. Для подключения внешних регистрирующих устройств к данному разъему необходимо изготовить интерфейсную схему, которая позволит произвести сопряжение.

Регистрация на внешних устройствах возможна только после окончания процесса измерения.

## **9. Порядок работы.**

9.1. Подготовьте прибор в соответствии с разделом 8 настоящего описания.

9.2. Ввиду того, что прибор Х6-4 является многофункциональным, описание работы излагается для каждого режима измерения отдельно.

### 9.3. Измерение дискретных значений функции корреляции.

9.3.1. Подключите присоединительный кабель 4.850.223 между разъемом А или Б и объектом

исследования.

9.2.2. Нажмите кнопку ПУСК.

9.3.3. В зависимости от того, к какому разъему (А или Б) присоединен объект исследования, установите входной уровень сигнала с помощью переключателя А или Б. Для этого нажатием кнопок переключателя установите показание цифрового индикатора для канала "00", равное 228.

*Примечания:*

1. Порядок отсчета на цифровом индикаторе приведен в п. 9.3.4.
2. При получении результатов измерения, отличных от 228, необходимо после изменения уровня входного сигнала нажимать кнопки СБРОС и затем ПУСК.
3. Рекомендуется с помощью внешнего осциллографа проверить всю кривую функции автокорреляции. Установкой входного уровня надо добиться, чтобы вся кривая располагалась в интервале от 0 до 99 каналов.

9.3.4. После нажатия кнопок СБРОС, ПУСК после окончания вычислений, когда погаснет лампочка (ПУСК) индикации времени обработки, проведите измерение дискретных значений функции автокорреляции.

Для этого устанавливайте нужный номер канала с помощью переключателя № КАНАЛА. Отсчет дискретных значений функции получите на цифровом индикаторе. Обратите внимание, что этот индикатор имеет три части. Показания первой части необходимо умножить на 100. Показания второго столбца необходимо умножить на 10. Пример отсчета показания индикатора приведен на рис. 21.

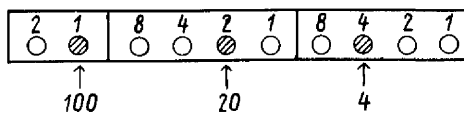


Рис. 21. Пример отсчета на цифровом индикаторе.

9.3.5. Нормирование дискретных значений функции автокорреляции произведите следующим образом:

$$\rho(n\Delta t) = \frac{A_n - 128}{A_{00} - 128}, \quad (7)$$

где  $\rho(n\Delta t)$ - нормированное значение функции автокорреляции;  $n$  - номер канала, устанавливаемый переключателем № КАНАЛА;  $\Delta t$  - шаг задержек, устанавливаемый переключателем ЗАДЕРЖКА.

*Примечание.*

При правильной установке входного уровня сигнала показание цифрового индикатора для нулевого номера канала приблизительно составляет 228.

9.3.6. Для установки другого значения шага задержки времени производите следующие операции:

- нажмите кнопку СБРОС;
- нажмите другую нужную кнопку переключателя ЗАДЕРЖКА;
- нажмите кнопку ПУСК и повторите измерение при новом значении шага задержки времени.

9.3.7. Для установки другого значения числа выборов произведите следующие операции:

- нажмите кнопку СБРОС;
- нажмите другую нужную кнопку переключателя КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК.
- нажмите кнопку ПУСК и повторите измерения при новом значении количества выборов.

Обратите внимание, что при исследовании случайных сигналов должно быть обеспечено необходимое время усреднения, которое однозначно связано с количеством выборов, иначе получите неточный отсчет из-



за случайной погрешности.

В табл. 4 приводятся данные о необходимости времени усреднения разных частотных полос сигналов при заданной прибору Х6-4 погрешности.

Таблица 4

Частотная полоса сигнала, Гц	Шаг задержки времени	Значение количества выборок на	Расчетное время усреднения
250000	1 мкс	$2^{13}$	81 мс
	1 мкс	$2^{13}$	81 мс
50000	10 мкс	$2^{10}$	100 мс
	10 мкс 100 мкс	$2^{12}$	410 мс
5000	1 мкс 100 мкс	$2^9$	510 мс
	1 мс	$2^{12}$	4 с
500	1 мс	$2^9$	5 с
	10 мс	$2^{12}$	40 с
50	10 мс	$2^9$	50 с
	10 мс	$2^{12}$	410 с
5	100 мс	$2^9$	510 с
	1 с	$2^{12}$	4100 с (около 67 мин)
0.5		$2^9$	5100 с (около 80 мин)

Для получения количества выборок  $2^{10}$  необходимо нажать кнопки  $2^9$  и  $\times 2^1$  или соответственно для числа  $2^{12}$  нажать кнопки  $2^{11}$  и  $\times 2^1$  и т. д.

9.3.8. При нажатой кнопке переключателя УСРЕДНЕНИЕ СУММ прибор сам останавливает процесс вычисления после выполнения установленного количества выборок, и результат измерения сохраняется в устройстве памяти даже в том случае, если источник входного сигнала отключить от прибора. Результат измерения убирается из устройства памяти нажатием кнопки СБРОС.

