

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»

Алешечкин А.М.,  
Мусонов В.М.,  
Романов А.П.

## **МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ**

Учебное пособие по циклу лабораторных работ

Красноярск 2008

УДК 621.372

Учебное пособие по циклу лабораторных работ по дисциплине «Метрология и радиоизмерения» для студентов специальности: 210200.62 – «Радиотехника». / Сост. А.М. Алешечкин, В.М. Мусонов, А.П. Романов, Красноярск: СибФУ, 2008. 85 с.

Учебное пособие по циклу лабораторных работ содержит материалы лабораторных работ, выполняемых по курсу «Метрология и радиоизмерения» с целью закрепления теоретических сведений, полученных в рамках лекционного курса и при самостоятельном изучении. Приведены лабораторные работы по следующим разделам курса: «Статистическая теория погрешностей измерений», «Измерение временных интервалов», «Измерение частоты», «Измерение напряжений», «Измерительные генераторы», «Измерение параметров электрических цепей». В описаниях работ приводятся необходимые теоретические сведения, домашние задания, контрольные вопросы, рекомендуемые для защиты лабораторных работ, приводится список литературы.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
1. Лабораторная работа №1.....	5
Исследование цифрового метода измерения интервалов времени.....	5
1.1. Краткие сведения о цифровых методах измерения интервалов времени.....	5
1.1.1. Структурная схема цифрового измерителя временных интервалов.....	5
1.1.2. Погрешности цифрового метода измерения временных интервалов.....	6
1.1.3. Нониусный метод измерения однократного временного интервала.....	10
1.2. Домашнее задание.....	12
1.3. Лабораторное задание.....	13
1.4. Содержание отчета.....	14
1.5. Контрольные вопросы.....	15
2. Лабораторная работа №2.....	16
Исследование цифрового метода измерения частоты и характеристик измерительных генераторов.....	16
2.1. Краткие сведения о цифровых методах измерения частоты.....	16
2.1.1. Структурная схема цифрового частотомера.....	17
2.1.2. Погрешности цифрового метода измерения частоты.....	19
2.1.3. Структурная схема и режимы работы универсального цифрового частотомера.....	26
2.1.4. Прецизионные методы измерения частоты.....	30
2.2. Домашнее задание.....	39
2.3. Порядок выполнения работы.....	39
2.4. Содержание отчета.....	41
2.5. Контрольные вопросы.....	42
3. Лабораторная работа №3.....	43
Измерение напряжений постоянного и переменного токов.....	43
3.1. Краткие сведения об измерении напряжения.....	43
3.1.1. Значения измеряемых напряжений.....	43
3.1.2. Электронные вольтметры.....	45
3.1.3. Аналоговые электронные вольтметры, структурные схемы и принцип действия.....	46
3.1.4. Преобразователи пикового значения.....	48
3.1.5. Преобразователи средневыпрямленного значения.....	51
3.1.6. Усилители и показывающие приборы АЭВ.....	52
3.1.6. Цифровые вольтметры с жёсткой логикой.....	53
3.1.7. Интегрирующий цифровой вольтметр.....	53
3.1.8. Цифровой вольтметр двойного интегрирования.....	55
3.2. Порядок выполнения работы.....	59
3.2.1. Схемы измерений.....	59

3.2.2 Измерение постоянных напряжений.....	59
3.2.3. Измерение переменных напряжений.....	60
3.2.4. Методические указания.....	60
3.2.5. Обработка результатов измерений.....	61
3.3. Требования к отчету.....	61
3.4. Контрольные вопросы.....	61
4. Лабораторная работа №4.....	62
Измерение параметров элементов электрических цепей С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	62
4.1. Краткие сведения об измерении параметров элементов электрических цепей.....	62
4.1.1. Метод непосредственной оценки.....	63
4.1.2 Электромеханические омметры.....	63
4.1.3 Электронные омметры.....	64
4.1.4. Мостовой метод измерения параметров элементов .....	66
4.1.5 Мосты постоянного тока.....	67
4.1.6 Мосты переменного тока.....	68
4.1.7. Резонансный метод.....	71
4.1.8. Генераторный метод.....	71
4.2. Лабораторное задание.....	72
4.2.1. Схемы измерений.....	72
4.2.2. Измерение величины сопротивлений резисторов.....	73
4.2.3. Измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности.....	73
4.2.4. Методические указания.....	74
4.2.5. Обработка результатов измерений.....	74
4.3. Требования к отчету.....	74
4.4. Контрольные вопросы.....	75
5. Лабораторная работа №5.....	75
Моделирование эффективных оценок при статистической обработке результатов измерений”.....	75
5.1. Исходные данные.....	75
5.2. Порядок выполнения работы.....	76
5.3. Выводы по лабораторной работе.....	77
5.4. Требования к отчету.....	77
5.5. Методические указания.....	77
5.6 Контрольные вопросы.....	78
6. Организационно-методические указания к выполнению лабораторных работ.....	78
Заключение.....	83
Библиографический список.....	83

## Введение

Учебное пособие по циклу лабораторных работ по дисциплине «Метрология и радиоизмерения» содержит методические указания по выполнению лабораторных работ, что обеспечивает освоение курса и формирование компетенций и навыков практической работы с реальными измерительными приборами.

Приведены методические указания к лабораторным работам «Измерение временных интервалов», «Исследование цифрового метода измерения частоты и характеристик измерительных генераторов», «Измерение напряжений», «Измерение параметров электрических цепей», «Исследование эффективных оценок при статистической обработке результатов измерений».

В описаниях работ приводятся необходимые теоретические сведения, домашние задания, контрольные вопросы, рекомендуемые для защиты лабораторных работ, приводится список литературы для изучения соответствующих разделов курса «Метрология и радиоизмерения».

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Цель работы – исследование принципа действия и погрешностей цифрового измерителя временных интервалов.

### 1.1. Краткие сведения о цифровых методах измерения интервалов времени

Решение многих научных и технических задач связано с измерением интервалов времени, разделяющих два характерных момента времени какого-либо процесса.

Измерения временных интервалов (ВИ) необходимы при разработке и испытаниях всевозможных схем задержки и синхронизации, при исследованиях цифровых систем, многоканальных систем с временным разделением каналов и др. В настоящее время для измерения временных интервалов, периода сигналов и подсчета числа импульсов используются универсальные цифровые частотомеры.

#### 1.1.1. Структурная схема цифрового измерителя временных интервалов

Упрощенная структурная схема цифрового измерителя временных интервалов имеет вид, представленный на рис. 1.1:

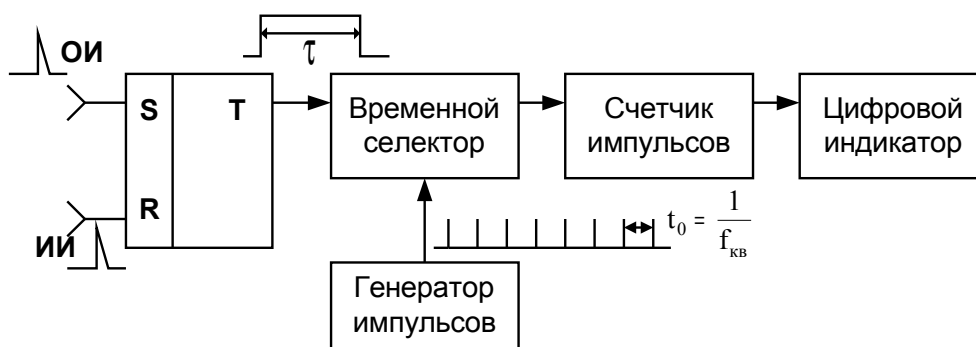


Рис. 1.1. Структурная схема цифрового измерителя временных интервалов

Рассмотрим эпюры напряжений на входах и выходе временного селектора (рис. 1.2). Число импульсов, попавших внутрь временного строба определяется по формуле

$$n = \left[ \frac{\tau}{t_0} \right],$$

где квадратные скобки означают выделение целой части числа.

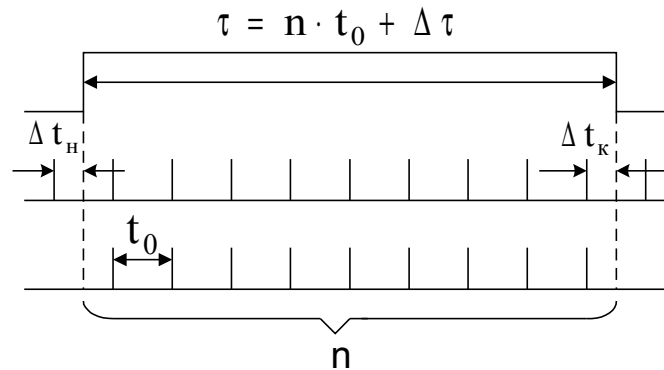


Рис. 1.2. Эпюры напряжений входа и выходе на временного селектора

Дробная часть временного интервала  $\Delta\tau$  не превышает величины младшего разряда  $t_0$  и определяется выражением

$$\Delta\tau = \left\{ \frac{\tau}{t_0} \right\} \cdot t_0,$$

где фигурные скобки означают выделение дробной части числа, заключенного в них, например:  $[5.3] = 5$ ,  $\{5.3\} = 0.3$ .

### 1.1.2. Погрешности цифрового метода измерения временных интервалов

При цифровом измерении временных интервалов выделяют следующие погрешности, классифицируемые по слагаемым измерения:

- 1) погрешность меры;
- 2) погрешность преобразования;
- 3) погрешность сравнения (дискретности, квантования);
- 4) Погрешность фиксации (в данном случае отсутствует, поскольку используется цифровая индикация показаний).

Рассмотрим каждую из составляющих погрешностей. Погрешность меры обусловлена в первую очередь нестабильностью частоты следования квантующих импульсов, вырабатываемых генератором импульсов (рис. 1.1). Для уменьшения этой погрешности генератор квантующих импульсов выполняют по схеме с кварцевой стабилизацией частоты.

Относительная нестабильность частоты кварцевого генератора определяется выражением:

$$\delta_{кв} = \frac{\Delta f_{кв}}{f_{кв}},$$

где  $\Delta f_{кв}$  – абсолютная нестабильность частоты кварцевого генератора, Гц;  $f_{кв}$  – частота настройки кварца, Гц. На практике значение  $\delta_{\text{эа}}$  не превышает  $10^{-8} - 10^{-9}$ . Нестабильность частоты кварцевого генератора включает две составляющие – долговременную и кратковременную. Долговременная нестабильность частоты вызывается в основном старением кварца, т. е. имеет систематический характер и вносит систематическую погрешность в измерения временных интервалов. Для ее уменьшения кварцевый резонатор и часть деталей генератора помещают в термостат. Периодической корректировкой частоты или проверкой генератора величина  $\delta_{кв}$  может быть уменьшена еще на порядок.

Относительная погрешность меры равна относительной нестабильности частоты кварцевого генератора:

$$\delta_{\text{м}} = \delta_{\text{кв}}.$$

Абсолютная погрешность меры прямо пропорциональна длительности измеряемого временного интервала  $\tau$  :

$$\Delta_{\text{м}} = \delta_{\text{кв}} \cdot \tau.$$

Погрешность преобразования обусловлена в основном шумовой помехой, проявляющейся при формировании стробирующего импульса (временных ворот). Формирование стробирующего импульса производится при помощи триггерных схем. Так как крутизна фронтов импульсов конечна, то в результате суммирования напряжения помехи с напряжением опорного и интервального импульсов смещаются моменты перебросов триггера относительно моментов достижения этими импульсами уровня запуска в отсутствие помехи (рис. 1.3).

Как видно из рис. 1.3, длительности импульсов, полученные при отсутствии и наличии на входе измерителя помехи, различны, т. е.  $\tau' \neq \tau$ . Таким образом возникает погрешность запуска триггера  $\Delta_{\text{зап}}$ , обусловленная наличием помехи и конечной крутизной фронтов опорного и интервального импульсов:

$$\Delta_{\text{зап}} = \tau' - \tau$$

Относительная погрешность преобразования определяется по формуле:

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot q},$$

где  $q = \frac{U_{\text{м}}}{\sigma_{\text{ш}}}$  – отношение сигнал/шум по напряжению.



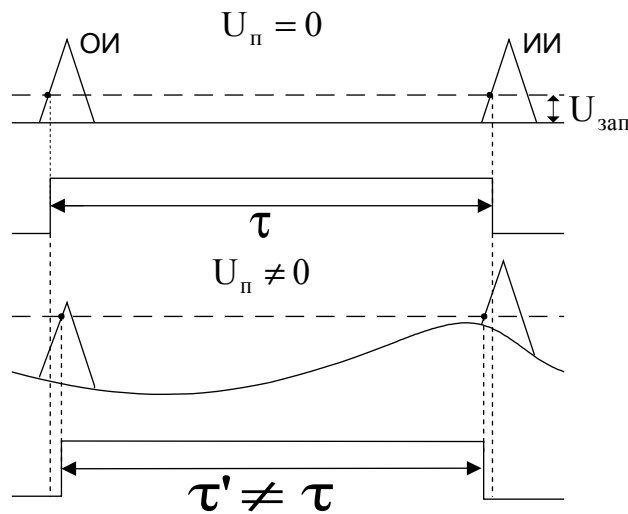


Рис. 1.3. Появление погрешности преобразования при наличии помехи на входе измерителя временных интервалов

Абсолютная погрешность преобразования также прямо пропорциональна длительности измеряемого временного интервала (ВИ)  $\tau$  :

$$\Delta_{np} = \delta_{np} \cdot \tau = \frac{\tau}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot q}.$$

Третья составляющая погрешности – погрешность сравнения, определяется так: измеряемое значение интервала времени  $\tau$  заменяется целым числом  $N$  периодов следования квантующих импульсов  $t_0$ . Это методическая погрешность, обусловленная дискретизацией непрерывной величины – измеряемого интервала времени. Данную составляющую погрешности называют также погрешностью дискретности, или погрешностью квантования. Она возникает вследствие того, что стробирующий импульс и последовательность квантующих импульсов в общем случае несинхронные сигналы.

Как видно из рис. 1.2 при измерении априорно неизвестного временного интервала цифровым измерителем с несинхронизированным квантованием погрешность измерения складывается из составляющих определения начала ( $\Delta t_n$ ) и конца ( $\Delta t_k$ ) временного интервала, распределенных по равномерному закону в интервалах  $(-t_0, 0)$  и  $(0, t_0)$  соответственно. Суммарная погрешность  $\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_n + \Delta t_k$  является случайной величиной, распределенной по закону Симпсона (треугольник) [1]. Закон распределения суммарной погрешности приведен на рис. 1.4.

Предельное значение погрешности дискретности (квантования) равно величине младшего разряда  $t_0$  :

$$\Delta_{\partial} = \pm t_0.$$

Максимальная относительная погрешность дискретности:

$$\delta_{\partial} = \pm \frac{t_0}{\tau} = \pm \frac{t_0}{n \cdot t_0} = \pm \frac{1}{n},$$

где  $n$  – число квантующих импульсов, с периодом следования  $t_0$ , попадающих во временной интервал  $\tau$ .

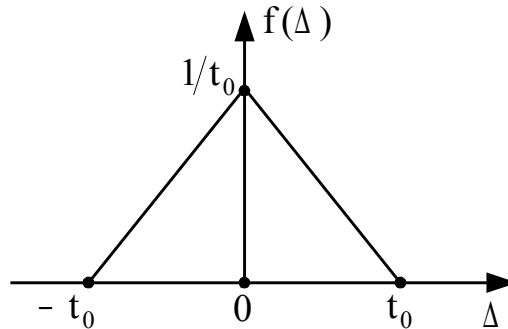


Рис. 1.4. Закон распределения погрешности несинхронизированного квантования априорно неизвестного временного интервала

Среднеквадратическое значение погрешности дискретности (квантования) априорно неизвестного временного интервала

$$\sigma_{кв} = t_0/\sqrt{6}.$$

При измерении фиксированного временного интервала погрешность измерения принимает два дискретных значения и описывается рядом распределения, вида:

$\Delta_i$	$-\tau$	$t_0 - \Delta\tau$
$P_i$	$1 - \Delta\tau/t_0$	$\Delta\tau/t_0$

Среднеквадратическое значение погрешности несинхронизированного квантования фиксированного временного интервала:

$$\sigma_{кв} = \sqrt{\Delta\tau \cdot (t_0 - \Delta\tau)} = \sqrt{\frac{\Delta\tau}{t_0} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\tau}{t_0}\right)} \cdot t_0.$$

Предельно допустимая абсолютная погрешность цифрового измерителя временных интервалов определяется как сумма погрешностей меры, преобразования и квантования:

$$\Delta \bar{i} \delta \dot{a} \ddot{a} = \Delta \bar{i} \delta + \dot{e} \dot{a} \delta \dot{e} \dot{a} \tau + \Delta \bar{i} \delta \tau$$

где:  $\delta_{\dot{e}\dot{a}}$  – относительная нестабильность частоты кварцевого генератора;  $\delta_{пр}$  – относительная погрешность преобразования;  $t_0 = 1/f_{кв}$  – период следования квантующих импульсов (величина младшего разряда при измерении временного интервала);  $f_{кв}$  – частота следования импульсов кварцевого генератора.

Предельно допустимую основную погрешность измерения временных интервалов, выраженную в процентах от измеряемого временного интервала  $\tau$ , находят по формуле

$$\delta_{пред} = \left( \delta_{кв} + \delta_{пр} + \frac{1}{n} \right) \cdot 100\% .$$

### 1.1.3. Нониусный метод измерения однократного временного интервала

Для измерения однократных импульсов наносекундной длительности применяется нониусный метод измерения временных интервалов. Структурная схема нониусного измерителя временных интервалов приведена на рис. 1.5.

На рис. 1.6 приведены эпюры напряжений, поясняющие принцип работы нониусного измерителя временных интервалов.

Период следования импульсов нониусного генератора  $t_n$  подбирается как

$$t_n = \frac{k-1}{k} \cdot t_0, \quad (1.1)$$

где  $t_0$  – период следования импульсов генератора счетных импульсов Г. сч;  $k$  – коэффициент нониуса, обычно равный 10, 100, 1000 и т. д.

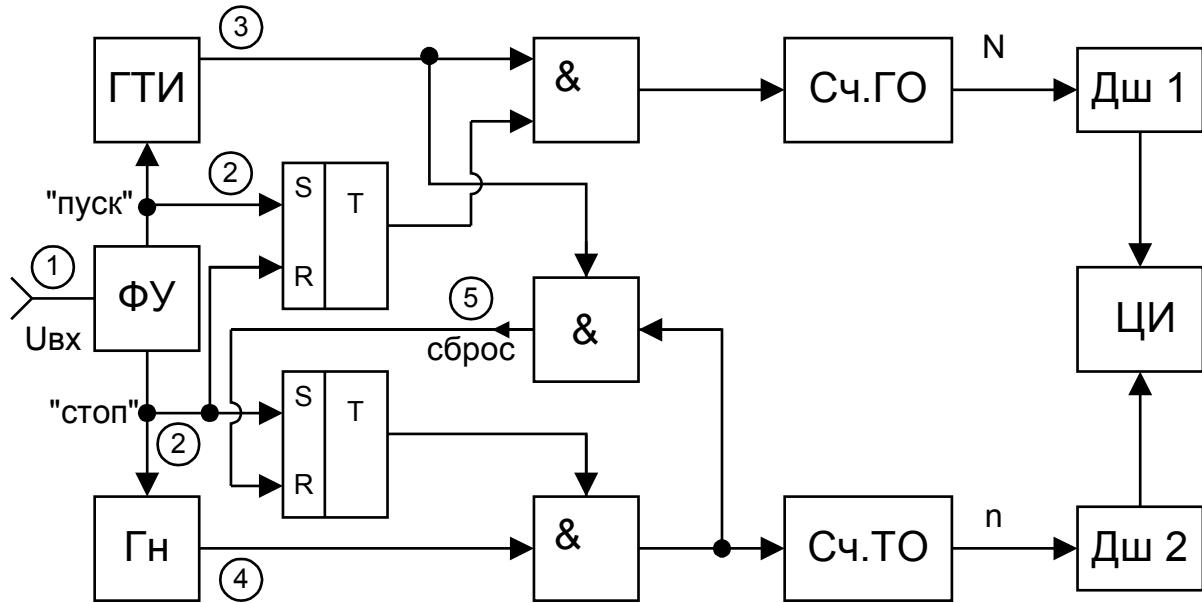


Рис. 1.5. Структурная схема измерителя ВИ нониусным методом

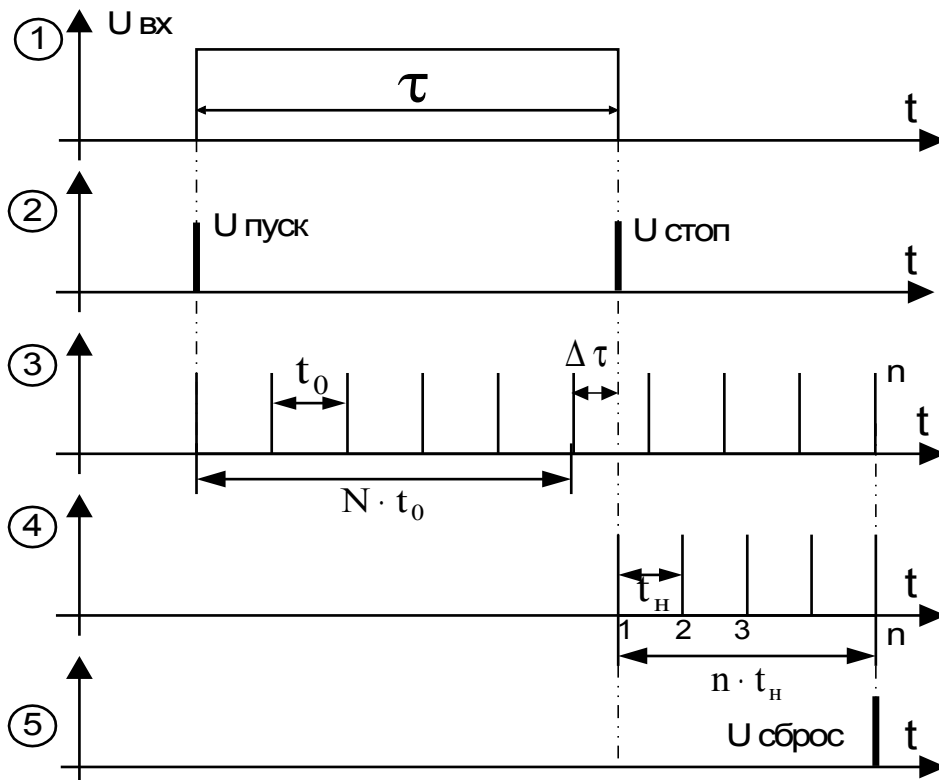


Рис. 1.6. Эпюры напряжений нониусного измерителя ВИ

Длительность временного интервала  $\tau$  можно выразить следующим образом:

$$\tau = N \cdot t_0 + \Delta \tau,$$

где N-число, зафиксированное счётчиком грубого отсчёта.