9.3.9. Вы можете повторить измерения в режиме экспоненциального усреднения. Для этого перед нажатием кнопки ПУСК нажмите кнопку переключателя

## УСРЕДНЕНИЕ ЭКСПОН.

9.3.10. В режиме экспоненциального усреднения весьма удобно наблюдать за изменением характеристик нестационарных случайных процессов на экране внешнего осциллографа. Если в выбранный момент времени Вы хотите зафиксировать результаты наблюдения, нажмите кнопку СТОП. Тогда процесс вычислений прекратится, и вы сможете переписать результаты вычислений из устройства памяти на самописец, перфоратор или цифropечатающий механизм для дальнейшего изучения или обработки.

9.3.11. Ввиду того, что невозможно строго проклассифицировать множество различных нестационарных процессов, погрешности измерения, их характеристики с помощью прибора Х6-4 не нормируются. Это может сделать сам потребитель прибора применительно для своего случая.

## 9.4. Измерение дискретных значений функций взаимной корреляции.

9.4.1. Подключите оба присоединительных кабеля 4.853.169 между разъемами А и Б с одной стороны и объектами исследования с другой.

9.4.2. Установите уровень сигнала А в таком же порядке, как показано в пп.9.3.2, 9.3.3, и отсчитайте показание цифрового индикатора в нулевом положении переключателя № КАНАЛА.

9.4.3. Нажмите кнопку СБРОС, установите уровень сигнала Б в таком же порядке, как указано в п. 9.4.2, и отсчитайте положение цифрового индикатора в нулевом положении переключателя № КАНАЛА.

9.4.4. Нажмите кнопку СБРОС, а затем кнопку  $R_{AB}$  переключателя РЕЖИМ.

9.4.5. Нажмите кнопку ПУСК и начните измерение дискретных значений функции взаимной корреляции в порядке, описанном в п. 9.3.7.

9.4.6. Нормирование результатов измерения производится следующим образом:

$$\rho_{ab}(n \cdot \Delta t) = \frac{A_n - 128}{\sqrt{(A_{AA} - 128)(A_{BB} - 128)}}, \quad (8)$$

где  $A_n$  - показание цифрового индикатора для определенного номера канала (точки)  $n$  ;

$A_{AA}$  - показание цифрового индикатора в нулевом положении переключателя № КАНАЛА при нажатой кнопке  $R_{AA}$ ;

$A_{BB}$  - показание цифрового индикатора в нулевом положении переключателя № КАНАЛА при нажатой кнопке  $R_{BB}$ .

9.4.7. При необходимости можете включить режим экспоненциального усреднения. Для этого перед нажатием кнопки ПУСК нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ ЭКСПОН., а также обратите внимание на пп.9.3.9...9.3.11 настоящего технического описания.

## 9.5. Измерение дискретных значений распределения.

9.5.1. Подсоедините источник исследуемого сигнала кабелем 4.850.223 к разъему Б на передней панели коррелометра.

9.5.2. Установите переключателем № КАНАЛА цифру 00 и нажмите кнопки  $R_{BB}$ , x10.

9.5.3. Нажмите кнопку ПУСК и, когда лампочка покажет конец вычислений, отсчитайте показание цифрового индикатора. Поочередным нажатием кнопок СБРОС, кнопок переключателя Б и кнопки ПУСК добей-

тесь показания цифрового индикатора 228.

9.5.4. Оцените номера каналов безразмерными единицами нормированного аргумента функции распределения. Если показание индикатора согласно п. 9.5.3 равно 228, то тогда номера каналов оцениваются, как показано на рис. 22.

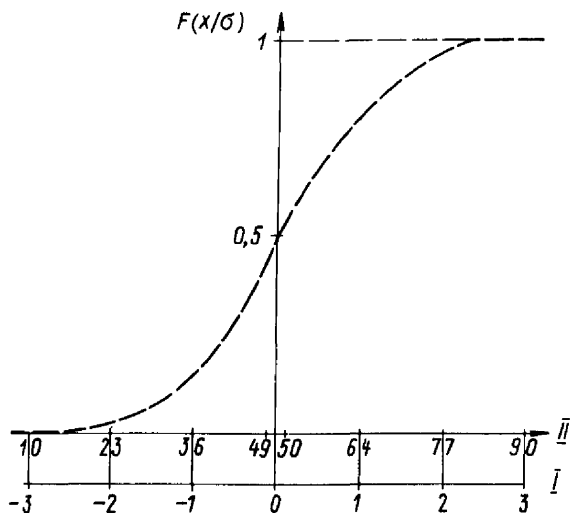


Рис. 22. Оценка номеров каналов безразмерными единицами нормированного аргумента. В качестве примера показана гауссовская функция распределения  $F(x/\sigma)$ ; I - единица  $x/\sigma$ ; II - номер канала.