Дробная часть временного интервала может быть выражена через число импульсов  $n$ , зафиксированных счетчиком точного отсчета:

$$\Delta \tau = n \cdot t_0 - n \cdot t_n. \quad (1.2)$$

С учетом (1.1)

$$\Delta \tau = n \cdot t_0 - n \cdot \frac{k-1}{k} \cdot t_0 = n \cdot t_0 \left( 1 - \frac{k-1}{k} \right) = \frac{n \cdot t_0}{k}.$$

Следовательно, результат измерения ВИ нониусным измерителем определится как

$$\tau_{\text{изм}} = N \cdot t_0 + \frac{n \cdot t_0}{k}.$$

При этом за счет измерения дробной части ВИ погрешность измерения уменьшается в  $k$  раз по сравнению с обычным квантованием. Поскольку в данном измерителе применяется синхронизированное квантование, то среднеквадратическая погрешность измерения составляет

$$\sigma = \frac{t_0}{\sqrt{12} \cdot k}.$$

Остаточная погрешность измерений определяется длительностью и формой счётных и нониусных импульсов и их неполным совпадением. Перечисленные факторы ограничивают предельную точность измерений, которая может составлять доли наносекунды в зависимости от значений коэффициента нониуса  $k$  и частоты квантующих импульсов.

## 1.2. Домашнее задание

1. Изучить цифровые методы и погрешности измерения интервалов времени [1].
2. Рассчитать среднеквадратическое значение погрешности квантования априорно неизвестного временного интервала при частоте квантующих импульсов  $f_{\text{кв}} = 1 \text{ кГц}$ . Построить закон распределения (плотность распределения) погрешности дискретности для этого случая.
3. Рассчитать и построить зависимость среднеквадратического значения погрешности дискретности от величины измеряемого временного интервала в диапазоне его изменения от 2.0 до 3.0 мс (с шагом 0.1 мс) при частоте квантующих импульсов  $f_{\text{кв}} = 1 \text{ кГц}$ .

### 1.3. Лабораторное задание

1. Определить погрешность градуировки шкалы частот импульсного генератора.

1.1. Подключить выход импульсного генератора Г5–54 к входу вертикального отклонения осциллографа.

1.2. Ручками синхронизации добиться устойчивого изображения прямоугольных импульсов на экране осциллографа. Выставить амплитуду сигнала равной 1–2 В, длительность импульса 10 мкс, период повторения 100 мкс, пользуясь ручками регулировки генератора.

1.3. Выставить точные значения амплитуды, длительности и периода повторения выполнив измерения по масштабной шкале осциллографа. При измерениях по масштабной шкале обратить внимание на то, чтобы ручки плавных регулировок усиления (ручка V/дел) и длительности развертки (время/дел) осциллографа находились в крайнем правом положении.

1.4. Подать сигнал на вход измерения периода частотомера. Включить частотомер в режим «Измерение периода». Ручку «запуск» частотомера установить в положение «автоматический». Ручку «Время индикации» установить в крайнее левое положение, соответствующее минимальному времени индикации. Тумблер «термостат» установить в верхнее положение. Аттenuатор входа измерения периода частотомера установить в положение «1:1». Вращая ручку уровня добиться начала показаний частотомера. Сравнить значение периода, измеренное прибором со значением, выставленным по шкале генератора и масштабной сетки осциллографа.

1.5. Измерить период повторения с выхода генератора импульсов для 3–4 точек шкалы в каждом поддиапазоне генератора при частоте квантующих импульсов  $f_{кв} = 10$  МГц.

1.6. Результаты измерений занести в таблицу 1.1, где  $F_{ик}$  – значение частоты повторения, установленное по шкале импульсного генератора;  $T_{ик} = 1/F_{ик}$  – значение периода, установленного по шкале;  $T_{изм}$  – значение периода, считанное с индикатора цифрового частотомера;  $\Delta T = T_{ик} - T_{изм}$  – погрешность градуировки шкалы.

Таблица 1.1

$F_{ик}$ , Гц	
$T_{ик}$ , мкс	
$T_{изм}$ , мкс	
$\Delta T$ , мкс	

2. Произвести исследование погрешности дискретности измерения периода в зависимости от его длительности в диапазоне от 2 до 3 мс с шагом 0.1 мс при частоте квантующих импульсов  $f_{кв} = 1$  кГц. Установку значения требуемого значения периода производить при  $f_{кв} = 100$  кГц. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

$\tau_i$ , мс	Число измерений		$\Delta \tau_1$ , мс	$P_1^*$	$\Delta \tau_2$ , мс	$P_2^*$	$\sigma^*$ , мс
	$\tau_{изм1}=2$ мс	$\tau_{изм2}=3$ мс					
2.0							
2.1							
2.2							
2.3							
2.4							
2.5							
2.6							
2.7							
2.8							
2.9							
3.0							

2.1. Установить  $f_{кв} = 100$  кГц и, медленно изменяя частоту генератора импульсов импульса, установить период повторения по шкале цифрового измерителя периода равным  $(2.00 \pm 0.01)$  мс.

2.2. Установить  $f_{кв} = 1$  кГц и сделать 100 отсчетов. Подсчитать число отсчетов, соответствующее  $\tau_{изм1} = 2$  мс и  $\tau_{изм2} = 3$  мс, результаты подсчетов занести в соответствующий столбец 2 или 3 табл.2.

2.3. Повторить пп.2.1 и 2.2 для  $\tau_i = 2.1$  мс, 2.2 мс и т.д. до 3.0 мс.

3. Произвести исследование закона распределения погрешности измерения априорно неизвестного интервала времени по результатам 50 измерений. Результаты измерения занести в табл.1.3. В графу  $\tau_i$  заносятся значения  $i$ -х периода, выбранных случайно по шкале генератора импульсов и измеренных цифровым измерителем с повышенной точностью (при частоте квантования  $f_{кв} = 100$  кГц). В графу  $\tau_{изм i}$  заносятся результаты измерений периода, выполненных при частоте квантования  $f_{кв} = 1$  кГц. В графу  $\Delta \tau_i$  заносят результаты вычисленных погрешностей

$$\Delta \tau_i = \tau_{изм i} - \tau_i.$$

Таблица 1.3

$\tau_i$	
$\tau_{изм i}$	
$\Delta \tau_i$	

#### 1.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Таблицы результатов измерений по пп. 1, 2, 3. В столбцы 4 и 6 табл.2 заносят погрешности измерений

$$\begin{aligned}\Delta \tau_1 &= \tau_{uzm1} - \tau_i, \\ \Delta \tau_2 &= \tau_{uzm2} - \tau_i,\end{aligned}\tag{1.3}$$

где  $\tau_i$  – истинное значение  $i$ -го периода, находящееся в первом столбце табл. 1.2;

В столбцы 5 и 7 табл. 1.2. заносят частоты (статистические вероятности) погрешностей  $\Delta \tau_1$  и  $\Delta \tau_2$ , определяемые как:

$$P_1^* = n_1/n, \quad P_2^* = n_2/n, \tag{1.4}$$

где  $n_1$  – число результатов  $\tau_{uzm1}$ , внесенное во второй столбец табл.2;  $n_2$  – число результатов  $\tau_{uzm2}$ , внесенное в третий столбец табл.2;  $n$  – общее число отсчетов, равное 100.

Оценка среднеквадратической погрешности  $\sigma^*$  в зависимости от значения  $\tau_i$  определяется по формуле:

$$\sigma^* = \sqrt{\Delta^2 P_1^* \tau^2 + P_2^*}, \tag{1.5}$$

полученной, исходя из выражений для оценки дисперсии дискретно распределенной случайной величины.

2. Графики экспериментальной и теоретической зависимости среднеквадратического значения погрешности дискретности от длительности измеряемого интервала.

3. Результат вычисления экспериментальной и теоретической среднеквадратической погрешности дискретности измерения априорно неизвестного временного интервала по п. 3 раздела «Порядок выполнения работы».

4. Гистограмму погрешностей дискретности измерения априорно неизвестного интервала времени.

5. Сравнение статистического закона распределения погрешности дискретности с теоретическим по критерию Колмогорова.

Примечание. Формулы для вычисления среднеквадратической погрешности для априорно неизвестного временного интервала, методика построения гистограммы, и другие необходимые сведения по статистической обработке результатов измерений приведены в [2].

## 1.5. Контрольные вопросы

1. Структурная схема и принцип работы цифрового измерителя временных интервалов.
2. Принцип работы цифрового измерителя периода.



3. Нониусный метод измерения временных интервалов.
4. Методы измерения временных интервалов: статистического усреднения, корреляционного усреднения, рандомизации.
5. Вывести закон распределения погрешности дискретности для априорно неизвестного временного интервала: при синхронизированном квантовании; при несинхронизированном квантовании.
6. Вывести выражения для математического ожидания и среднеквадратического значения погрешности дискретности измерения априорно неизвестного интервала времени: при синхронизированном квантовании; при несинхронизированном квантовании.
7. Вывести закон распределения погрешности дискретности измерения фиксированного интервала времени.
8. Вывести выражения для математического ожидания и среднеквадратического значения погрешности дискретности для случая измерения фиксированного временного интервала.
9. Пояснить, как строится статистический ряд и гистограмма, как производится выбор количества разрядов.
10. Вычисление статистической и теоретической функции распределения и их использование для проверки согласия по критерию Колмогорова.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Цель работы – практическое изучение цифрового метода измерения частоты, исследование погрешностей цифрового частотомера и основных характеристик измерительных генераторов.

#### 2.1. Краткие сведения о цифровых методах измерения частоты

Переменное напряжение, частоту которого  $f_x$  нужно измерить, преобразуют в последовательность коротких однополярных импульсов с частотой следования, равной  $f_x$  (рис. 2.1). Если сосчитать число импульсов  $N$  за известный интервал времени  $T_0$ , то легко определить частоту  $f_x$ :

$$f_x = N/T_0 .$$

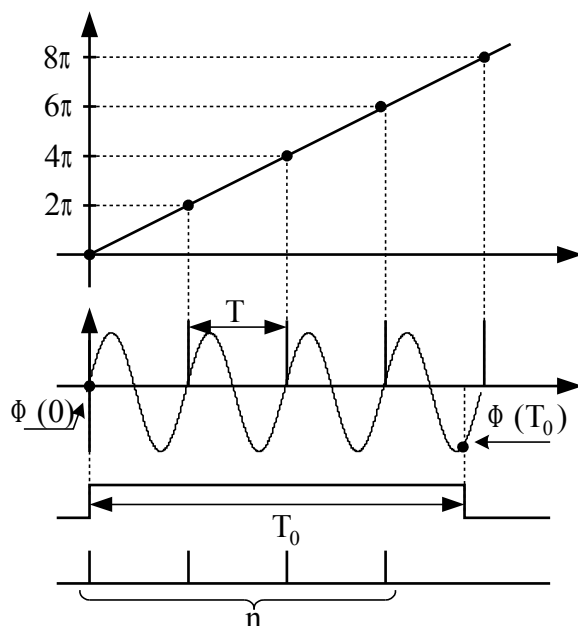


Рис. 2.1. Принцип дискретного счета при измерении частоты

В частности, если  $T_0=1\text{с}$ , то  $N$  численно равно частоте  $f_x$ . Эта идея является основой метода измерения частоты дискретным счетом. Приборы, созданные на основе этого метода, называют электронно-счетными частотомерами. Результат измерения появляется на табло передней панели прибора в виде светящихся цифр, и поэтому такие приборы часто называют цифровыми частотомерами.

### 2.1.1. Структурная схема цифрового частотомера

Упрощенная структурная схема электронно-счетного частотомера приведена на рис. 2.2. Основным элементом входного устройства (Вх.У) является аттенюатор или компенсированный делитель напряжения, с помощью которого устанавливается напряжение, необходимое для нормальной работы формирующего устройства (ФУ). В этом устройстве из входного переменного напряжения  $U_{f_x}$  формируются короткие прямоугольные импульсы  $U_{ф_u}$  (рис. 2.3), форма которых не изменяется при изменении частоты и амплитуды входного напряжения в установленных для данного прибора пределах. Для формирования импульсов применяют триггер Шмидта или специальные схемы на туннельных диодах. Также ФУ может быть реализовано на логических элементах цифровой техники.

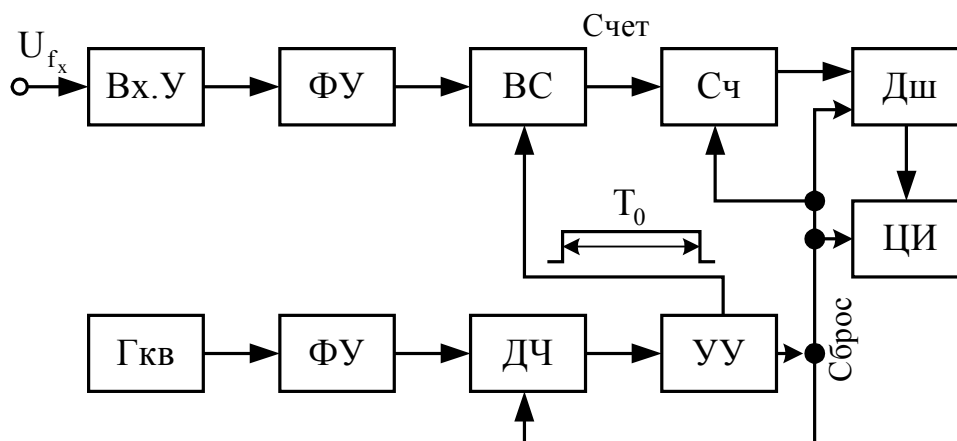


Рис. 2.2. Упрощенная структурная схема цифрового частотомера

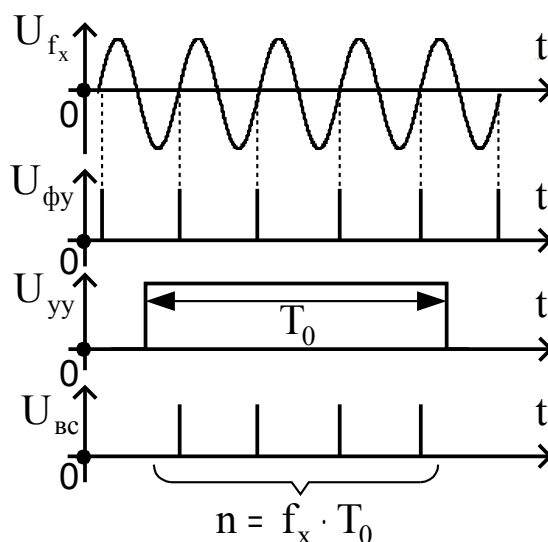


Рис. 2.3. Эпюры напряжений

Схема совпадения (&) предназначена для пропуска импульсов  $U_{фy}$  на электронный счетчик (Сч) в течение известного интервала времени  $T_0$  (времени счета), формируемого из частоты генератора с кварцевой стабилизацией Гкв:

$$T_0 = 1/f_{кв} .$$

В устройстве управления (УУ) вырабатывается импульс напряжения  $U_{уy}$  длительностью  $T_0$ , с помощью которого временной селектор открывает и на электронный счетчик (Сч) проходит группа импульсов, число которых  $n = f_x \cdot T_0$ . Эта информация через дешифратор (Дш) поступает на цифровой индикатор (ЦИ), на табло которого появляются показания в единицах частоты.

Частота генератора с кварцевой стабилизацией обычно равна 5 или 10 МГц и поэтому длительность калиброванного импульса  $T_0$  равна 0,2 или 0,1

мкс. При таких длительностях времени счета невозможно измерять частоты, значение которых равно  $f_{кв}$  или меньше ее. Поэтому после кварцевого генератора включают декадные делители частоты (ДЧ), на выходе которых образуются частоты в  $10^n$  ( $n=1, 2, 3, \dots, 8$ ) раз ниже частоты генератора, т. е. 100, 10 и 1 кГц, 100, 10, 1 и 0,1 Гц.

Длительность калиброванного импульса, открывающего селектор, равна  $T_0 = 10^n / f_{кв}$ , и время счета можно устанавливать декадными ступенями от  $10^{-5}$  до 10 с. Измеряемая частота здесь определяется по формуле

$$f_x = n / (10^n \cdot t_0) = n \cdot 10^{-n} \cdot f_{кв},$$

где  $t_0$  – период следования импульсов кварцевого генератора на входе делителя частоты ДЧ.

Устройство управления одновременно с воздействием на временной селектор выдает импульсы для автоматического сброса показания с табло цифрового индикатора и освобождения электронного счетчика от накопленной информации, а также для приведения в исходное состояние дешифратора и делителей частоты. В устройстве управления предусмотрена блокировка схемы совпадения на некоторый интервал времени, в течение которого сохраняются показания на цифровом табло. Этот интервал времени называется временем индикации и устанавливается оператором в пределах нескольких секунд. Частотомер может работать в автоматическом режиме, при ручном и дистанционном управлении. В автоматическом режиме счет импульсов производится каждый раз, когда заканчивается установленное время индикации. При ручном управлении счет выполняется один раз при нажатии на кнопку ручного запуска; время индикации не ограничивается.

### 2.1.2. Погрешности цифрового метода измерения частоты

При цифровом измерении частоты имеется несколько составляющих суммарной погрешности.

*Погрешность меры.* Результат измерения частоты определяется как  $F = n/T_0$ . Мерой в данном случае является интервал времени измерения  $T_0$ . В соответствии с теорией погрешностей косвенных измерений [5] абсолютная погрешность меры определяется как произведение частной производной от  $F$  по  $T_0$  и значения абсолютной погрешности установки образцового интервала  $T_0$ :

$$\Delta F_M = \left| \frac{\partial F}{\partial T_0} \right| \cdot \Delta T_0,$$

где  $\frac{\partial F}{\partial T_0} = -\frac{n}{T_0^2}$ .

Тогда абсолютная погрешность меры определится как

$$\Delta F_M = \left| \frac{\partial F}{\partial T_0} \right| \cdot \Delta T_0 = \frac{n}{T_0^2} \cdot \Delta T_0 = \frac{n}{T_0} \cdot \frac{\Delta T_0}{T_0} .$$

Относительная погрешность меры

$$\delta F_M = \frac{\Delta F_M}{F} = \frac{\Delta F_M}{n} \cdot T_0 = \frac{\Delta T_0}{T_0} = \frac{\Delta f_{кз}}{f_{кз}} = \delta f_{кз} .$$

Из вышеприведенной формулы следует, что относительная погрешность меры равна относительной нестабильности частоты кварцевого генератора  $\delta f_{кз}$ .

Погрешность преобразования возникает в формирующем устройстве и связана с преобразованием в короткие импульсы переходов через нуль измеряемого гармонического сигнала (рис. 58). В режиме измерения частоты данной погрешностью можно пренебречь, поскольку выполняется усреднение большого числа периодов частоты  $f_x$  за время измерения  $T_0$ , что приводит к уменьшению погрешности  $\Delta T_{пр}$ .

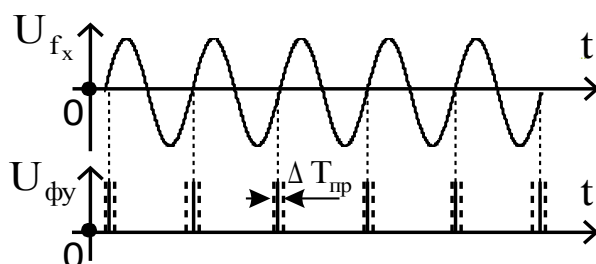


Рис. 2.4. Погрешность преобразования

*Погрешность квантования (дискретности).* Абсолютная погрешность дискретного счета возникает вследствие несинхронности входного напряжения измеряемой частоты и временного строба  $T_0$ , полученного из частоты кварцевого генератора. Вследствие этого начало и конец калиброванного интервала  $T_0$  не совпадает с началом и концом импульсов измеряемой частоты  $f_x$ .

Как и при измерении временных интервалов, различают случаи измерения априорно неизвестной и фиксированной частоты.

При измерении априорно неизвестной частоты погрешность квантования распределена по закону Симпсона в интервале от  $-F_D$  до  $F_D$  (рис. 2.5).

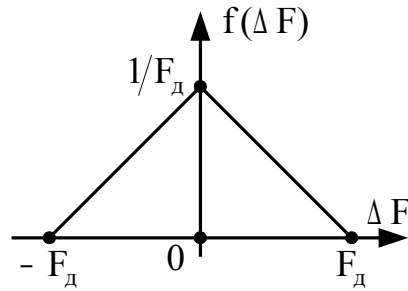


Рис. 2.5. Плотность распределения погрешности измерения априорно неизвестной частоты

Частота  $F_D$  называется единицей младшего разряда по частоте и является величиной, обратно пропорциональной длительности калиброванного интервала  $T_0$ :  $F_D = 1/T_0$ . Частота  $F_D$  показывает, с какой предельной погрешностью будут выполняться измерения частоты.

Например, при  $T_0 = 0.1$  с

$$F_D = 10 \text{ Гц},$$

следовательно, на табло частотомера будет отображаться значение частоты с точностью до десятков герц. Например, при измерении частоты 534 Гц с  $T_0 = 0.1$  с на экране могут быть получены значения частоты 530 или 540 Гц.

Среднеквадратическое значение погрешности измерения априорно неизвестной частоты составляет

$$\sigma_{кв} = \frac{F_D}{\sqrt{6}} = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot T_0}. \quad (2.1)$$

Предельная погрешность измерения частоты составляет  $\pm F_D$ .

При измерении фиксированного значения частоты

$$F = n \cdot F_D + \Delta F,$$

где  $\Delta F = \left\{ \frac{F}{F_D} \right\} \cdot F_D$  — дробная часть измеряемой частоты (фигурные скобки означают операцию выделения дробной части числа), результат измерения может принять 2 значения:  $F_{изм1} = n \cdot F_D$  и  $F_{изм2} = (n+1) \cdot F_D$ .

Следовательно, при измерении фиксированной частоты  $F$  погрешность измерений является дискретной случайной величиной, принимающей два значения  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ :  $\Delta_1 = F_{изм1} - F = -\Delta F$  и  $\Delta_2 = F_{изм2} - F = F_D - \Delta F$ . Вероятности появления каждой из погрешностей составляют  $1 - \Delta F/F_D$  и  $\Delta F/F_D$  для  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  соответственно. Погрешность измерения фиксированной частоты может быть задана в виде следующего ряда распределения:

$\Delta_i$	$-\Delta F$	$F_D - \Delta F$
$P_i$	$1 - \Delta F / F_D$	$\Delta F / F_D$

Среднеквадратическое значение погрешности измерения фиксированной частоты определяется как

$$\sigma_{\text{кв.}\phi} = F_D \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{F_D} \cdot \left(1 - \frac{\Delta F}{F_D}\right)} = \sqrt{\Delta F \cdot (F_D - \Delta F)}.$$

Пример: Найти среднеквадратическую погрешность измерения частоты 527 Гц цифровым частотомером с временем измерения 0.1с.

Решение: Среднеквадратическая погрешность измерения фиксированной частоты определяется по формуле (2.1). Значение величины младшего разряда по частоте составляет  $F_D = 1/T_0 = 10 \text{ Гц}$ , дробная часть измеряемой частоты:

$$\Delta F = \left\{ \frac{F}{F_D} \right\} \cdot F_D = \left\{ \frac{527}{10} \right\} \cdot 10 = \{52.7\} \cdot 10 = 7 \text{ Гц}.$$

Отсюда

$$\sigma_{\text{кв.}\phi} = \sqrt{\Delta F \cdot (F_D - \Delta F)} = \sqrt{7 \cdot (10 - 7)} = \sqrt{21} = 4.58 \text{ Гц}.$$

Относительную погрешность квантования априорно неизвестной частоты находят как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению частоты  $F$ :

$$\delta F_{\text{кв.}} = \frac{\sigma_{\text{кв.}\phi}}{F} = \frac{F_D}{\sqrt{6} \cdot F} = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot T_0 \cdot F}.$$

Предельное значение относительной погрешности

$$\delta F_{\text{кв.}\max} = \pm \frac{\Delta F_{\text{кв.}\max}}{F} = \pm \frac{F_D}{F} = \pm \frac{1}{T_0 \cdot F}.$$

Пример: Цифровой частотомер с временем измерения  $T_0 = 1\text{с}$  выполняет измерение сигналов с частотами 10МГц и 100Гц. Найти предельные значения относительной погрешности квантования  $\delta F_{\text{кв.}\max}$ , меры  $\delta F_M$  и суммарной погрешности  $\delta F_\Sigma$ . Относительная нестабильность частоты кварцевого генератора  $\delta f_{k.z} = 10^{-7}$ , погрешностью преобразования пренебречь.

Решение: Для сигналов с частотами  $F_1$  и  $F_2$  погрешность меры будет одинаковой и составит  $\delta F_{m1,2} = \delta f_{k,z} = 10^{-7}$ . Относительная погрешность квантования для сигнала с частотой  $F_1$  составит

$$\delta F_{кв. max 1} = \frac{1}{T_0 F_1} = \frac{1}{10^7} = 10^{-7},$$

для сигнала с частотой  $F_2$

$$\delta F_{кв. max 2} = \frac{1}{T_0 F_2} = \frac{1}{100} = 10^{-2} = 1\% .$$

Суммарная погрешность для первого сигнала составит:

$$\delta F_{\Sigma 1} = \sqrt{\delta F_i^2 + \delta F_{\hat{a}. max 1}^2} = \sqrt{2} \cdot 10^{-7},$$

для второго

$$\delta F_{\Sigma 2} = \sqrt{\delta F_i^2 + \delta F_{\hat{a}. max 2}^2} = 10^{-2} = 1\% .$$

Таким образом, на низких частотах наблюдается резкое увеличение погрешности измерения частоты. Одним из способов повышения точности является увеличение времени измерения  $T_0$ . Так, например, для  $F=100$  Гц, чтобы  $\delta F_{кв. max}$  стала равной  $10^{-7}$  необходимо обеспечить  $T_0 = 10^5$  с, а это очень большой интервал времени.

Эффективным методом уменьшения погрешности квантования низкочастотных сигналов является переход в режим измерения периода.

Значение времени счета  $T_0$  выбирают в  $K$  раз большим измеряемого периода  $T$ , что позволяет уменьшить погрешности квантования и преобразования.

Структурная схема цифрового измерителя периода имеет вид, приведенный на рис. 2.6. Эпюры напряжений, поясняющие принцип работы измерителя, приведены на рис. 2.7.

Измеренное значение периода определяется по формуле

$$T_{изм} = n \cdot t_0 / K = 10^{-m} \cdot n,$$

где  $m=0, 1, 2, \dots, 8$ .



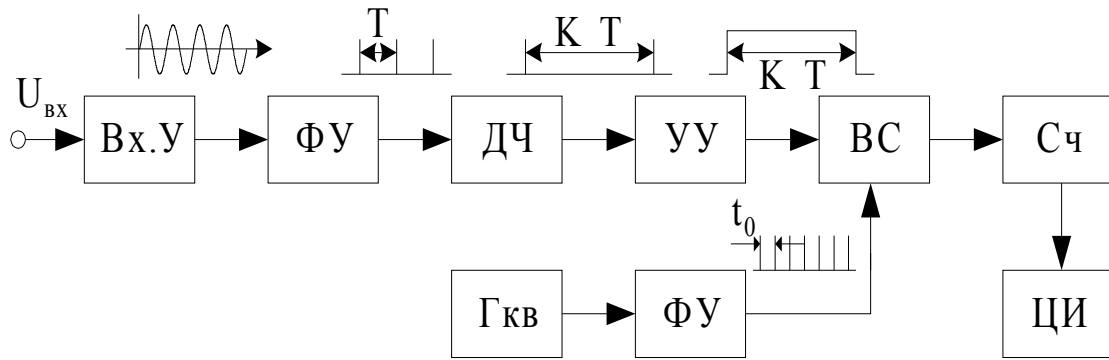


Рис. 2.6. Цифровой измеритель периода

Таким образом, цифровой измеритель периода, так же как измеритель частоты, является прямопоказывающим прибором, поскольку значения периода следования импульсов кварцевого генератора  $t_0$  и коэффициента деления частоты  $K$  выбраны кратными 10.

Как и при измерении частоты, при измерении периода имеют место погрешности меры, преобразования и квантования.

*Погрешность меры.* Абсолютная погрешность меры:

$$\Delta T_M = \left| \frac{\partial T}{\partial f_{кв}} \right| \cdot \Delta f_{кв} = \frac{n}{K \cdot f_{кв}^2} \cdot \Delta f_{кв} = \frac{n}{K \cdot f_{кв}} \cdot \frac{\Delta f_{кв}}{f_{кв}} = T \cdot \delta f_{к.з.}$$

Относительная погрешность меры определяется так же как и в режиме измерения частоты

$$\delta T_0 = \frac{\Delta T_M}{T} = \frac{\Delta f_{кв}}{f_{кв}} = \delta f_{к.з.}$$

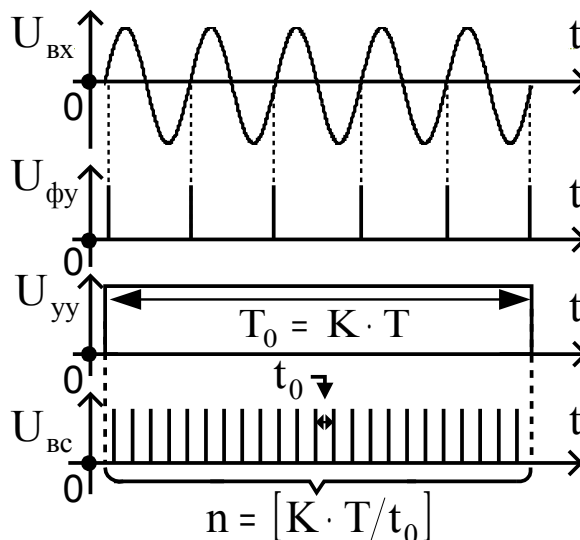


Рис. 2.7. Эпюры напряжений

*Погрешность квантования.* Абсолютная среднеквадратическая погрешность квантования

$$\delta_{кв}(T) = \frac{t_0}{\sqrt{6} \cdot K} = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot K \cdot f_{кв}}.$$

Предельная погрешность квантования

$$\Delta_{кв}(T) = \pm \frac{t_0}{K} = \pm \frac{1}{K \cdot f_{кв}}.$$

Относительную среднеквадратическую погрешность квантования определяют как

$$\delta_{кв}(T) = \frac{\delta_{кв}(T)}{T} = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot K \cdot f_{кв} \cdot T} = \frac{F}{\sqrt{6} \cdot K \cdot f_{кв}},$$

$$\delta_{кв}(T) = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot f_{кв} \cdot \frac{K \cdot T}{T_0}} = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot f_{кв} \cdot T_0}.$$

Предельная относительная погрешность квантования

$$\delta_{кв.max} = \pm \frac{1}{f_{кв} T_0}.$$

*Погрешность преобразования.* В отличие от режима измерения частоты, этой составляющей никак нельзя пренебречь, поскольку происходит измерение начала и конца временного интервала, которые могут флуктуировать по причине фазовых шумов.

Абсолютная погрешность преобразования

$$\Delta_{np} = \frac{T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot q \cdot K},$$

где  $q$  — отношение сигнал/шум по напряжению;  $K$  — число усредняемых периодов входного сигнала (коэффициент деления делителя частоты).

Относительную погрешность преобразования находят как отношение абсолютной погрешности к величине измеренного периода:

$$\delta_{np} = \frac{\Delta_{np}}{T} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot q \cdot K}.$$

Пример: Найти значение погрешности квантования для частоты  $F_2$  из предыдущего примера при переходе в режим измерения периода для прежнего времени измерения  $T_0 = 1$  с.

Решение: Относительная погрешность меры при переходе в режим измерения периода не изменится и составит  $\delta F_M = \delta f_{кв} = 10^{-7}$ . Относительная погрешность квантования составит

$$\delta F_{кв. \max} = \frac{1}{T_0 \cdot f_{кв}} = \frac{1}{10^7} = 10^{-7}.$$

Суммарная погрешность измерения периода без учета погрешности преобразования

$$\delta F_T = \sqrt{\delta F_M^2 + \delta F_{кв. \max}^2} \approx \sqrt{2} \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, погрешность квантования в данном случае уменьшилась в  $10^5$  раз, при этом время измерения не изменилось.

### 2.1.3. Структурная схема и режимы работы универсального цифрового частотомера

Универсальный цифровой частотомер является прибором, предназначенным для измерения частоты колебаний, подаваемых на вход А, периода сигналов, подаваемых на вход Б, отношения частот сигналов, поступающих на входы А и Б, может быть использован в качестве датчика кварцевых частот и т.д. Структурная схема универсального цифрового частотомера приведена на рис. 2.8, эпюры напряжений, поясняющие принцип его работы – на рис. 2.9.

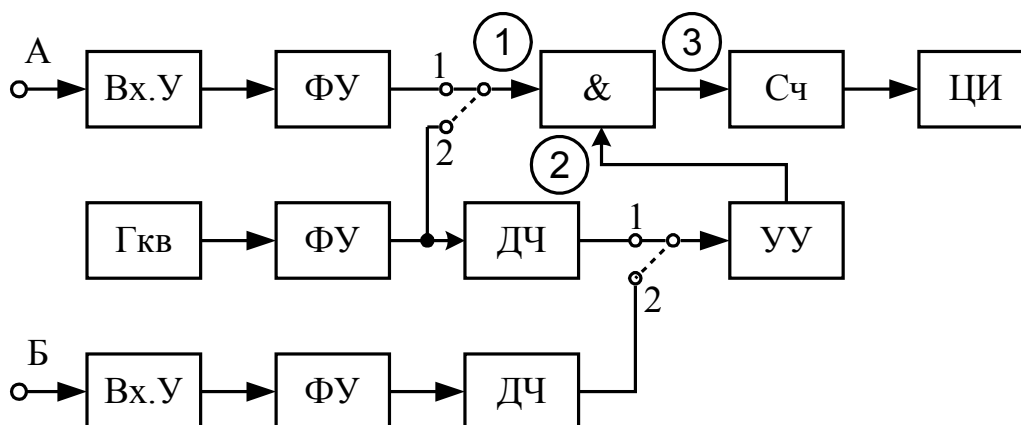


Рис. 2.8. Структурная схема универсального цифрового частотомера

Различают несколько режимов работы универсального цифрового частотомера.

Режим: "Измерение частоты" (Основной). Переключатели П1 и П2 находятся в положении 1.

В этом режиме входной сигнал поступает на вход А. Из входного сигнала формируются квантующие импульсы с периодом входного сигнала  $T_A$  (рис. 2.9)

Напряжение кварцевого генератора используется для формирования образцового интервала времени  $T_0$ , в течение которого подсчитывается число периодов входного сигнала  $n$ . Измеренное значение частоты определяется как:

$$F_{изм} = \frac{n}{T_0}.$$

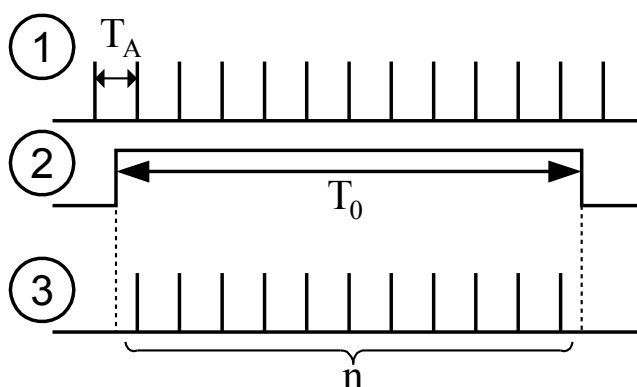


Рис. 2.9. Напряжения на входах и выходе временного селектора в режиме измерения частоты

Режим "Измерение периода". Переключатели П1 и П2 находятся в положении 2. В данном режиме входной сигнал подается на вход Б частотомера. Из входного сигнала формируется временной строб длительностью  $K \cdot T_B$ , напряжение кварцевого генератора используется для формирования меток времени – последовательности коротких импульсов с высокостабильным периодом следования  $t_0$ . Счетчик подсчитывает число меток времени  $n$ , попадающих внутрь временного строба, измеренное значение периода определяют по формуле:

$$T_{изм} = \frac{n \cdot t_0}{K}.$$

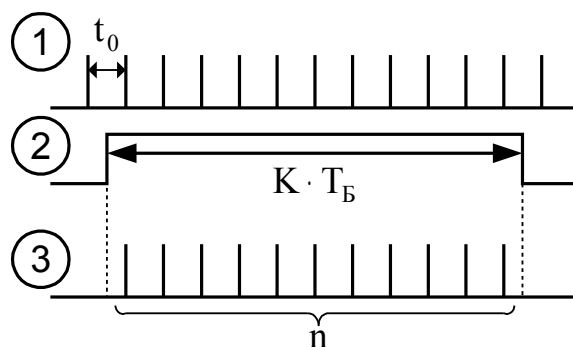


Рис. 2.10. Эпюры напряжений в режиме измерения периода

Режим измерения отношения частот на входах А и Б ( $F_A/F_B$ ). Переключатель П1 – в положении 1, П2 – в положении 2.

В данном режиме частотомер измеряет отношение частот на входах А и Б. Кварцевый генератор отключен. Квантующие импульсы формируются из напряжения высокой частоты, поступающего на вход А (рис. 2.11). Строблирующий импульс длительностью  $K \cdot T_B$  формируется из низкочастотного напряжения, поступающего на вход Б.

Число импульсов, зафиксированное счетчиком, составит:

$$n = \left[ \frac{K \cdot T_B}{T_A} \right].$$

Отношение частот на входах А и Б определится по формуле:

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{n}{K}.$$

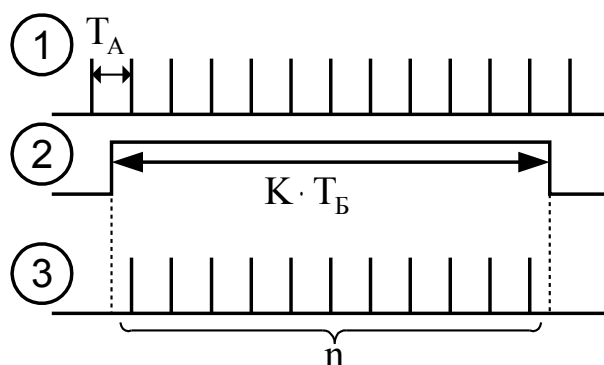


Рис. 2.11. Эпюры напряжений в режиме измерения отношения частот

Режим самоконтроля. Переключатель П1 находится в положении 2, П2 – в положении 1. Данный режим предназначен для проверки правильности функционирования декадных счетчиков, временного селектора, формирующих устройств и табло цифрового индикатора. Квантующие импульсы и временной строб формируются из напряжения кварцевого генератора (рис. 2.12).

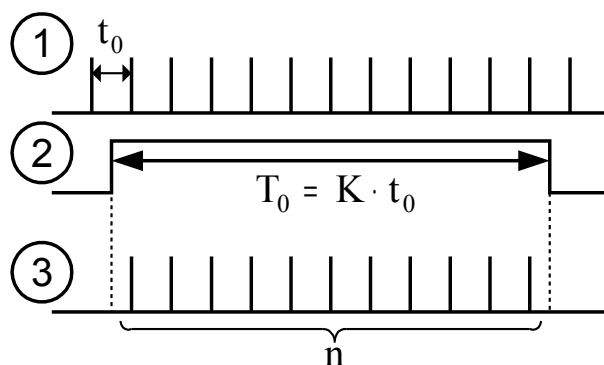


Рис. 2.12. Напряжения в режиме самоконтроля

Напряжения входных сигналов подавать не требуется. При исправном частотомере число импульсов, зафиксированное счетчиком равно:

$$n = \frac{K \cdot t_0}{t_0} = K.$$

Поскольку коэффициент деления  $K$  делителя частоты выбирается кратным 10, то на табло цифрового индикатора также будет наблюдаться число, кратное 10.

Для повышения точности измерений вместо внутреннего кварцевого опорного генератора с кварцевой стабилизацией используют внешний стандарт частоты. Следует иметь в виду, что частота стандарта численно должна быть равной  $10^m$  Гц, где  $m$  – целое число, так как только в этом случае цифровой отсчет на табло частотомера будет соответствовать измеряемой частоте или периоду с учетом положения запятой.

Максимальное значение измеряемой частоты определяется в основном быстродействием электронного счетчика, т. е. образующих его декадных делителей. Для расширения частотного диапазона во входном тракте применяют двоичные делители, быстродействие которых выше, чем декадных. Верхний предел измеряемых частот равен 100 – 200 МГц, а с преобразованием (переносом) частоты достигает 70 ГГц. Погрешность измерения частоты  $5 \cdot 10^{-9}$ . Диапазон измеряемых интервалов времени и периодов 1 мкс –  $10^4$  с. Погрешность измерения – 0,1 мкс. Максимальное число десятичных разрядов определяется емкостью счетчика.

Каждый электронно-счетный частотомер можно использовать как источник серии стабильных частот (рис. 2.13), получаемых от кварцевого генератора и делителей частоты.

При частоте кварцевого генератора  $f_{кв} = 10$  МГц с выхода делителя частоты можно получить напряжения с частотами:

$$f = \frac{f_{кв}}{K} = 10^7, 10^6, 10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10, 1, 0,1 \text{ Гц}.$$

Современные электронно-счетные частотомеры являются автоматическими приборами, отличающимися высокой точностью измерений, быстродействием, удобством отсчета и простотой работы с ними. Замена резонансных и гетеродинных частотомеров уменьшает время измерения в 30 – 50 раз и снижает погрешность на 4 – 5 порядков. Наличие на выходе результата измерения в виде электрического кода позволяет использовать их в измерительно-информационных системах и системах управления.

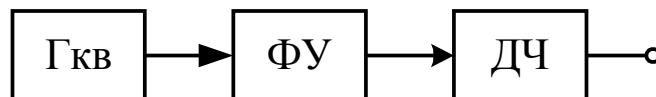


Рис. 2.13. Использование цифрового частотомера как источника серии стабильных частот

Достижения в области микроэлектроники позволили создавать электронно-счетные частотомеры на базе интегральных микросхем и микропроцессоров. Применение последних значительно увеличило надежность, уменьшило габариты, массу и потребляемую энергию, позволило добиться высокой степени автоматизации измерений.

#### 2.1.4. Прецизионные методы измерения частоты

При рассмотрении погрешностей цифрового измерения частоты было отмечено, что на низких частотах в режиме измерения частоты получается большая относительная погрешность измерений:

$$\delta_{F.\max} = \frac{1}{T_0 \cdot F}.$$

Данная погрешность может быть уменьшена при переходе к режиму измерения периода. В этом случае:

$$\delta_{T.\max} = \frac{1}{f_{кв} \cdot T_0}.$$

Но в этом случае необходим пересчет результатов,  $T \rightarrow F = \frac{1}{T}$ , который трудно реализовать на схемах с жесткой логикой. Для пересчета нужен микропроцессорный вычислительный блок (МВБ).

Рассмотрим другие методы уменьшения погрешностей квантования, которые могут быть реализованы без применения МВБ.