В случае другого показания цифрового индикатора, отличающегося от 228, пересчитайте количество каналов в интервале единицы нормированного аргумента функции распределения.

Пример расчета:

- показание цифрового индикатора  $\alpha = 200$ ;
- извлеките корень квадратный из отношения показаний цифрового индикатора

$$\sqrt{\frac{\alpha}{228}} = \sqrt{\frac{200}{228}} = 0,936,$$

где  $\alpha$  - показание, отличающееся от 228;  
 количество каналов в интервале единицы нормированного аргумента

$$K = 14 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{228}} = 14 \cdot 0.936 \approx 13,$$

№ канала =  $50 + (x/\sigma) \cdot K$ ,  
 таким образом, получим

Номер канала	$50-3 \cdot 13 = 11$	$50-2 \cdot 13 = 24$	$50-13 = 37$	$49+13=62$	$49+2 \cdot 13=75$	$49+3 \cdot 13 = 88$
Единица $x/\sigma$	-3	-2	-1	+1	+2	+3

*Примечание.*

Указанная методика оценки каналов не зависит от формы функции распределения.

9.5.5. Нажмите кнопку СБРОС, а затем кнопки F(x), x1 и 100мкс.

9.5.6. Нажмите кнопку ПУСК. Время окончания вычислений покажет лампочка, находящаяся рядом с кнопкой ПУСК. После этого отсчитайте показания цифрового индикатора для всех положений переключателя № КАНАЛА. Определяется значение функции распределения следующим образом:

$$F(x) = \frac{A_n - 128}{A_{ББ} - 128}, \quad (9)$$

где  $F(x)$  - значение функции распределения;  
 $A_n$  - показание цифрового индикатора для определенного номера канала;

А<sub>ББ</sub> - показание цифрового индикатора в нулевом положении переключателя № КАНАЛА при нажатой кнопке R<sub>ББ</sub>;

9.5.7. При необходимости можете включить режим экспоненциального усреднения. Для этого перед нажатием кнопки ПУСК нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ ЭКСПОН., а также обратите внимание на пп.9.3.10. 9.3.11 настоящего технического описания.

### 9.6. Измерение дискретных значений плотности распределения вероятностей.

9.6.1. Подсоедините источник исследуемого сигнала кабелем 4.850.223 к разъему Б на передней панели коррелометра.

9.6.2. Установите переключатель № КАНАЛА в положение 00 и нажмите кнопки R<sub>ББ</sub>, X10.

9.6.3. Нажмите кнопку ПУСК и, когда лампочка покажет конец вычислений, отсчитайте показание цифрового индикатора. Поочередным нажатием кнопки СБРОС, кнопки переключателя Б и кнопки ПУСК добейтесь показания цифрового индикатора, близкого к 228.

9.6.4. Произведите оценку номеров каналов по методике, изложенной в п.9.5.4.

9.6.5. Нажмите кнопку СБРОС, а затем кнопки  $P(x)$  и 100 мкс.

9.6.6. Нажмите кнопку ПУСК и, когда лампочка покажет конец вычислений, отсчитайте показания цифрового индикатора при всех положениях переключателя № КАНАЛА. Определите значения плотности распределения следующим образом:

$$P(x) = (A_n - 128)K, \quad (10)$$

где  $P(x)$  - значение плотности распределения;

$A_n$  - показание цифрового индикатора для определенного номера канала;

$K$  - коэффициент ( $K = 0,010714$ ).

9.6.7. В случае измерения маленьких значений плотности распределения рекомендуется пользоваться множителем  $\times 10$  или  $\times 100$ .

9.6.8. При необходимости можете включить режим экспоненциального усреднения. Для этого перед нажатием кнопки ПУСК нажмите кнопку переключателя УСРЕДНЕНИЕ ЭКСПОН., а также обратите внимание на пп. 9.3.10, 9.3.11 настоящего технического описания.

## 9.7. Выделение периодического сигнала из шума.

9.7.1. Кабелем 4.850.223 подключите исследуемый объект исследования к разъему А на передней панели коррелометра. Подключите кабелем 4.850.223 внешние синхроимпульсы к разъему СИНХР., ВХОД на задней панели коррелометра. Переключатель СИНХР. поставьте в положение ВНЕШН. Подключите внешний осциллограф к разъему ОСЦИЛЛОГРАФ, X и Y.

9.7.2. Экспериментальным путем подберите шаг задержки и количество выборок, оперируя кнопками ПУСК, ЗАДЕРЖКА, КОЛИЧЕСТВО ВЫБОРОК и СБРОС до тех пор, пока не получите отчетливое изображение формы периодического сигнала.

9.7.3. Выделение периодического сигнала из шума можете проводить в режиме усреднения СУММ или ЭКСПОН.

9.7.4. В режиме выделения периодического сигнала из шума можно использовать и внутренние синхронизирующие импульсы, снимаемые с разъема СИНХР. ВЫХОД на задней панели прибора. При этом переключатель СИНХР. необходимо поставить в положение ВНУТР.