Метод измерения частоты с дискретной весовой функцией, основанный на расширении дробной части калиброванного временного интервала. В дан-

ном случае используется синхронизированное квантование образцового временного интервала  $T_0$ . Для случая, представленного на рис. 2.24:

$$F = \frac{n}{T_0}; \quad n = 6; \quad F = \frac{6}{T_0}.$$

Если бы можно было измерить дробную часть  $n$ , то результат измерения частоты был бы точнее, поскольку  $n=6,5$ . Точное значение частоты составляет:

$$F = \frac{6,5}{T_0}.$$

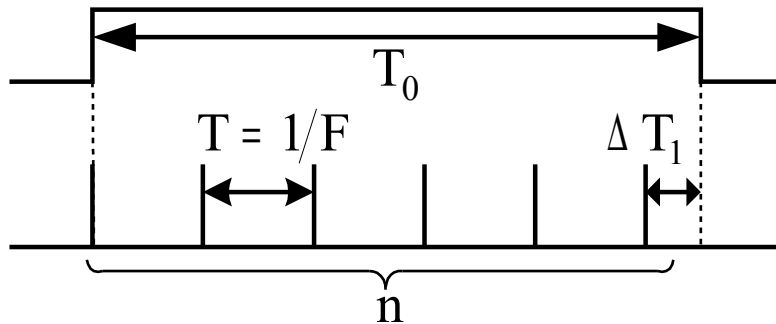


Рис. 2.14. Случай синхронизированного квантования временного интервала

Для реализации этого необходимо измерить интервал  $\Delta T_1$ . Тогда точное значение частоты:

$$F = \frac{1}{T_0} \left( n + \frac{\Delta T_1}{T} \right) = \frac{1}{T_0} (n + \Delta n),$$

где  $\Delta n = \Delta T_1 / T$ .

Для измерения  $\Delta \hat{O}_1$  его расширяют в  $m$  раз и продолжают заполнять счетными импульсами с периодом  $T$  (рис. 2.15).



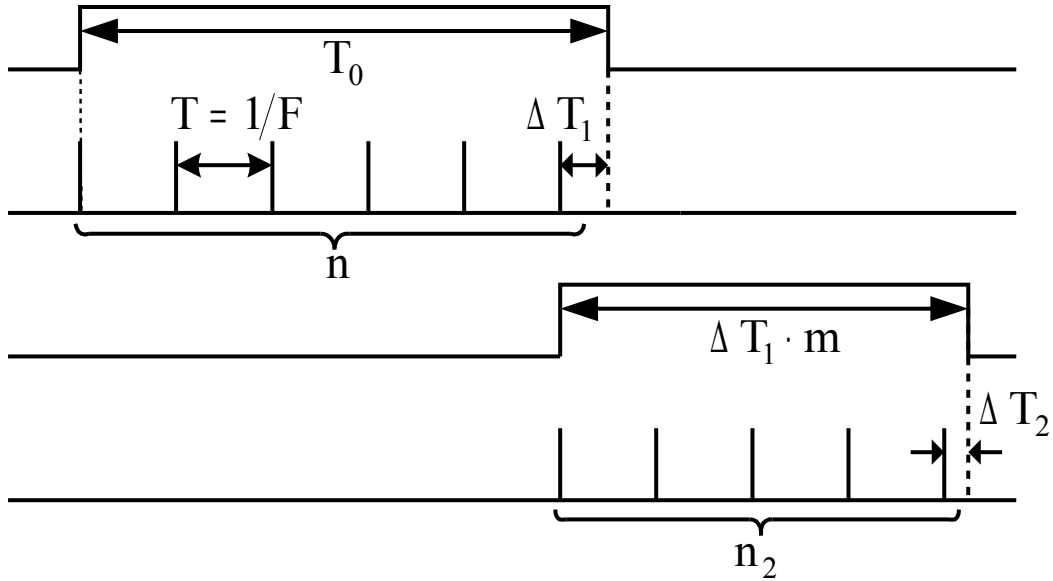


Рис. 2.15. Расширение дробной части интервала  $T_0$

Число импульсов  $n_2$ , попавших в "растянутый" интервал  $\Delta T_1 \cdot m$ , составит

$$n_2 = \frac{m \cdot \Delta T_1}{T},$$

следовательно

$$\frac{\Delta T_1}{T} = \frac{n_2}{m} = \Delta n.$$

Отсюда точное значение частоты

$$F = \frac{1}{T_0} \left( n + \frac{n_2}{m} \right).$$

Если для исходного измерения погрешность квантования была

$$\sigma = \frac{1}{T_0 \sqrt{6}},$$

то стала

$$\sigma_1 = \frac{1}{T_0 \sqrt{6} \cdot m}.$$

В классическом варианте  $T_{\text{изм}} = T_0$ . После применения метода время измерения составит

$$T_{изм1} = T_0 - \Delta T_1 + \Delta T_1 \cdot m = T_0 + (m - 1) \cdot \Delta T_1 .$$

Значение  $\Delta T_1$  меньше или равно периоду измеряемой частоты

$$\Delta T_1 \leq T = \frac{1}{F} .$$

Отсюда, максимальное время измерения

$$T_{изм.max} = T_0 + (m - 1) \cdot T .$$

Пример: Найти погрешности измерения частоты  $F = 100$  Гц в обычном режиме и по методу с дискретной весовой функцией при времени измерения  $T_0 = 1$  с и коэффициенте уменьшения веса погрешности дискретности  $m=100$ .

Решение: Погрешность измерения частоты в обычном режиме составит

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot T_0} = 4.1 \text{ Гц} .$$

При измерении с дискретной весовой функцией

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot T_0 \cdot m} = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{6}} = 0.0041 \text{ Гц} ,$$

т. е. погрешность измерения уменьшится в 100 раз.

Оценим время измерения. В обычном режиме

$$T_{изм} = T_0 = 1 \text{ с} .$$

При измерении с дискретной весовой функцией

$$T_{изм2} = T_0 + (m - 1)T = 1\text{с} + (100 - 1) \frac{1}{100} = 1.99 \approx 2 \text{ с} .$$

В результате применения метода с дискретной весовой функцией погрешность квантования уменьшилась в 100 раз, а время измерения увеличилось всего вдвое. Можно сделать повторное расширение интервала  $\Delta T_2$  в  $m$  раз. Тогда погрешность уменьшится в  $m^2$  раз, а время измерения возрастет втрое по сравнению с  $T_0$ .

В классическом частотомере для достижения такой же точности необходимо увеличить время измерения также в  $m^2$  раз.

Схема реализации измерителя с дискретной весовой функцией приведена на рис. 2.16.

Для увеличения  $\Delta T_1$  в  $m$  раз интервал времени  $\Delta T_1$  квантуют счетными импульсами с некоторой частотой квантования  $f_{кв}$ . Затем полученное число импульсов воспроизводят с частотой, в  $m$  раз более низкой, т. е.  $f_{кв}/m$ .

2. Метод измерения частоты с квазинепрерывной весовой функцией позволяет уменьшить как погрешность квантования, так и шумовую составляющую погрешности.

В режиме измерения периода используется информация о первом и последнем периодах измеряемого сигнала (рис. 2.17).

При учете информации о погрешностях начала  $\Delta t_n$  и конца  $\Delta t_k$  для всех измеряемых периодов будет наблюдаться картина, приведенная на рис. 2.18.

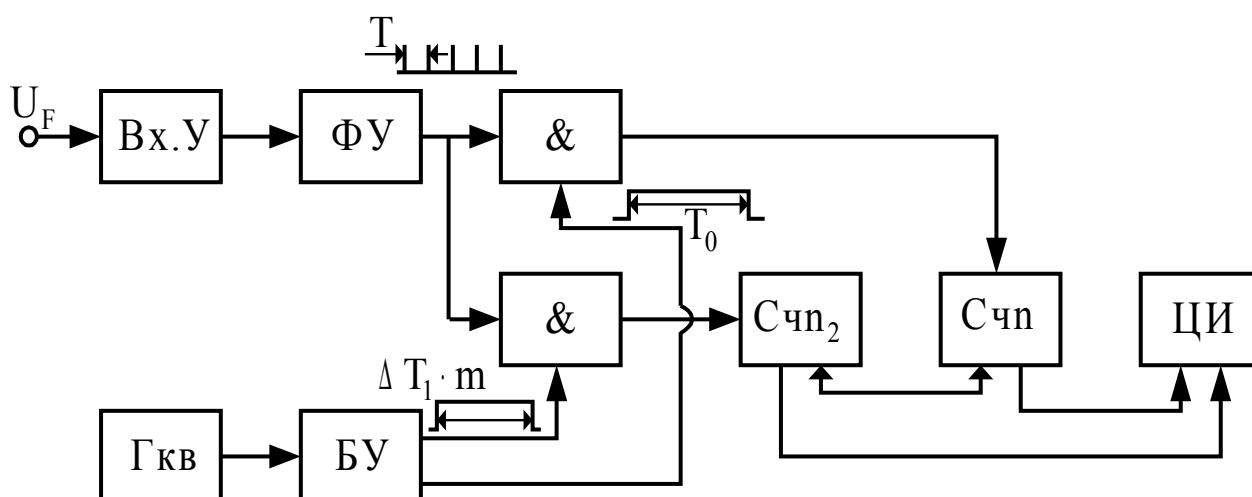


Рис. 2.16. Схема частотомера с дискретной весовой функцией

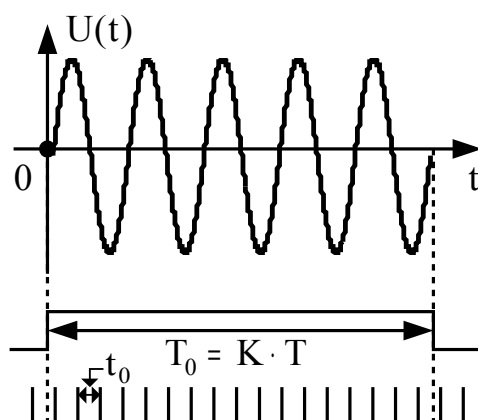


Рис. 2.17. Эпюры напряжений в режиме измерения периода

Погрешности измерений для каждого из периодов запишутся в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_1 = \Delta t_{i1} - \Delta t_{e1} = \Delta t_1 - \Delta t_2, \\ \Delta_2 = \Delta t_{i2} - \Delta t_{e2} = \Delta t_2 - \Delta t_3, \\ \Delta_3 = \Delta t_{i3} - \Delta t_{e3} = \Delta t_3 - \Delta t_4, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_i = \Delta t_i - \Delta t_{i+1}, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_K = \Delta t_K - \Delta t_{K+1}. \end{array} \right.$$

Среднее значение для  $K$  измеренных периодов

$$T_{cp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K T_i.$$

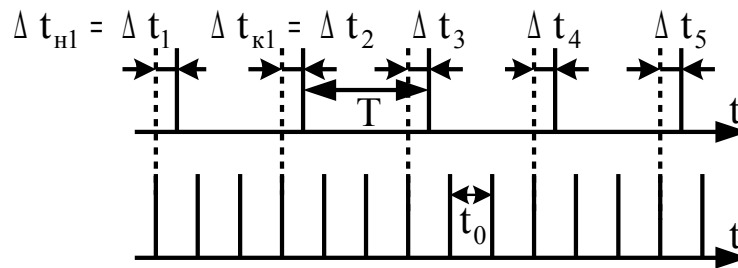


Рис. 2.18. Использование информации обо всех измеряемых периодах

Абсолютная погрешность среднего значения составит

$$\Delta T_{cp} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Delta i = \frac{1}{K} (\Delta t_1 - \Delta t_2 + \dots \Delta t_K - \Delta t_{K-1}) = \frac{1}{K} (\Delta t_1 - \Delta t_{K+1}).$$

Среднеквадратическая погрешность

$$\sigma = \frac{t_0}{\sqrt{6 \cdot K}},$$

имеет то же значение, что и при заполнении счетными импульсами "растянутого" интервала  $K \cdot T$ .

При применении весового усреднения средневзвешенное значение периода

$$T_{cp.s} = \sum_{i=1}^K q_i T_i. \quad (2.2)$$

Погрешность в этом случае составит

$$\Delta T_{cp.с} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K q_i \Delta t_i = \frac{1}{K} (\Delta t_1 - \Delta t_{i+1}) = q_1 (\Delta t_1 - \Delta t_2) + q_2 (\Delta t_2 - \Delta t_3) + \dots + q_K (\Delta t_K - \Delta t_{K+1}).$$

ИЛИ

$$\Delta T_{cp.с} = q_1 \cdot \Delta t_1 + (q_2 - q_1) \Delta t_2 + (q_3 - q_2) \Delta t_3 + \dots + (q_K - q_{K-1}) \Delta t_K - q_K \cdot \Delta t_{K+1}.$$

Дисперсию  $\sigma^2(\Delta T_{cp.с})$ , при некоррелированных выборках  $\Delta t_i$  определяют по формуле

$$\sigma^2(\Delta T_{cp.с}) = q_1^2 \sigma^2(\Delta t_1) + (q_2 - q_1)^2 \sigma^2(\Delta t_2) + (q_3 - q_2)^2 \sigma^2(\Delta t_3) + \dots + q_K^2 \sigma^2(\Delta t_{K+1}) = \left[ q_1^2 + (q_2 - q_1)^2 + \dots + (q_K - q_{K-1})^2 + q_K^2 \right] \cdot \frac{t_0^2}{12},$$

что получено из условия  $\sigma^2(\Delta t_i) = \frac{t_0^2}{12}$  для случая синхронизированного квантования.

Значения  $q_i$  подбирают таким образом, чтобы обеспечить минимум дисперсии  $\sigma^2(\Delta T_{cp.с})$ , который достигается при равенстве нулю первых производных по неизвестным значениям  $q_i$ , т. е.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma^2(\Delta T_{cp.с})}{\partial q_1} = 0, \\ \frac{\partial \sigma^2(\Delta T_{cp.с})}{\partial q_2} = 0, \\ \frac{\partial \sigma^2(\Delta T_{cp.с})}{\partial q_2} = 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

Кроме того, для обеспечения несмещенности оценки  $T_{cp.с}$  должно быть выполнено условие:

$$\sum_{i=1}^K q_i = 1. \quad (2.4)$$

После нахождения частных производных, система (2.3) с учетом (2.4) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2q_1 - q_2 = 0 \\ -q_1 + 2q_2 - q_3 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ -q_i + 2q_{i+1} - q_{i+2} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ 2q_K - q_{K-1} = 0 \\ \sum_{i=1}^K q_i = 1. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Результатом решения системы уравнений (2.5) будут следующие значения весовых коэффициентов:

$$q_i = \frac{6 \cdot i \cdot (K - i + 1)}{K(K + 1)(K + 2)}. \quad (2.6)$$

На рис. 2.19 приведен график оптимальной весовой функции (ВФ), полученной по формуле (25) (1), и ее аппроксимация треугольником (2) и трапецией (3).

Для оптимальных весовых коэффициентов дисперсия погрешности оценки средневзвешенного значения периода составит:

$$\sigma^2(\Delta t_i) = \frac{t_0}{\sqrt{6 \cdot K}} \cdot \sqrt{\frac{6K}{(K + 1) \cdot (K + 2)}},$$

т. е. погрешность измерения уменьшилась в  $Z$  раз по сравнению с методом не весового (равномерного) усреднения:

$$\sigma(T_{cp.с}) = \frac{\sigma(T_{cp})}{Z},$$

где

$$Z = \sqrt{\frac{(K + 1)(K + 2)}{6K}}.$$

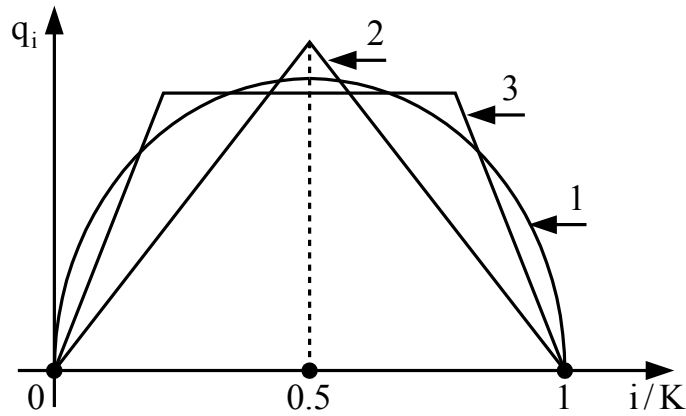


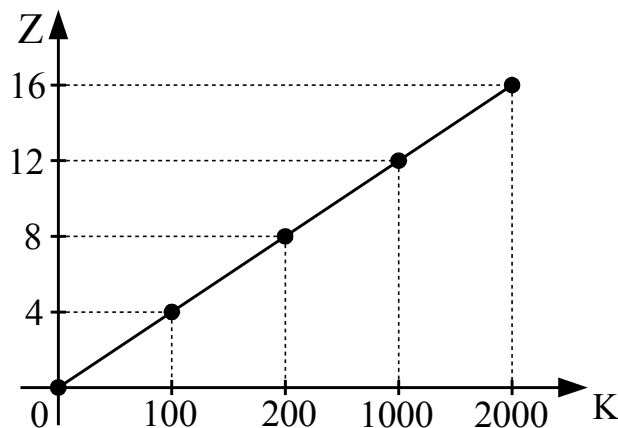
Рис. 2.19. Графики ВФ и ее аппроксимации

Недостатком данного метода являются сложность формирования весовой функции без применения микропроцессора. Для упрощения формирования ВФ её аппроксимируют треугольником или трапецией (рис. 1.19, кривые 2 и 3). При переходе от оптимальной ВФ к ее аппроксимации происходит увеличение погрешности оценки периода  $\sigma(T_{ф.в})$ : при треугольной весовой функции – на 15 %, при трапециевидальной – на 6 %.

Несмотря на это, данный метод является весьма эффективным для уменьшения погрешности квантования (рис. 2.20).

Структурная схема весового измерителя периода, реализующего метод измерения частоты с квазинепрерывной весовой функцией приведена на рис. 74.

Представленная схема отличается от обычного измерителя периода тем, что эквиваленты измеренных значений периода  $n_i$  умножаются на весовые коэффициенты  $q_i$ , поступающие с блока формирования весовых коэффициентов. В схеме обычного измерителя периода все измеренные значения периодов берутся с равными весами.

Рис. 2.20. Зависимость коэффициента  $Z$  от числа усредняемых периодов  $K$

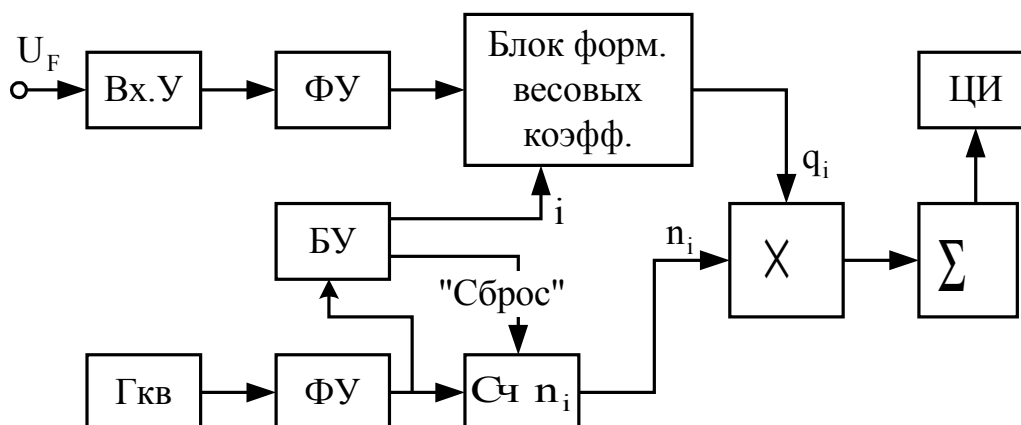


Рис. 2.21. Весовой измеритель периода

Данная схема формирует средневзвешенное значение периода в соответствии с выражением (2.2). Весовые коэффициенты вычисляются в соответствии с выражением (2.6), или используется аппроксимация ВФ треугольником или трапецией.

## 2.2. Домашнее задание

1. Изучить цифровые методы измерения частоты.
2. Изучить принцип работы и структурную схему цифрового частотомера в режимах самоконтроля, измерения частоты, периода, длительности импульсов, отношения частот [1].
3. Изучить погрешности цифровых измерителей частоты в режимах измерения частоты и периода.
4. Рассчитать среднеквадратическое значение погрешности цифрового измерения частоты при времени измерения  $T_0=0.1$  с. Построить график плотности распределения погрешностей для данного случая при измерении априорно неизвестной частоты.
5. Определить среднеквадратическую погрешность в режиме измерения периода при частоте квантующих импульсов  $f_{кв}=100$  кГц, значение множителя периода  $K=10$ . Построить график плотности вероятностей погрешности измерения априорно неизвестного периода для этого случая.

## 2.3. Порядок выполнения работы

1. Проверить работоспособность цифрового частотомера в режиме «Самоконтроль».
2. При помощи цифрового частотомера произвести измерение частоты высокочастотного генератора типа Г4–18. На каждом поддиапазоне генератора брать 3–4 точки. Определить погрешность градуировки генератора Г4–18. Для измерений использовать режим «Измерение частоты». Значение времени



измерения установить равным 1 с. Полученные результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$F_{\text{шк}}$ , кГц	
$F_{\text{изм}}$ , кГц	
$\Delta F$ , Гц	

Здесь  $F_{\text{шк}}$  – частота, отсчитанная по шкале измерительного генератора;  $F_{\text{изм}}$  – результат измерения частоты частотомером, определенное по результату одного измерения;  $\Delta F = F_{\text{шк}} - F_{\text{изм}}$  – погрешность градуировки шкалы генератора.

3. Произвести измерение частоты низкочастотного генератора типа ГЗ-112 (в каждом поддиапазоне взять по 3-4 точки). Определить погрешность генератора. При измерении использовать режим «Измерение периода». Частоту квантования установить равной 10 МГц, ручку «Множитель периода» установить в положение  $K = 1$ . Данные измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$F_{\text{шк}}$ , кГц	
$T_{\text{изм}}$ , мс	
$F_{\text{изм}}$ , кГц	
$\Delta F$ , Гц	

Здесь  $F_{\text{шк}}$  – частота, отсчитанная по шкале измерительного генератора;  $T_{\text{изм}}$  – период, измеренный цифровым частотомером в режиме «Измерение периода»;  $F_{\text{изм}} = 1/T_{\text{изм}}$  – результат измерения частоты;  $\Delta F = F_{\text{шк}} - F_{\text{изм}}$  – погрешность градуировки шкалы генератора.

4. Измерить кратковременную нестабильность частоты высокочастотного генератора типа Г4-18 на частоте 2МГц.

При измерении нестабильности время усреднения, равное времени измерения цифрового частотомера  $T_0$  выбрать равным 1 с. Время наблюдения  $t_n$ , соответствующее времени между двумя измерениями, взять равным 20 с. Значение кратковременной нестабильности определяют по результатам десяти последовательных измерений. Результаты измерений заносят в табл. 2.3.

В строки таблицы 6 заносят следующие значения:  $F(t_i, T_0)$  – результат измерения частоты с временем усреднения  $T_0$ , выполненный в момент времени  $t_i$ ;  $F(t_i + t_n, T_0)$  – результат измерения частоты с тем же значением временем усреднения, выполненный по истечении времени наблюдения  $t_n$ ;  $\Delta F_i$  – уход частоты генератора (Гц) за время наблюдения  $t_n$ , определяемый как:

$$\Delta F_i = F(t_i + t_n, T_0) - F(t_i, T_0);$$

$\delta F_i$  - относительное значение ухода частоты за время наблюдения:

$$\delta F_i = \frac{\Delta F_i}{F(t_i, T_0)}$$

Таблица 2.3

$F(t_i, T_0)$ , кГц	
$F(t_i + t_H, T_0)$ , кГц	
$\Delta F_i$ , Гц	
$\delta F_i$	

5. Произвести измерение отношения частот генераторов типа Г3 и Г4. Частоты задаются преподавателем.

6. Произвести измерение частоты генератора типа Г4 при разных случайно выбранных частотах и времени измерения  $T_0$  0.1 с, определяя в каждом измерении погрешность. Точное значение частоты в каждом измерении находить путем измерения с временем измерения  $T_0=1$  с или 10 с. Результаты измерений занести в табл. 2.4, где  $F$  - точное значение частоты,  $F^*$  - результат измерения,  $\Delta F = F^* - F$  - погрешность измерения частоты.

Таблица 2.4

$F$ , МКС	
$F^*$ , МКС	
$\Delta F$ , МКС	

Таблица 2.5

$T$ , МКС	
$T^*$ , МКС	
$\Delta T$ , МКС	

7. Произвести измерение периода сигнала при разных случайно выбранных значениях с  $f_{кв} = 100$  кГц и  $K$ , соответствующим выбранному в домашнем задании. Точное значение периода в каждом измерении находить путем его измерения при больших значениях  $f_{кв}$ . Результаты измерений свести в табл. 2.5, где  $T$  - точное значение периода,  $T^*$  - измеренное значение периода,  $\Delta T = T^* - T$  - погрешность измерения.

## 2.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Структурные схемы цифрового частотомера в режимах самоконтроля, частоты, периода и отношения частот.

2. Таблицы результатов измерений по пп.2, 3, 4.
3. Результат вычисления кратковременной нестабильности частоты по данным п.4 (абсолютной и относительной).
4. Среднеквадратические значения погрешностей измерения априорно неизвестной частоты и периода, вычисленные по результатам измерений в пп.6, 7. Привести вычисленные в домашнем задании теоретические значения среднеквадратической погрешности измерения априорно неизвестной частоты и периода.
5. Гистограммы погрешностей квантования по пп.6, 7. Здесь же привести теоретические плотности распределения погрешностей. Произвести сравнение статистического закона распределения с теоретическим законом по критерию Колмогорова.

Примечание. Формулы для вычисления среднеквадратической погрешности для априорно неизвестного временного интервала, методика построения гистограммы, и другие необходимые сведения по статистической обработке результатов измерений приведены в [2].

## 2.5. Контрольные вопросы

1. Структурная схема и принцип работы цифрового частотомера в режимах:
  - а) самоконтроля;
  - б) измерения частоты;
  - в) измерения периода;
  - г) измерения отношения частот
2. Привести эпюры напряжений в разных точках схемы, выражения, используемые для получения результата измерения.
3. Почему цифровой частотомер, построенный на схемах с жесткой логикой, называется прямопоказывающим прибором?
4. Составляющие суммарной погрешности измерения цифрового частотомера в режиме измерения частоты и периода.
5. Законы распределения погрешностей квантования в режиме измерения априорно неизвестной частоты и периода.
6. Законы распределения погрешностей в режиме измерения фиксированных значений частоты и периода.
7. Резонансный метод измерения частоты.
8. Метод перезаряда конденсатора при измерении частоты.
9. Измерение частоты методом сравнения с частотой образцового генератора.
10. Прецизионные методы измерения частоты: метод с дискретной и квазипрерывной весовой функцией.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ

Цель работы: ознакомление с методами и приборами для измерения напряжения постоянного тока и напряжения переменного тока низких частот.

#### 3.1. Краткие сведения об измерении напряжения

##### 3.1.1. Значения измеряемых напряжений

При измерении напряжения постоянного тока находят его значение, а при измерении же напряжения переменного тока определяют значение какого-либо его параметра и очень редко – мгновенного значения, т. е. значения напряжения в определённый момент времени (для таких измерений используют обычно электронный осциллограф).

Напряжение переменного тока характеризуется четырьмя основными параметрами – пиковым, средним, средневыпрямленным и среднеквадратическим.

Пиковое значение  $U_m$  (амплитудное для синусоидальных сигналов) – это наибольшее мгновенное значение напряжения за время измерения (или за период). При разнополярных несимметричных кривых напряжения различают положительное и отрицательное пиковое значение (рис. 3.1). Необходимо иметь также в виду, что о пиковом значении напряжения случайного сигнала можно говорить только в вероятностном смысле.

Среднее значение за время измерения (за период) – это постоянная составляющая измеряемого напряжения

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (3.1)$$

Средневыпрямленное значение – это среднее значение абсолютных мгновенных значений напряжения

$$U_{ср.в} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (3.2)$$

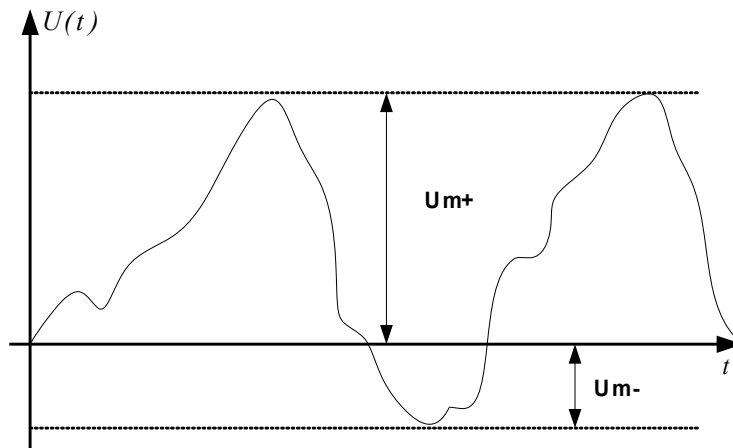


Рис. 3.1. Иллюстрации к понятию амплитуды переменного напряжения

Если  $T = 1$ , то  $U_{cp.в}$  равно площади под кривой напряжения (рис. 3.2).

$\uparrow U(t)$

$U_{cp.в}$   $t$

Рис. 3.2. Иллюстрация к понятию среднев्यпрямленного значения переменного напряжения

При однополярном напряжении среднее его значение равно среднев्यпрямленному, а при разнополярных напряжениях эти параметры различны. Например, для синусоидального напряжения:  $U_0 = 0$ ,  $U_{cp.в} = 0.637 \cdot U_m$ .

Среднеквадратическое значение напряжения за время измерения (за период) равно

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3.3)$$

Следует помнить, что квадрат среднеквадратического значения напряжения периодического сигнала несинусоидальной формы равен сумме квадратов значений постоянной составляющей и всех гармонических составляющих этого напряжения

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2, \quad (3.4)$$

где 1, 2, ..., k – номер гармоники.

Отметим то, что среднеквадратическое значение периодического напряжения сложной формы не зависит от фазовых соотношений между его гармоническими составляющими.

Так как связь между пиковым  $U_m$  и среднеквадратическим  $U$  значением напряжения данной формы устанавливается с помощью коэффициента амплитуды

$$k_a = U_m / U ,$$

а между среднеквадратическим  $U$  и средневыпрямленным – коэффициентом формы

$$k_\phi = U / U_{cp.\phi} ,$$

то можно записать

$$U_{cp.\phi} = \frac{U}{k_a \cdot k_\phi} .$$

Например:

- для синусоидального напряжения:  $k_a = 1,41$ ;  $k_\phi = 1,1$ .
- для пилообразного напряжения:  $k_a = 1,73$ ;  $k_\phi = 1,16$ .
- для прямоугольного симметричного (меандра):  $k_a = k_\phi = 1$ .

### 3.1.2. Электронные вольтметры

Измерение напряжений в электронных схемах отличаются от измерений в электротехнических цепях, что объясняется специфическими особенностями электрических сигналов, которые используются в электронике и радиотехнике:

- исключительно широкий частотный диапазон – от постоянных напряжений до СВЧ;
- большой диапазон измеряемых значений напряжений – от долей мВ до десятков кВ;
- большое разнообразие форм сигналов;
- как правило, малая мощность источника измеряемого сигнала.

Поэтому, обычно в электронных и радиотехнических устройствах измерение напряжений производят электронными вольтметрами, технические характеристики которых приведены ниже:

- очень малое потребление мощности входного сигнала;
- слабая зависимость показаний от рабочей частоты исследуемого сигнала (диапазон частот до 1 и более ГГц);
- высокая чувствительность при большом динамическом диапазоне входных сигналов (0,1 мкВ...300 В);

- малое время установления показаний;
- устойчивость к перегрузкам;

Классифицировать электронные вольтметры можно по различным признакам, в частности, следующим:

- по виду (назначению) – вольтметры постоянного и переменного тока, импульсные, фозочувствительные, селективные и универсальные;
- по типу отсчётного устройства – вольтметры аналоговые и цифровые;
- по измеряемому параметру напряжения – вольтметры пиковых, среднеквадратических и средневыпрямленных значений;
- по частотному диапазону – НЧ, ВЧ, СВЧ и широкодиапазонные,
- по схеме входа – с открытым и закрытым входом.

В первую очередь выделяют две большие группы электронных вольтметров – аналоговые и цифровые. Внешним признаком этой классификации служит тип отсчётного устройства, чаще всего встречаются приборы со стрелочными индикаторами, но могут применяться и индикаторы других типов. Наиболее широко распространены цифровые вольтметры, которые в последние годы получили ряд новых качеств, благодаря применению в них микропроцессоров. Но, хотя удельный вес цифровых вольтметров непрерывно растёт, выпуск аналоговых приборов не прекращается. Это связано обычно с тем, что на практике достаточно часты ситуации, когда аналоговая форма индикации предпочтительнее цифровой. Поэтому цифровые вольтметры могут дополнительно иметь аналоговый индикатор или аналоговый выход.

### 3.1.3. Аналоговые электронные вольтметры, структурные схемы и принцип действия

В самом общем виде структурная схема аналогового электронного вольтметра (АЭВ) состоит из следующих блоков:

- а) входного блока;
- б) измерительного преобразователя;
- с) показывающего прибора и источника питания.

Входной блок состоит обычно из делителей напряжения (аттенюаторов) и эмиттерного (истокового) повторителя, предназначенного для получения высокого входного сопротивления.

Измерительный преобразователь у вольтметра переменного тока – это устройство, преобразующее напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока, пропорциональное какому-то параметру этого напряжения. Обычно до или после преобразователя, а иногда и до, и после, стоит усилитель переменного или постоянного тока.

Показывающий прибор – это стрелочный прибор магнитоэлектрической системы или электронный аналоговый линейчатый индикатор, который

выполняется на основе жидких кристаллов, ламп накаливания (обычно люминесцентного типа), светодиодных матриц или газоразрядных элементов.

Структурная схема электронного аналогового вольтметра постоянного тока с МЭП в качестве индикатора приведена ниже (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Структурная схема АЭВ постоянного тока с МЭП

Для приборов, которые измеряют напряжение переменного тока, обычно используют три варианта структурной схемы (рис. 3.4, а, б, в).

Вариант реализации (рис. 3.4, а) пригоден только для измерения переменных напряжений достаточно большой величины. Для повышения чувствительности применяют модификации (рис. 3.4, б или в).

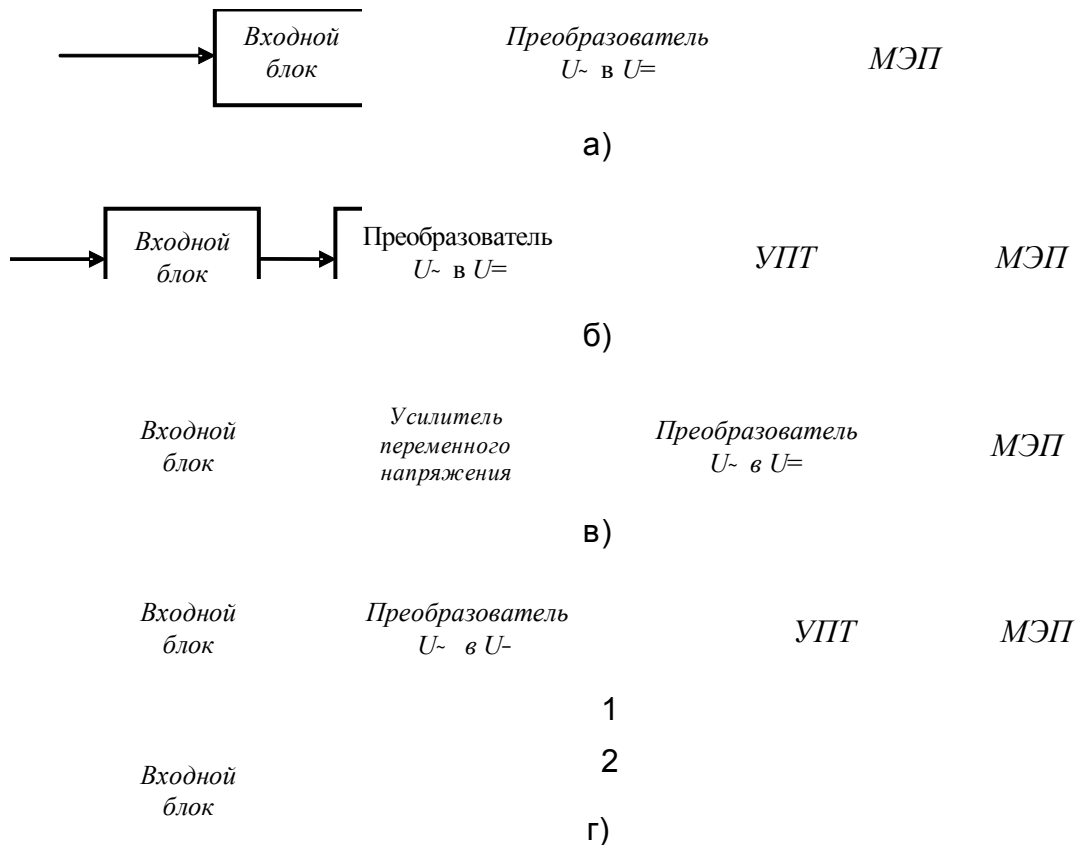


Рис. 3.4. Варианты структурных схем АЭВ переменного напряжения

Вариант (рис. 3.4, б) может иметь очень широкий диапазон частот (до 1 ГГц), но не обладает высокой чувствительностью. Для реализации (рис. 3.4, в) диапазон частот ограничен полосой пропускания измерительного усилителя переменного тока, который может составлять сотни мегагерц. Они отличаются высокой чувствительностью по напряжению (на уровне единиц микровольт), ограниченной собственными шумами усилителя. Кроме того, в схеме



с предварительным усилителем возможны нелинейные искажения усиливаемого сигнала, понижающие точность измерений.

Если варианты (рис. 3.4, *а* и 3.4, *б*) объединить в одном приборе, получим универсальный вольтметр (рис. 3.4, *з*), который служит для измерения переменного и постоянного напряжений. Возможны и другие структурные схемы электронных аналоговых вольтметров.

Приведённая погрешность имеет порядок 1,0...2,5% и определяется в основном качеством преобразователя и уровнем гармоник измеряемого сигнала.

### 3.1.4. Преобразователи пикового значения

В этом случае напряжение на выходе преобразователя соответствует пиковому значению входного напряжения. Он содержит обычно элемент, запоминающий пиковое значение напряжения, это, как правило, конденсатор  $C$ , заряжаемый через диод до пикового значения.

Такие преобразователи являются самыми *высокочастотными* (точнее самыми *широкополосными*) преобразователями переменного напряжения в постоянное. Они имеют как открытый, так и закрытый входы (рис. 3.5, *а*, *б*)

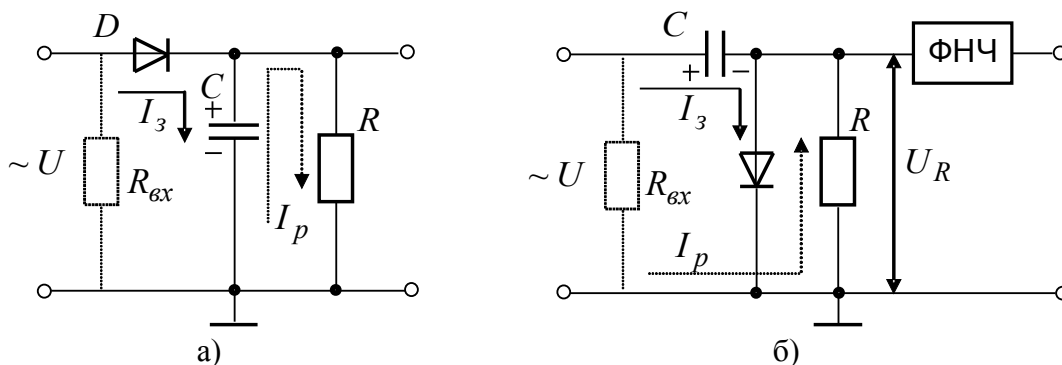


Рис. 3.5. Электрические схемы преобразователей пикового значения переменного напряжения в постоянное напряжение

Для той и другой схемы должно выполняться условие

$$\tau_{\zeta} = R_i C = \delta R G.$$

Также необходимо, чтобы постоянная времени цепи заряда  $\tau_z$  была меньше самого высокочастотного периода измеряемого напряжения, а цепи разряда —  $\tau_p$  значительно больше самого низкочастотного периода измеряемого напряжения.

В пиковом преобразователе с открытым входом (рис. 3.5, *а*) в начальный момент напряжение к диоду приложено почти целиком, поскольку  $C \gg \tilde{N}_{\dot{a}}$  (порядка десятков нФ).

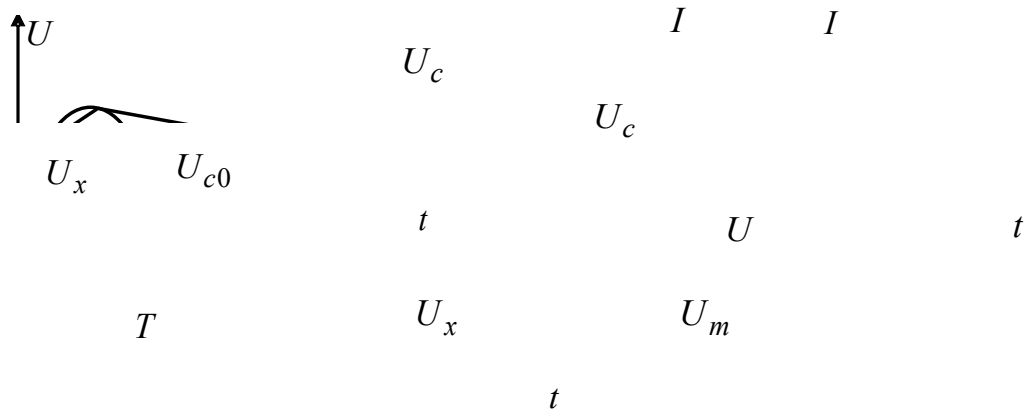


Рис. 3.6. Графики напряжений в отдельных узлах схемы пикового преобразователя с открытым входом

За несколько полупериодов (рис. 3.6. б) конденсатор зарядится почти до амплитудного значения напряжения, так как  $\tau_{\zeta} \approx \delta$ . По мере повышения напряжения на емкости разность потенциалов между анодом и катодом ( $U_a = U_x - U_c$ ) уменьшается, поскольку преобразователь представляет собой схему с автоматическим смещением.

В установившемся же режиме напряжение катода диода  $U_c \approx U_m$ , но из-за небольшого разряда емкости напряжение на катоде немного уменьшится, и через диод проходят импульсы тока с малой амплитудой, пополняя заряд конденсатора. Ток через диод протекает лишь в течение короткого времени, части периода, которая характеризуется углом отсечки  $\theta$ .

Напряжение на конденсаторе измеряется стрелочным вольтметром. Его значение тем ближе к  $U_m$ , чем меньше угол отсечки  $\theta$  в соответствии с условием

$$U_c = U_m \sin(90^\circ - \theta) = U_m \cos \theta.$$

При наличии в составе входного напряжения постоянной составляющей, при которой  $U_x = U_0 + U_m' \sin \omega t$ , измеряемое вольтметром напряжение зависит не только от амплитуды  $U_m'$ , но и от постоянной составляющей  $U_0$ .

Следовательно, конденсатор  $C$  заряжается до напряжения, определяемого суммарным воздействием постоянной и переменной составляющих напряжения, которое подводится к преобразователю, а именно до пикового значения

$$U_m = U_m' + U_0.$$

В пиковом преобразователе с закрытым входом (считаем, что к нему

подведено измеряемое напряжение  $u_x = U_m \psi(\sin \omega t)$  в течение нескольких полупериодов конденсатор  $C$  заряжается почти до  $U_m$  через диод  $VD$ . Так как сопротивление резистора  $R$  велико (следовательно, велико и значение постоянной времени разряда), напряжение  $U_c$  меняется весьма незначительно, и его можно считать, с некоторым приближением, постоянным. Значит можно рассматривать конденсатор  $C$  как источник постоянного напряжения  $U_c \approx U_m$  (рис. 3.7, а).

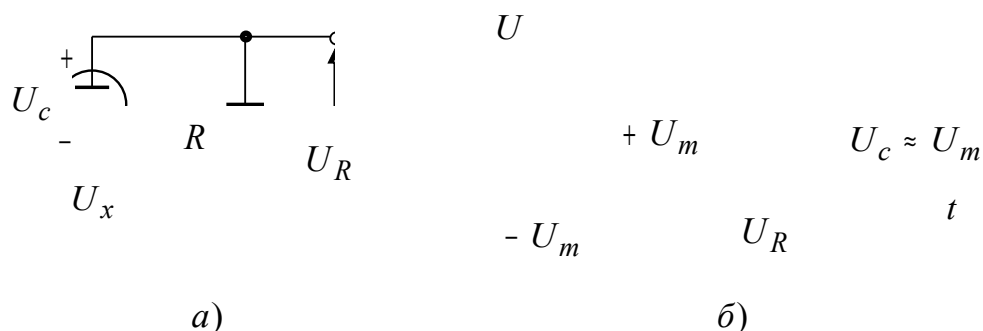


Рис. 3.7. Эквивалентная схема пикового преобразователя с закрытым входом (а) для варианта (рис. 5, б), графики напряжений (б)

Из приведённой выше эквивалентной схемы следует

$$U_R = U_x - U_c \cdot \sin(\omega t) - U_c.$$

При напряжении  $u_x$  равном максимальному положительному значению переменного напряжения  $u_R = 0$ , а при  $u_x$  равном максимальному по модулю отрицательному значению переменного напряжения  $U_c \approx U_m$ , а значит  $U_R = -2U_m$  (рис 3.7, б). Таким образом, напряжение на резисторе  $R$  является пульсирующим, поэтому, чтобы на низких частотах стрелка МЭП не колебалась, между резистором и МЭП включается фильтр НЧ (рис. 3.5, б), пропускающий только постоянную составляющую пульсирующего напряжения. Прибор измеряет напряжение  $U_c \approx U_m$ .

При отсутствии постоянной составляющей в измеряемом напряжении, преобразователи с открытым и закрытым входом дают одинаковые результаты: напряжение на емкости в обоих случаях примерно равно  $U_m$  и показания вольтметров пропорциональны пиковому значению (амплитуде) измеряемого напряжения. Если во входном сигнале имеется постоянная составляющая, преобразователь с закрытым входом реагирует только на пиковое значение (амплитуду) переменной составляющей сигнала и показания вольтметра с таким преобразователем также пропорциональны только переменной составляющей. Следовательно, вольтметр, содержащий пиковый преобразователь с закрытым входом, измеряет пиковое значение напряжения без постоянной составляющей, то есть пиковое значение, превышающее постоянную состав-

ляющую.

Входные сопротивления открытого и закрытого преобразователей не одинаковы, для открытого –  $R_{\text{вх.отк}} \approx R/2$ , а для закрытого –  $R_{\text{вх.зак}} \approx R/3$ . В вольтметрах же переменного напряжения, где на входе стоят подобные преобразователи, их входные сопротивления определяют резисторы, стоящие на входе самих приборов.

Для измерения пикового значения отрицательной полярности (отрицательной амплитуды) следует изменить полярность включения выпрямительного диода.

Выходное напряжение пикового преобразователя делится сопротивлением делителя напряжения на  $\sqrt{2}$ , и на вход УПТ поступает напряжение постоянного тока, равное  $0,707 U_m$ , а МЭП градуируется в среднеквадратических (эффективных) значениях измеряемого синусоидального напряжения. УПТ с МЭП фактически является электронным вольтметром постоянного напряжения.

Пиковые (амплитудные) вольтметры при сравнительно низкой чувствительности (порог чувствительности  $\approx 0,1\text{В}$ ) имеют широкий частотный диапазон измеряемых переменных напряжений.

### 3.1.5. Преобразователи средневыпрямленного значения

Преобразователем средневыпрямленного значения называется преобразователь напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока, значение которого пропорционально средневыпрямленному значению напряжения на входе преобразователя.

Такой преобразователь представляет собой двухполупериодный выпрямитель с магнитоэлектрическим усредняющим прибором. Наиболее часто применяются двухполупериодные мостовые схемы выпрямления.

В этом случае отклонение стрелки МЭП пропорционально средневыпрямленному значению напряжения, подводимого к преобразователю (при условии работы на линейном участке вольтамперной характеристики полупроводниковых диодов)

$$U_{\text{ср.выпр}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

При малых входных напряжениях начинается сказываться нелинейность характеристик полупроводниковых диодов, что приводит к нелинейности пассивных преобразователей. Существуют различные способы уменьшения этой нелинейности и общая погрешность преобразователей меньше  $0,1 \div 1\%$  при чувствительности больше  $100\text{ мВ}$ .

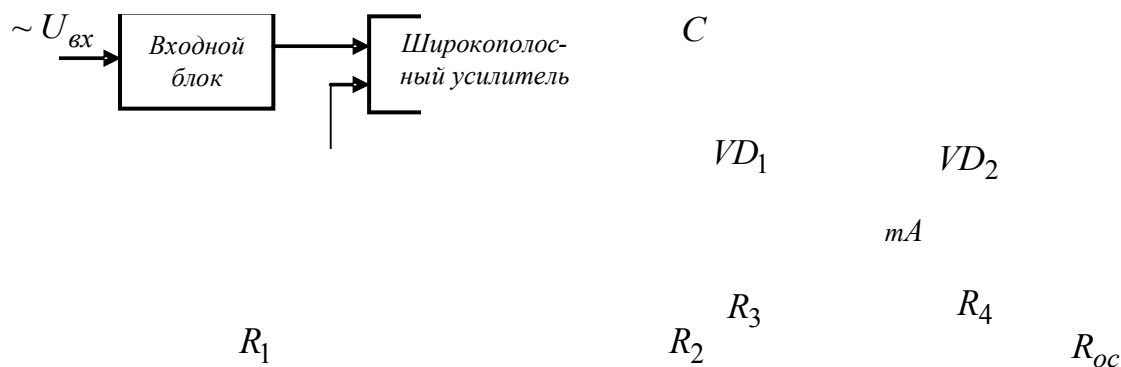


Рис. 3.8. Активный преобразователь средневыпрямленного значения с ООС

Более широкие возможности повышения чувствительности и линейности дают активные преобразователи, реализующие, например, метод введения отрицательной обратной связи (ООС), упрощённая электрическая схема одного из вариантов которого (рис. 8) содержит входной блок, широкополосный усилитель, выпрямитель и цепь ООС. Напряжение ООС по постоянному току снимается с резистора  $R_{ос}$ .

При глубокой ООС погрешность преобразования не превышает величины 0,05 % в диапазоне входных напряжений 0,1 ÷ 1,0 В для частот 20 Гц ÷ 20 кГц. Общая погрешность подобных измерителей меньше 0,1 ÷ 0,2 %.

При линейной функции преобразования выходное напряжение преобразователя пропорционально средневыпрямленному значению входного напряжения при любой форме измеряемого сигнала.

### 3.1.6. Усилители и показывающие приборы АЭВ

В электронных аналоговых вольтметрах применяются как усилители переменного, так и усилители постоянного токов. Первые включаются в схему до преобразователя, а вторые после. Усилители постоянного тока (УПТ) обычно служат в качестве усилителя мощности, который усиливает мощность входного измеряемого сигнала до уровня, достаточного для приведения в действие механизма МЭП. Он согласует малое внутреннее сопротивление МЭП с высоким сопротивлением нагрузки преобразователя или входного аттенюатора.

В электронных вольтметрах УПТ должны иметь высокую стабильность коэффициента усиления и малый дрейф выходной величины. Часто их выполняют по мостовым схемам с применением отрицательной обратной связи (ООС), которая повышает стабильность работы схемы, делает её мало чувствительной к перегрузкам. Характеристика усилителя, выполненная по мостовой схеме с ООС, линейна в достаточно широких пределах.

Усилители переменного тока должны иметь высокую чувствительность, малый коэффициент нелинейных искажений, большое значение и высокую

стабильность коэффициента усиления в широкой полосе пропускания. Для выполнения этих условий в измерительных усилителях обычно применяют глубокую ООС.

У многих вольтметров с широкополосными усилителями усилители могут использоваться отдельно от остальной схемы вольтметра как самостоятельные измерительные усилители.

*Стрелочные измерительные приборы.* В электронных вольтметрах в качестве индикаторов обычно используют МЭП с пределами измерения  $50 \div 100 \mu A$ . Применение микроамперметров, а не миллиамперметров обуславливается не только стремлением повысить чувствительность, но и необходимостью получать малые токи во всех цепях схемы УПТ, особенно выполненных по мостовым схемам.

### 3.1.6. Цифровые вольтметры с жёсткой логикой

Цифровые вольтметры выпускаются трёх основных типов – постоянного тока, переменного тока и универсальные. ЦВ переменного тока и универсальные обычно состоят из высокоточного измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное напряжение и ЦВ постоянного тока. Показания вольтметра выражаются либо в среднеквадратических значениях, либо в средневыпрямленных значениях синусоидального напряжения. Поэтому можно считать вольтметры с жёсткой логикой вольтметрами постоянного тока. Устройство и принцип действия измерительных преобразователей рассмотрены выше.

По принципу действия ЦВ с жёсткой логикой обычно подразделяют на четыре основные группы:

- времяимпульсные вольтметры;
- вольтметры с двойным интегрированием;
- вольтметры поразрядного уравнивания (кодирования);
- вольтметры с преобразованием напряжения в частоту.

### 3.1.7. Интегрирующий цифровой вольтметр

В основу работы ЦВ этого типа (рис. 3.9) положено преобразование напряжения постоянного тока в интервал времени, длительность которого измеряется цифровым методом. Это преобразование можно осуществить с помощью сравнения измеряемого напряжения с линейно изменяющимся напряжением (рис. 3.10).

Напряжение измеряется циклами, которые задаёт блок управления. В начале цикла тактовый импульс из блока управления сбрасывает в нуль счётчик, запускает ГЛИН и компаратор. Измеряемое напряжение  $U_{изм}$  подводится через входной блок к 1-му входу компаратора и сравнивается в нём с

линейно-изменяющимся напряжением (ЛИН), подводимым к 2-му входу компаратора.

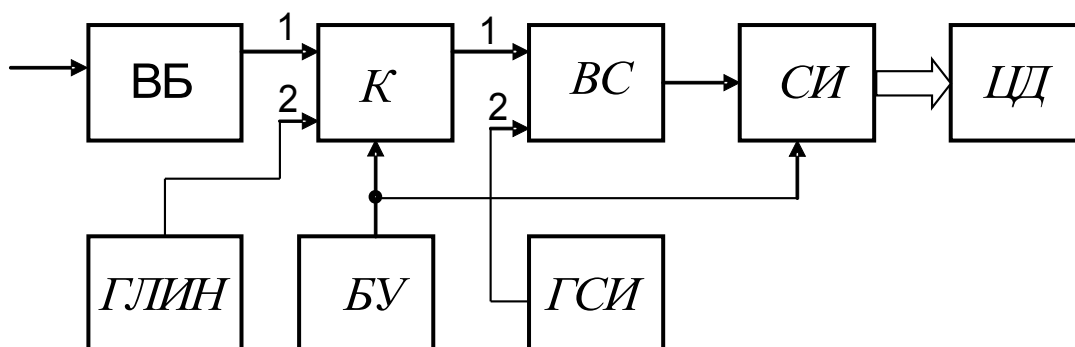


Рис. 3.9. Структурная схема ЦВ с времяимпульсным преобразованием: ВБ – входной блок; К – компаратор; ВС – временной селектор; СИ – счётчик импульсов; ЦД – цифровой дисплей; ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения; БУ – блок управления; ГСИ – генератор счётных импульсов.

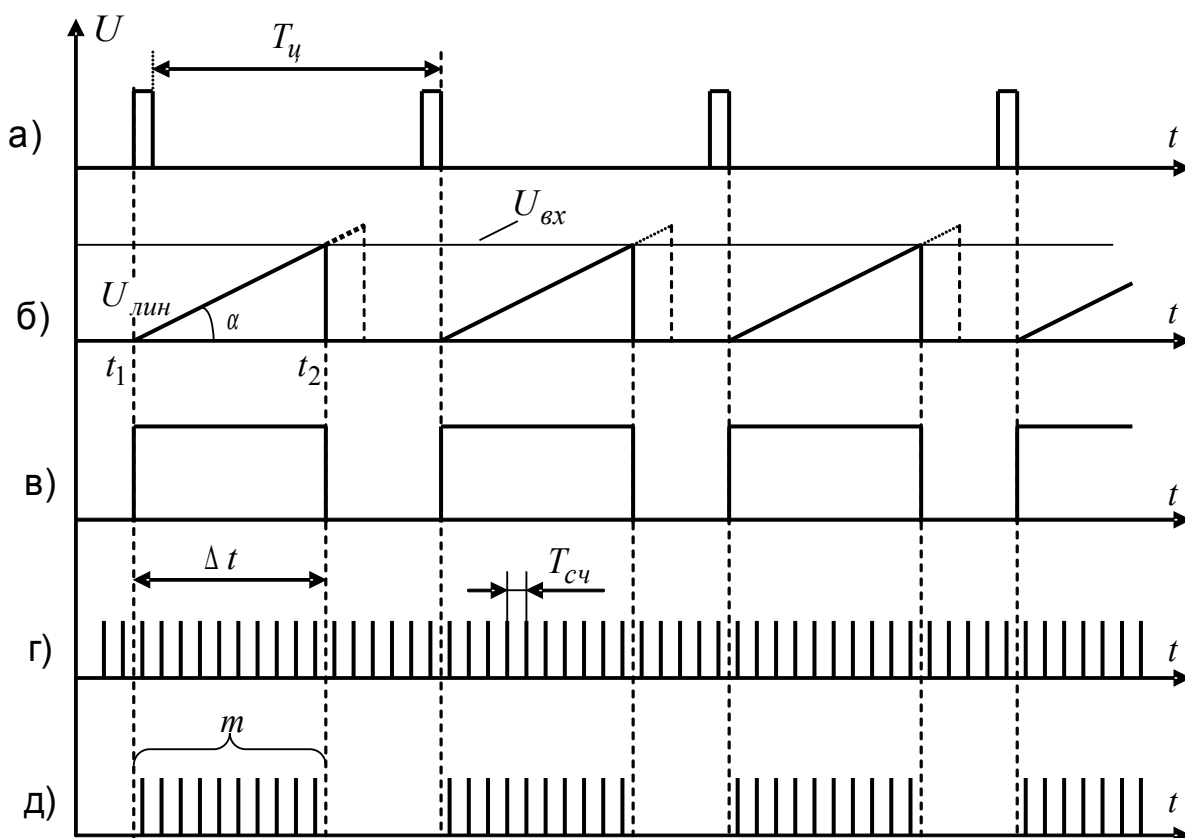


Рис. 3.10. Диаграммы напряжений в отдельных узлах схемы ЦВ

В момент времени  $t_2$  фиксируется равенство этих двух напряжений и на выходе компаратора формируется прямоугольный импульс длительностью  $\Delta t = t_2 - t_1$ , который поступает на временной селектор.

Этот интервал заполняется счётными импульсами, вырабатываемыми генератором счётных импульсов (ГСИ) и подводимыми к временному селектору. Счётчик подсчитывает число  $m$  импульсов, прошедших на вход за ин-

тервал времени  $\Delta t$ , а результат измерения отображается на цифровом дисплее.

Выходное напряжение  $U_{\text{дци}}$  равно в этом случае величине  $m \cdot (v / F\tilde{n}^{\pm})$ , где  $v$  – скорость нарастания ЛИН (численно равна тангенсу угла наклона линии  $U_{\text{лин}}$  к оси времени). В ЦВ отношение  $v / F\tilde{n}^{\pm}$  выбирается равным  $10^b$  ( $b$  – целое число), поэтому  $U_{\text{дци}} = m \cdot (v / F\tilde{n}^{\pm}) = m \cdot 10^b$ .

Следовательно, ЦВ непосредственно показывает значение измеряемого напряжения  $U_{\text{изм}}$  (число  $b$  определяет положение запятой в числе  $m$ ).

Точность такого ЦВ во многом определяется характеристиками линейно-изменяющегося напряжения.

Из-за указанных недостатков, приводящих к появлению погрешностей преобразования, вольтметры с времяимпульсным АЦП (с однократным интегрированием) были вытеснены вольтметрами с двойным интегрированием. Можно также отметить, что времяимпульсные ЦВ имеют и другие недостатки, в частности это погрешности, вносимые компараторами; погрешности, присущие цифровому измерителю интервалов времени обусловленные нестабильностью частоты счётных импульсов и погрешностью дискретности ( $\pm$  единица младшего разряда).

### 3.1.8. Цифровой вольтметр двойного интегрирования

В предыдущем вольтметре точность преобразования зависела от постоянства наклона линии напряжения, формируемого ГЛИН. Для соблюдения этого условия необходимо иметь в схеме интегратора высокостабильные детали, применять термостабилизацию времязадающих цепей и усложнять схему.

От соблюдения этих условий свободен метод двойного интегрирования (иногда его ещё называют интегрированием вверх-вниз), поэтому ЦВ такого типа широко распространены до настоящего времени. Структурная схема ЦВ, реализующего метод двойного интегрирования и диаграммы напряжений, поясняющие его работу, приведены на рис. 5.5 и рис. 5.6, соответственно.

Измеряемое значение напряжения преобразуется в пропорциональное число счётных импульсов. Цикл преобразования  $T_{\text{с}}$  состоит из двух интервалов времени  $T_1$  и  $T_2$ , задаваемых длительностью импульса и паузой между импульсами. В начале цикла БУ вырабатывает прямоугольный импульс калиброванной длительности  $T_1$ , в течение которого на вход интегратора через входной блок и электронный переключатель поступает измеряемое напряжение постоянного тока. В тот же момент начинается первый такт интегрирования, при котором напряжение линейно растёт, крутизна его пропорциональна  $U_{\text{дци}}$ .



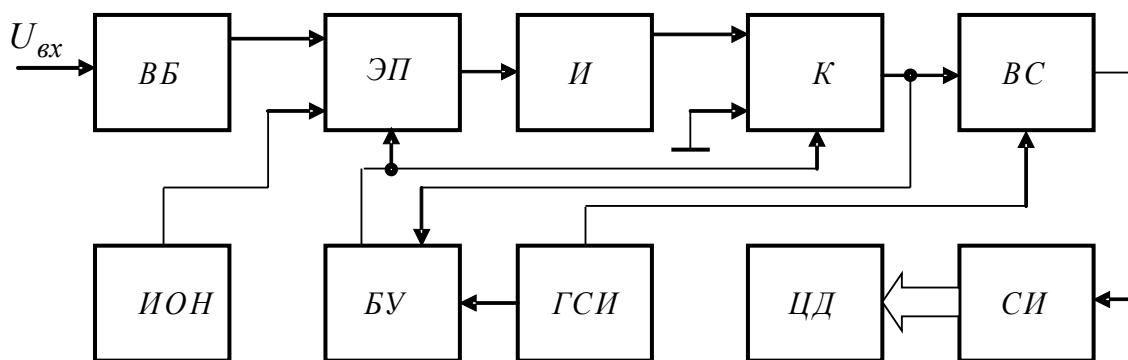


Рис. 3.11. Структурная схема ЦВ с двойным интегрированием: ВБ – входной блок; ЭП – электронный переключатель; И – интегратор; К – компаратор; ВС – временной селектор; ИОН – источник опорного напряжения; БУ – блок управления; ГСИ – генератор счётных импульсов; ЦД – цифровой дисплей; СИ – счётчик импульсов

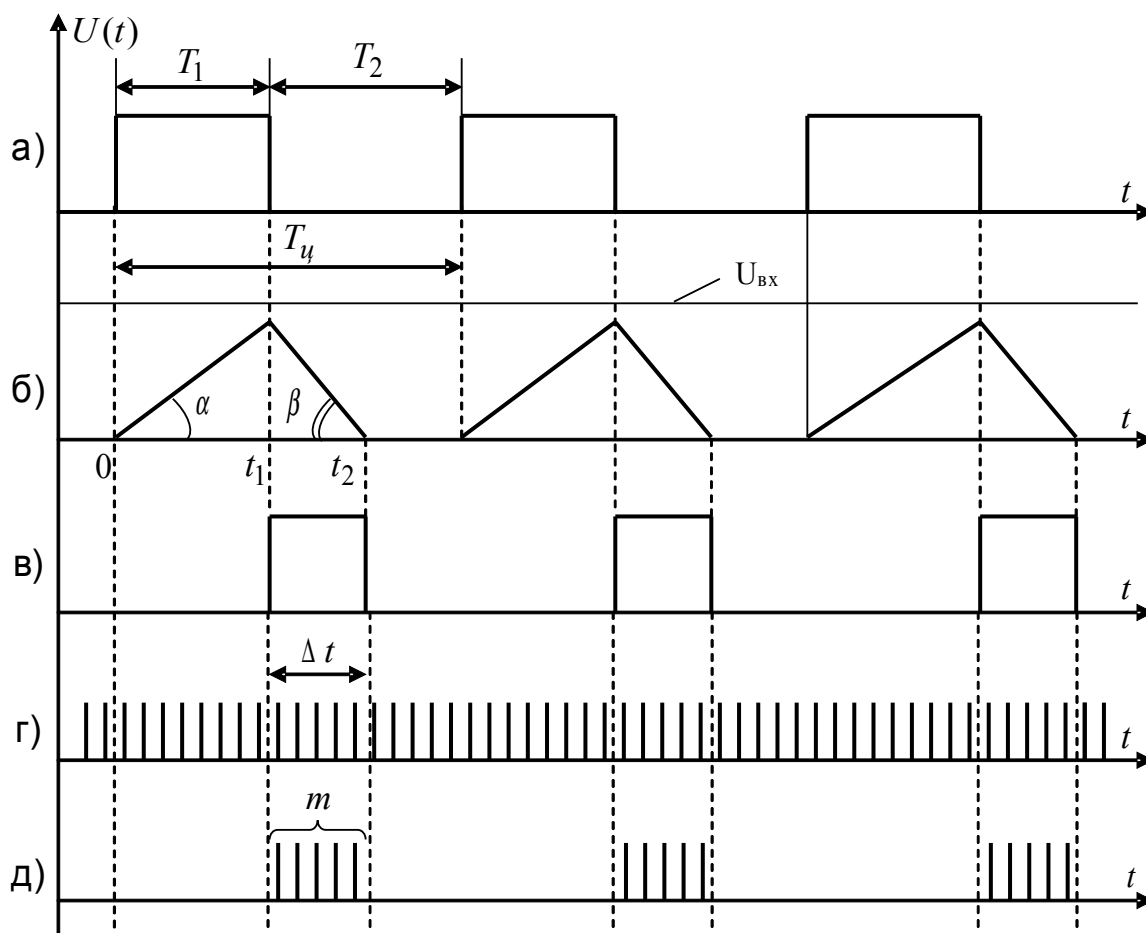


Рис. 3.12. Диаграммы напряжений в отдельных узлах электрической схемы ЦВ с двойным интегрированием

В момент окончания импульса ( $t_1$ ) ЭП подаёт на вход интегратора напряжение от образцового источника, полярность которого противоположна полярности измеряемого напряжения. После этого начинается второй такт интегрирования, в течение которого напряжение на выходе интегратора линейно убывает. В момент времени  $t_2$ , когда напряжение на выходе интегратора

становится равным нулю, так как второй вход интегратора соединён с землёй, оканчивается второй такт интегрирования.

С выхода компаратора на вход 1 временного селектора подаётся стробирующий импульс длительностью  $\Delta t = t_2 - t_1$ , который заполняется счётными импульсами, подсчитываемыми счётчиком. Их число пропорционально  $U_{\dot{e}ci}$ , на этом цикл измерений заканчивается.

Связь между  $\Delta t$  и  $U_{\dot{e}ci}$  определяется следующей формулой

$$\Delta t = \frac{U_{\dot{e}ci}}{U_{\dot{i}a\delta}} \cdot T_1.$$

Интервал времени  $\Delta t$  прямо пропорционален  $U_{\dot{e}ci}$  и не зависит от величины постоянной времени цепи интегрирования RC, в этом и заключается достоинство метода двойного интегрирования, так как для его реализации не требуются схемы с высокостабильными элементами. Интервал  $\Delta t$  также не зависит от начального напряжения.

Длительность импульса  $T_1$  и значение напряжения  $U_{\dot{i}a\delta}$  можно поддерживать с высокой точностью, следовательно, погрешность преобразования  $U_{\dot{e}ci}$  в  $\Delta t$  очень мала. При частоте счётных импульсов, равной  $F_{\dot{n}^+}$ , интервал  $\Delta t = m/F_{\dot{n}^+} = m \cdot T_{\dot{n}^+}$ , где  $m$  – количество счётных импульсов. Временной интервал  $\Delta t = mT_{\dot{n}^+} = U_{\dot{e}ci} (T_1 / U_{\dot{i}a\delta})$ , а измеренное напряжение определяется выражением:

$$U_{\dot{e}ci} = (mT_{\dot{n}^+}U_{\dot{i}a\delta}) / T_1.$$

Так как интервал  $T_1$  формируется из периодов  $T_{\dot{n}^+}$  путём деления частоты счётных импульсов с коэффициентом деления  $q$  получим  $T_1 = q \cdot T_{\dot{n}^+}$ .

Поэтому измеренное напряжение

$$U_{\dot{e}ci} = \frac{mT_{\dot{n}^+}U_{\dot{i}a\delta}}{qT_{\dot{n}^+}} = Km,$$

где  $K = U_{\dot{i}a\delta} / q$  – коэффициент пропорциональности.

Для конкретного ЦВ двойного интегрирования отношение ( $U_{\dot{i}a\delta} / q = K$ ) есть величина постоянная и равная  $10^h$  вольт. В этом случае  $U_{\dot{e}ci} = m \cdot 10^h$  и прибор получается прямопоказывающим.

Метод двойного интегрирования позволяет осуществить эффективную защиту от помех нормального вида, измерять напряжение обеих полярностей, получать малую погрешность преобразования. Для подавления сетевой помехи длительность интервала интегрирования  $T_1$  выбирается кратной периоду сети.

Основными погрешностями ЦВ, использующего метод двойного интегрирования являются погрешности сравнения и преобразования (погрешность АЦП). Погрешность преобразования определяется:

- нестабильностью интервала  $T_1$ ;
- недостаточно высокой точностью образцового напряжения  $U_{i\acute{a}\delta}$  и его нестабильностью;
- недостаточной линейностью выходного напряжения  $U_{\acute{a}i\delta}$  при интегрировании “вниз”.

Максимальное значение абсолютной погрешности дискретности при измерении  $\Delta t$  равно единице младшего разряда индикаторного устройства, а максимальная относительная погрешность

$$\delta = \pm 1/m.$$

Следовательно, для повышения точности необходимо увеличивать число счетных импульсов  $m$ , соответствующее данному значению измеряемого напряжения. Это достигается увеличением времени интегрирования  $T_1$ .

## 2.9 Погрешности ЦВ.

Основные погрешности ЦВ, использующего метод двойного интегрирования, это погрешности сравнения и преобразования (погрешность АЦП). Погрешность преобразования определяется:

- а) нестабильностью  $T_1$ ;
- б) недостаточно высокой точностью  $U_{i\acute{a}\delta}$  и его нестабильностью;
- в) недостаточной линейностью  $U_{\acute{a}i\delta}$  при интегрировании “вниз”.

Максимальное значение абсолютной погрешности дискретности при измерении  $\Delta t$  равно  $\pm 1$  младшего разряда (МР), а максимальная относительная погрешность

$$\delta = \pm 1/m.$$

Следовательно, для повышения точности необходимо увеличивать число  $m$ , соответствующее данному значению  $U_{\acute{e}\grave{c}i}$ , то есть измерение тем точнее, чем больше разрядов, индицируемых ЦД

$$U_{\acute{e}\grave{c}i} = \frac{mT_{\tilde{n}}U_{i\acute{a}\delta}}{T_1} = \frac{U_{i\acute{a}\delta} m}{F_{\tilde{n}}T_1} = c \cdot m / T_1.$$

Вышеприведенное выражение показывает, что при конкретном значении  $U_{\text{дс}}$  число  $m$  растёт при увеличении  $T_1$ , то есть изменение числа индицируемых разрядов (цены 1 МР), достигается увеличением интервала интегрирования  $T_1$  и наоборот.

## 3.2. Порядок выполнения работы

### 3.2.1. Схемы измерений

Схемы измерений напряжений постоянного и переменного токов разной формы приведены на рис. 3.13, рис. 3.14, соответственно.

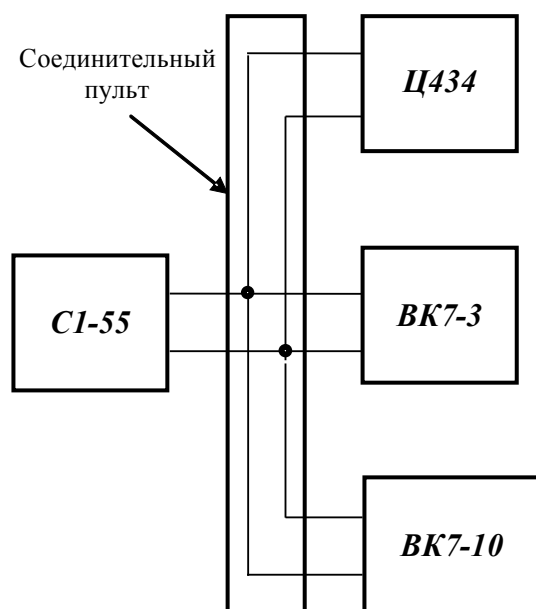


Рис. 3.13. Схема измерения напряжения постоянного тока

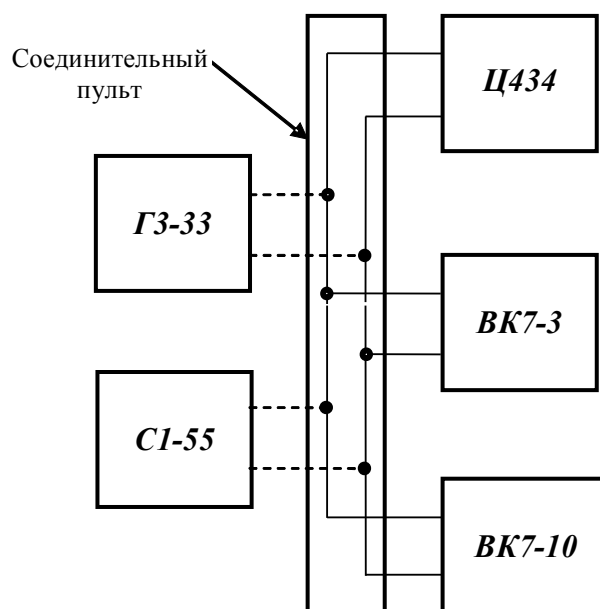


Рис. 3.14. Схема измерения напряжения переменного тока

### 3.2.2 Измерение постоянных напряжений.

1. Подключить (рис. 3.13) измерительные приборы через соединительный пульт к выходу калибратора напряжения осциллографа С1-55 и установить первоначально пределы измерения постоянного напряжения соответственно: на Ц4315 – 60 В, на АРРА-91 – 100 В, на В7-46 – 100 В.

2. Установить переключатель вида калибровочного напряжения на осциллографе в положение — (при этом на выход калибратора поступает калибровочное напряжение постоянного тока).

3. Установить переключателем величины выходного напряжения калибратора значение калиброванного напряжения постоянного тока = 0,5 В.

4. Установить переключатели пределов измерений измерительных приборов в такое положение, чтобы величина измеряемого постоянного напряже-

ния находилась (по возможности) в последней трети или второй половине шкалы (предела измерений) соответствующего прибора. Снять показания всех трёх вольтметров и занести их в таблицу.

5. Прodelать всё указанное в п.3.4. для всех остальных положений переключателя значений постоянного напряжения калибратора: 2,0 В; 5,0 В; 15,0 В и 40,0 В.

### 3.2.3. Измерение переменных напряжений.

1. Подключить согласно рис. 3.14 измерительные приборы через соединительный пульт к выходу генератора низких частот и установить на них пределы измерений 30,0 В или более.

2. Установить на выходе генератора на частоте 20Гц последовательно выходные напряжения величиной 1,0 В; 3,0 В; 9,0 В; 18,0 В и 30,0В (по показаниям индикатора выходного напряжения генератора).

3. Произвести измерение установленных значений напряжений приборами Ц4315, АРРА-91 и В7-46 (значения величин измеряемых напряжений должны находиться, по возможности, в последней трети или во второй половине от максимального значения шкалы соответствующего прибора).

4. Произвести измерения тех же значений выходных напряжений соответственно для частот 150Гц, 1кГц, 5кГц и 10кГц (измерения напряжений на частоте 5кГц и 10 кГц тестером Ц4315 и АРРА-91 не производить)

5. Подключить в соответствии с рис.13 измерительные приборы (Ц4315, АРРА-91 и В7-46) через соединительный пульт к выходу калибратора осциллографа С1-55.

6. Установить переключатель вида калибровочного напряжения на осциллографе в положение - 2 кГц (в этом положении на выход калибратора поступает переменное напряжение прямоугольной формы типа «Меандр» с частотой  $F = 2$  кГц).

7. Установить на выходе калибратора С1-55 переключателем величины калибровочного напряжения последовательно размах переменного напряжения прямоугольной формы величиной: 0,5 В; 2,0 В; 5,0 В; 15,0 В и 40 В.

8. Произвести измерения всех указанных значений напряжений измерительными приборами, вольтметрами Ц4315, АРРА-91 и В7-46 (значения величин измеряемых напряжений должны находиться, по возможности, в последней трети или второй половине шкалы или предела измерений соответствующего прибора).

### 3.2.4. Методические указания

1. В процессе измерения переменных напряжений на выходе генератора ГЗ-33 необходимо поддерживать неизменными показания измерителя выходного напряжения генератора.

2. Переключатель вида нагрузки генератора должен находиться в положении “Внутренняя нагрузка”.

3. Переключатель “Выходное сопротивление” должен находиться в положении “Атт.”.

4. При измерении напряжения переменного тока прямоугольной формы следует учитывать следующие обстоятельства:

а) положения переключателя выходного напряжения калибратора показывают величину размаха выходного напряжения, то есть величину  $2U_m$ ;

б) шкалы всех используемых в лабораторной работе вольтметров, а также шкала индикатора выходных напряжений генератора, градуированы в среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы.

### 3.2.5. Обработка результатов измерений

1. Результаты измерений напряжений постоянного и переменного тока следует представить в виде таблиц.

2. Соответствующий результат измерения заносить в таблицы с учётом погрешности соответствующего измерительного прибора (вольтметра) в точке измерения.

3. Величины погрешностей необходимо взять из паспортных данных соответствующего измерительного прибора.

### 3.3. Требования к отчету

Отчёт должен содержать:

1. Схемы измерений постоянных и переменных напряжений.  
2. Таблицы результатов измерений.  
3. Структурную схему универсального аналогового электронного вольтметра, предназначенного для измерения постоянных напряжений и переменных напряжений в широкой полосе частот.

4. Структурную схему и диаграммы напряжений, поясняющие его работу, цифрового вольтметра постоянного тока с времяимпульсным преобразованием (однократное интегрирование).

5. Схему магнитоэлектрического вольтметра постоянного тока и схему вольтметра переменного тока выпрямительного типа.

### 3.4. Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются напряжения переменного тока и какие между ними существует соотношения?

2. Дать определение абсолютной, относительной и приведённой погрешностей измерительного прибора, а также определение его основной и дополнительной погрешностей.

3. Объяснить принцип работы вольтметров и амперметров выпрямительного типа, их схемы включения.

4. Объяснить принцип работы амплитудных (пиковых) измерительных преобразователей с закрытым входом.

5. Для чего предназначен усилитель постоянного тока (УПТ) в аналоговом электронном вольтметре?

6. Объяснить принцип работы цифровых вольтметров постоянного тока с времяимпульсным преобразованием (однократного и двойного интегрирования) с помощью их структурных схем и диаграмм напряжений.

#### 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Целью работы является ознакомление с методами измерения параметров элементов электрических цепей: резисторов ( $R$ ), конденсаторов ( $C$ ) и катушек индуктивности ( $L$ ).

В процессе работы необходимо:

1. Провести с помощью универсальных измерительных приборов – мультиметров (аналогового – Ц4315, цифрового мультиметра АРРА-91 и универсального цифрового вольтметра В7-46), а также измерителя иммитанса Е7-21 измерение величин сопротивлений постоянных резисторов.

2. Провести с помощью моста Е7-21 измерение величин ёмкости и  $tg\delta$  конденсаторов, величины индуктивности и добротности ( $Q$ ) катушек индуктивности, а с помощью прибора Е7-12 величин индуктивностей катушек индуктивности, ёмкостей конденсаторов и межэлектродных емкостей полупроводниковых приборов.

Примечание: возможна замена указанных выше измерительных приборов на другие с аналогичными характеристиками.

##### **4.1. Краткие сведения об измерении параметров элементов электрических цепей**

Основными элементами цепей с сосредоточенными параметрами являются резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, Следовательно, надо уметь правильно измерять их параметры – активные сопротивления, ёмкости и индуктивности. Наибольшее применение при измерении этих параметров получили следующие методы:

- а) метод вольтметра – амперметра;
- б) метод непосредственной оценки;
- в) мостовой метод;
- г) резонансный метод;

д) метод дискретного счёта;

В данной лабораторной работе применяются три метода измерения параметров элементов цепей с сосредоточенными постоянными.

#### 4.1.1. Метод непосредственной оценки

Реализуется в приборах прямого действия, в которых измеряемая величина оценивается непосредственно по шкале, заранее отградуированной в соответствующих единицах, или считывается с индикатора цифровых приборов.

Из приборов с непосредственным отсчётом, предназначенных для измерения параметров элементов цепей, наибольшее распространение получили омметры. По принципу действия они подразделяются на электромеханические и электронные.

#### 4.1.2 Электромеханические омметры.

Они делятся на две группы:

а) омметры с однорамочным измерительным механизмом;

б) омметры с двухрамочным измерительным механизмом.

Омметры первой группы, в зависимости от величины измеряемого сопротивления, выполняются по последовательной (рис. 4.1, а), или по параллельной (рис. 4.1, б) схеме.

В первой схеме, при разомкнутом ключе, ток через прибор

$$I = U / (R_x + R_{\text{в}} + R_{\text{д}}) = K_I \cdot \alpha ,$$

где  $K_I$  – чувствительность по току,  $\alpha$  – угол отклонения индикатора.

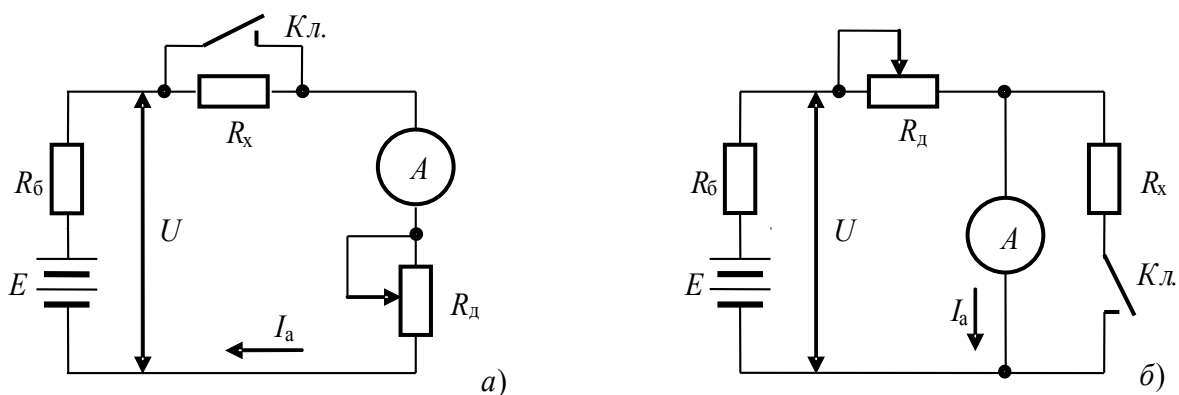


Рис. 4.1. Схемы электромеханических омметров

Следовательно,



$$\alpha = U/K_I \cdot (R_x + R_a + R_e).$$

При постоянных значениях  $K_I$ ,  $R_a$ ,  $R_x$  и  $R_e$  угол  $\alpha$  определяется величиной  $R_x$  следовательно, шкала может быть проградуирована в единицах сопротивления. Начало отсчёта («0») шкалы у такого измерителя находится справа, так как при  $R_x = 0$  угол  $\alpha = \max$ . Для поддержания постоянного значения напряжения на измерительном механизме (на  $R_e$ ) применяется добавочный резистор  $R_a$ .

Омметры с последовательной схемой применяются для измерения сравнительно больших резисторов (больше десятка Ом) и нашли широкое применение в аналоговых мультиметрах (тестерах), так как такой омметр получается очень простым.

При измерении малых сопротивлений применяют параллельную схему (рис. 4.1, б), при которой уравнение шкалы имеет следующий вид:

$$\alpha = U/(R_a R_D) (R_a R_D / R_x + R_a + R_D).$$

Начало отсчёта («0») шкалы у такого измерителя находится слева, так как при  $R_x = 0$  угол  $\alpha = 0$ .

Погрешности измерения сопротивлений тестером лежат в пределах нескольких процентов.

### 4.1.3 Электронные омметры

Электронные измерители активных сопротивлений выполняются со стрелочной (аналоговые электронные омметры), или с цифровой индикацией. Аналоговые приборы достаточно просты и обеспечивают погрешность измерения порядка 1,5%.

При построении схем таких омметров обычно используются два метода:

- а) метод стабилизированного тока в цепи делителя;
- б) метод преобразования измеряемого параметра (сопротивления) в пропорциональное напряжение.

Схема омметра, использующего первый метод (рис. 4.2, а), содержит источник стабильного тока питания резистора  $R_x$ .

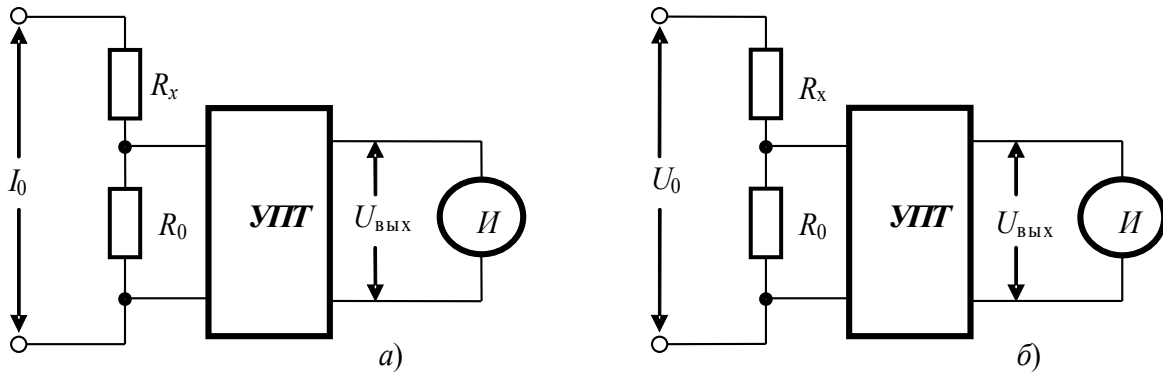


Рис. 4.2. Схемы электронных омметров

Более часто применяется в универсальных вольтметрах (мультиметрах) схема, приведённая на рис. 2, б). В ней измеряемое сопротивление при  $R_x \gg R_0$  определяется из выражения

$$R_x = \frac{R_0}{K(U_0/U_{\text{ввых}}) - 1}.$$

Подобная схема реализована в универсальных вольтметрах типа ВК7-9 и В7-26.

Шкала омметра получается нелинейной, сжата в конце шкалы и растянута в начале.

Нуль шкалы устанавливается при замкнутых накоротко входах УИТ, а при отсутствии  $R_x$  стрелка прибора отклоняется на тах величину.

В основу метода преобразования величины сопротивления в пропорциональное ему напряжение положен принцип работы операционного усилителя (ОУ) постоянного тока (рис. 4.3) с цепью отрицательной обратной связи (ООС).

В схеме (рис. 4.3, а) сопротивление  $R_x$  определяется из выражения

$$R_x = U_{\text{ввых}} \cdot R_{\text{ид}} / U_{\text{в}}.$$

В схеме (рис. 4.3, б) сопротивление  $R_x$ , будет равно

$$R_x = U_{\text{в}} \cdot R_{\text{ид}} / U_{\text{ввых}}.$$

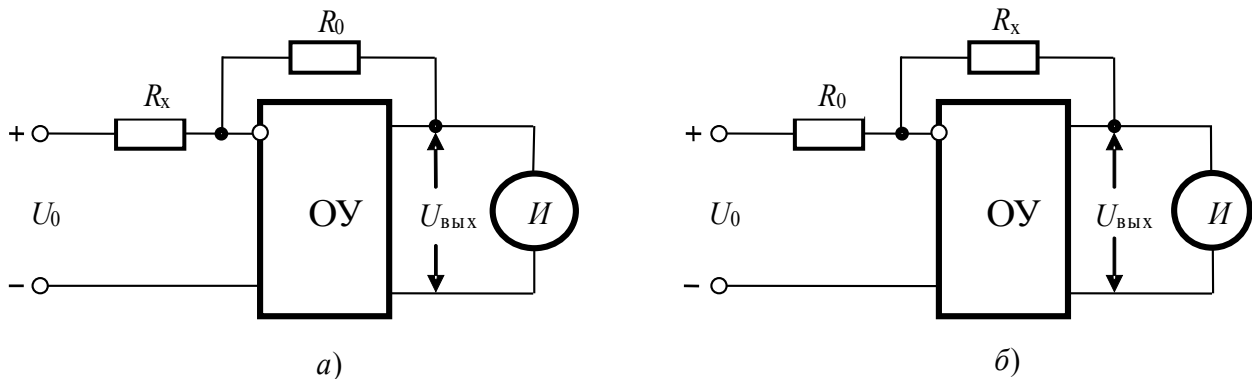


Рис. 4.3. Схемы электронных омметров на ОУ с ООС

В первом случае отношение  $R_{i\dot{a}\delta} / U_{\dot{u}}$  является постоянной величиной, а измеряемое сопротивление  $R_x$  прямо пропорционально  $U_{\dot{a}\dot{u}\delta}$ , поэтому шкала прибора получается равномерной. Эта схема используется для измерения сопротивлений от единиц Ом до сотен МОм и находит применение в электронных измерителях сопротивлений.

К недостаткам электронных аналоговых омметров можно отнести сравнительно невысокую чувствительность и точность. Однако сочетание преобразователя величины сопротивления в пропорциональное ему напряжение, выполненного на ОУ по схеме (рис. 4.3, а), с цифровым вольтметром постоянного тока обеспечивает достаточно высокую точность измерения сопротивления.

В частности, подобная схема омметра использована в универсальном вольтметре типа ВК7-10, В7-16.

#### 4.1.4. Мостовой метод измерения параметров элементов

Очень широкое распространение при измерении параметров элементов цепей получили приборы, в которых применяются мостовые методы измерений.

Мостовые схемы обладают высокой чувствительностью, большой точностью, широким диапазоном измеряемых величин. Подобные схемы дают возможность создать приборы, предназначенные как для измерения одной какой-либо величины, так и универсальные приборы, измеряющие многие параметры электрических цепей. Такие приборы используют и ручное уравновешивание (например, универсальный мост типа Е7-11) и автоматическое с цифровым отсчётом (Е7-12).

Для измерения сопротивлений применяются как мосты постоянного тока, так и мосты переменного тока, а для измерения ёмкости и индуктивности только мосты переменного тока.

В самом общем случае мостовая схема может быть представлена в виде 4-х последовательно включённых комплексных сопротивлений —  $Z_1$ ,

$Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$ , которые образуют четырёхполюсник, к двум зажимам которого (диагональ питания) подключается источник питания, а к двум другим (диагональ измерения) – индикатор равновесия. Ветви, включающие в себя эти сопротивления, называются плечами моста.

Условие равновесия моста записываются в комплексной форме как равенство произведений сопротивлений противоположных плеч.

Ниже (рис. 4.4) приведена схема одинарного четырёхплечего моста.

Его условие равновесия

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3.$$

Если в одном плече моста включено известное сопротивление (например,  $Z_1 = Z_x$ ), то можно записать выражение

$$Z_x = Z_1 = Z_1 \cdot Z_3 / Z_4.$$

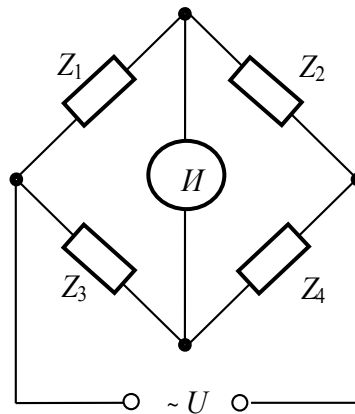


Рис. 4.4. Схема одинарного четырёхплечего моста

В качестве индикатора равновесия используются магнитоэлектрические приборы (в мостах постоянного, непосредственно, и переменного, с детектором, тока) и осциллографические индикаторы (в мостах переменного тока).

#### 4.1.5 Мосты постоянного тока.

Применяются для измерения величины активных сопротивлений. В таком мосте комплексные сопротивления можно заменить активными сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соответственно. Условие равновесия моста в этом случае примет вид

$$R_1 R_2 = R_3 R_4.$$

При включении измеряемого сопротивления  $R_x$  в первое плечо моста,

его величина определяется выражением

$$R_x = R_1 = R_2 R_3 / R_4 .$$

Это выражение называется рабочей формулой моста.

Таким образом, неизвестное сопротивление определяется методом сравнения с образцовыми сопротивлениями  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , из которых одно или несколько должны быть переменными.

Плечо  $R_2$  называется плечом сравнения, а отношение сопротивлений плеч  $R_3/R_4$  называется плечами отношений.

Обычно применяются уравновешенные мосты, при этом измеряемая величина определяется при значении тока измерительной диагонали  $I_{\text{н}} = 0$ .

Одинарные четырёхплечие мосты применяются для измерения сопротивлений величиной от десятков Ом до МОм, так как при измерении малых сопротивлений возникают погрешности, обусловленные сопротивлениями соединительных проводов и переходными сопротивлениями контактов.

#### 4.1.6 Мосты переменного тока.

Для измерения ёмкости, индуктивности, тангенса диэлектрических потерь  $\epsilon \delta$  и  $Q$  используются мосты переменного тока. Наиболее часто применяются одинарные четырёхплечие мосты, условие равновесия которых было приведено выше.

Сопротивления плеч представляют собой комплексные сопротивления

$$Z_i = R_i + jX_i = Ze^{j\varphi} ,$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , а  $\varphi = \arctg (X / R)$ .

Учитывая это можно записать уравнение равновесия моста

$$Z_1 e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 e^{j\varphi_4} = Z_2 e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 e^{j\varphi_3} .$$

Это равенство разделяется на два, которые должны выполняться одновременно

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \text{ и } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 .$$

Таким образом, равновесие моста достигается при равенстве произведений модулей и равенстве сумм аргументов плеч (то есть их фазовых углов) сопротивлений плеч.

Если сопротивления трёх плеч моста известны, то легко найти сопротивление четвёртого плеча моста. В большинстве мостов переменного тока два плеча представляют собой образцовые резисторы. А два остальные –

комплексные сопротивления, одно из которых образцовое. По месту расположения неизвестного  $Z_x$  и образцового  $Z_{\text{из}}$  сопротивлений мосты делятся на две группы – мосты отношения плеч и мосты произведения плеч:

1. Если  $Z_x$  и  $R_0$  расположены в смежных плечах, то условие равновесия моста будет иметь вид

$$Z_x \cdot R_4 = Z_0 \cdot R_2, \text{ или } Z_x = Z_0 R_2 / R_4 .$$

Такой мост носит название моста отношения плеч.

2. Если же  $Z_x$  и  $Z_0$  расположены в противоположных плечах, то условие равновесия моста будет иметь вид

$$Z_x \cdot Z_0 = R_2 \cdot R_3, \text{ отсюда } Z_x = R_2 R_3 .$$

Такой мост называется мостом произведения плеч.

Из этих выражений видно, что в мостах отношения плеч реактивные составляющие  $Z_x$  и  $Z_0$  должны иметь одинаковый знак, то есть это либо две индуктивности, либо две ёмкости. В мостах же произведения плеч  $Z_x$  и  $Z_0$  должны иметь противоположные знаки, то есть если  $Z_x$  ёмкость, то  $Z_0$  – индуктивность и наоборот.

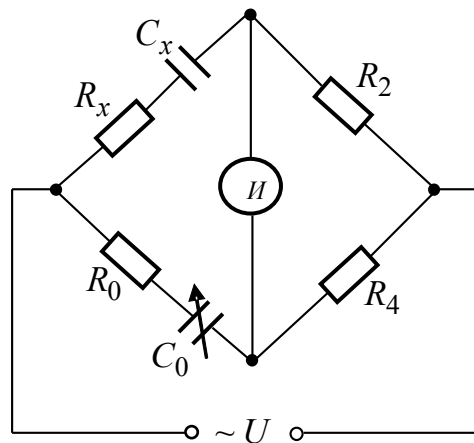


Рис. 4.5. Схема моста для измерения параметров конденсаторов

Следовательно, схема моста для измерения параметров ёмкостей будет иметь вид, приведённый на рис. 4.5 (в случае применения эталонной ёмкости).

Условие равновесия моста будет иметь вид

$$(R_x + 1/j\omega C_x)R_4 = (R_0 + 1/j\omega C_0)R_0$$

или

$$R_x R_4 + R_4 / j\omega C_x = R_0 R_2 + R_2 / j\omega C_0 .$$

Приравняв отдельно вещественные и мнимые слагаемые, получим два условия равновесия

$$R_x R_4 = R_2 R_0, \text{ или } R_x = R_2 R_0 / R_4 , \\ \tilde{N}_x R_2 = \tilde{N}_0 R_x, \tilde{N} \cdot \tilde{N}_x = \tilde{N}_0 R_4 / R_2 .$$

Тангенс угла потерь для конденсаторов с последовательной схемой замещения определяется следующим выражением

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_0 \omega \tilde{N}_0 .$$

Для параллельной схемы замещения

$$\operatorname{tg} \delta_x = 1 / \omega R_0 \tilde{N}_0 .$$

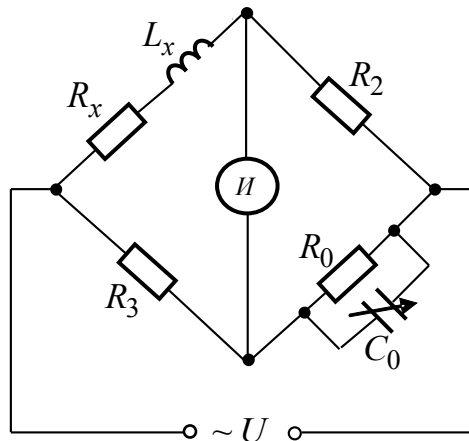


Рис. 4.6. Схема моста для измерения параметров индуктивностей

Мост для измерения параметров индуктивностей (рис. 4.6) содержит переменный конденсатор  $\tilde{N}_0$ , с помощью которого достигается его уравнивание. Условия равновесия моста:

$$R_\delta + j\omega L_\delta = \frac{R_2 R_3 (1 + j\omega C_0 R_0)}{R_0} .$$

Отсюда

$$R_x R_0 + j\omega L_x R_0 = R_2 R_3 + j\omega C_0 R_0 R_2 R_3 .$$

В результате преобразований получим:

$$L_x = C_0 R_2 R_3; R_x = R_2 R_3 / R_0; Q_x = \omega L_x / R_x = \omega R_0 C_0.$$

Параллельное соединение  $R_0$  и  $C_0$  в эталонном плече мостовой схеме для измерения параметров индуктивностей используется для измерения параметров катушек с низкой добротностью ( $Q < 30$ ). Для катушек с высокой добротностью ( $Q > 30$ ) используется последовательное соединение  $R_0$  и  $C_0$  в эталонном плече.

#### 4.1.7. Резонансный метод

Резонансные методы основаны на использовании физических явлений в колебательных контурах и LC – генераторах. Эти методы могут быть разделены на контурные и генераторные.

В резонансных контурах и генераторах существуют определённые зависимости между ёмкостью, индуктивностью и частотой, а также между активными параметрами контуров и соответствующими токами и напряжениями.

Использование этих зависимостей позволяет измерять различные параметры элементов контура.

Резонансные методы для измерения величин  $L$  и  $C$  применяются только в области высоких частот, так как на низких частотах резонансные явления выражены менее резко, в результате чего точность измерений недостаточна.

#### 4.1.8. Генераторный метод.

В основе генераторного метода лежит зависимость частоты напряжения генератора от значений ёмкости и индуктивности компонентов его колебательного контура. Если включать в контур конденсатор неизвестной ёмкости или катушку неизвестной индуктивности, то, зная резонансную частоту контура, можно определить значения этих величин. Наибольшей точности можно достигнуть при нулевом методе измерений (рис. 4.7).

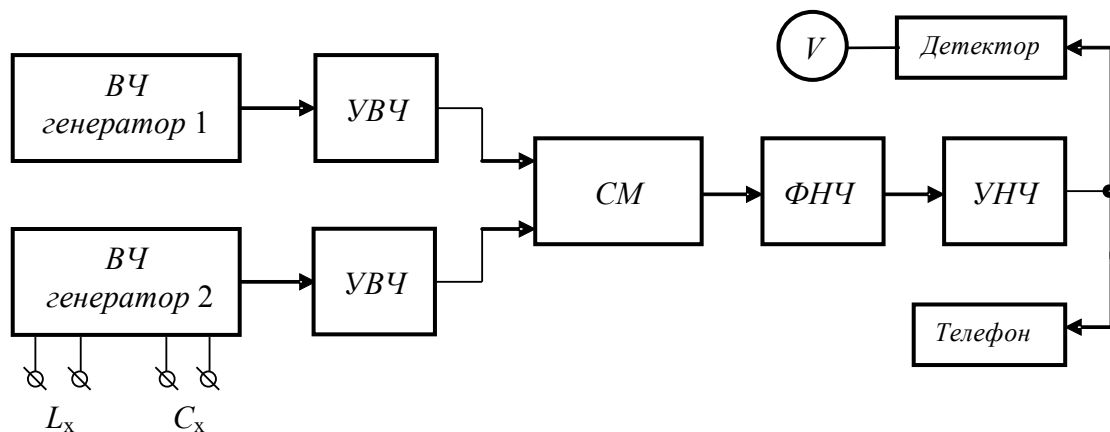


Рис. 4.7. Структурная схема генераторного измерителя параметров  $L$  и  $C$



ВЧ – высокочастотный; УВЧ – усилитель высокой частоты;  
СМ – смеситель; ФНЧ – фильтр низкой частоты; V – вольтметр

Высокочастотные генераторы 1 и 2 собраны по одинаковой схеме. В контур первого генератора включены два образцовых конденсатора переменной ёмкости, причём значения их ёмкостей отличаются друг от друга в 100 раз (например, 10 пФ и 1000 пФ); в контур второго генератора последовательно с его катушкой индуктивности, значение которой может изменяться, включается измеряемая катушка индуктивности (зажим  $L_x$ ).

При измерении ёмкости зажимы  $L_x$  замыкаются накоротко, а измеряемый конденсатор включается параллельно контуру второго генератора (зажим  $C_x$ ). До подключения измеряемой ёмкости  $C_x$  оба генератора (1 и 2) настраиваются на одинаковую частоту. Момент равенства частот фиксируется по нулевым биениям, для получения которых в схеме предусмотрены смеситель (СМ) и фильтр нижних частот (ФНЧ). Усиленное напряжение разностной частоты (нулевых биений) индицируется с помощью телефона и аналогового вольтметра ( $V$ ).

После включения конденсатора измеряемой ёмкости в контур ВЧ генератора 2 частота его напряжения изменяется и становится не равной частоте генератора 1. Перестройкой частоты генератора 1 с помощью образцового конденсатора  $C_0$  вновь добиваются равенства частот обоих генераторов, то есть нулевых биений. Если индуктивности в контурах обоих генераторов равны, тогда измеряемая ёмкость будет равна изменению ёмкости образцового конденсатора. Обычно при начальной настройке генератора образцовые конденсаторы устанавливаются на условный нуль. Тогда при вторичном получении нулевых биений измеряемое значение ёмкости будет равно отсчёту по шкалам образцовых конденсаторов, а точнее сумме значений ёмкостей на этих шкалах.

## 4.2. Лабораторное задание

### 4.2.1. Схемы измерений

На рис. 4.8 представлена схемы измерений величин  $R$ ,  $L$  и  $C$ .

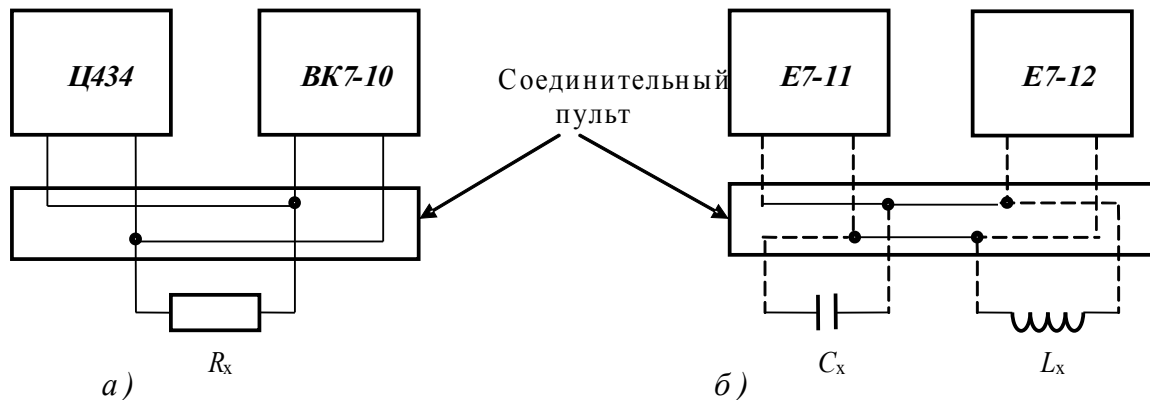


Рис. 4.8, а – схема измерения  $R$ , б – схема измерения  $L$  и  $C$

#### 4.2.2. Измерение величины сопротивлений резисторов.

1. Включить в сеть универсальный цифровой вольтметр В7-46, измеритель иммитанса Е7-21 и дать им прогреться в течение 5-10 минут.

2. Согласно схеме (рис. 8, а) подключить мультиметры Ц4315 и АРРА-91 к соединительному пульту.

3. Установить на обоих приборах соответствующими переключателями вид измерений – измерение сопротивлений.

4. Произвести установку «0» (Ц4315) и тестирование (В7-46) согласно инструкции по эксплуатации.

Произвести измерение указанными приборами величины сопротивления резисторов, предоставленных для этих целей преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу.

#### 4.2.3. Измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности

1. Согласно схеме (рис. 8, б) подключить универсальный мост Е7-12 к соединительному пульту с помощью штатного кабеля.

2. Установить на Е7-12 органы управления в положение, соответствующее измерению ёмкости и в соответствии с инструкцией по эксплуатации произвести измерение величины ёмкости и  $tg\delta$  5-ти конденсаторов, предоставленных преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу.

3. Установить на Е7-12 органы управления в положение, соответствующее измерению индуктивности и в соответствии с инструкцией по эксплуатации произвести измерения величин индуктивности и добротности катушек индуктивности, предоставленных преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу.

4. Согласно структурной схеме (рис. 8, б) подключить высокочастотный измеритель параметров конденсаторов и индуктивностей Е7-21 к соединительному пульту с помощью штатного кабеля.

5. Установить на Е7-21 органы управления в положение, соответствующее измерению ёмкости и в соответствии с инструкцией по эксплуатации произвести измерение величины ёмкости конденсаторов, предоставленных преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу.

6. Установить на Е7-12 органы управления в положение, соответствующее измерению индуктивности и в соответствии с инструкцией по эксплуатации произвести измерение величины индуктивности катушек индуктивностей, предоставленных преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу.

#### 4.2.4. Методические указания

1. Все измерения универсальным мостом проводить на частоте 1000 Гц.

2. В процессе измерений сопротивлений резисторов прибором Ц4315 производить установку «0» омметра при каждом изменении предела измерений.

3. При выборе пределов измерений омметра Ц4315 необходимо делать это таким образом, чтобы показания прибора находились (по возможности) в первой половине шкалы омметра (в области наибольшей разрешающей способности прибора).

4. При выборе пределов измерений омметра универсального вольтметра В7-46 необходимо следить за тем, чтобы показания индикатора прибора находились (по возможности) во второй половине значений предела измерений.

#### 4.2.5. Обработка результатов измерений

1. Результаты измерений величин сопротивлений резисторов, ёмкости и  $\operatorname{tg} \delta$  конденсаторов, индуктивности и  $Q$  катушек индуктивности следует представить в виде таблиц.

2. Соответствующий результат заносить в таблицу с учётом погрешности соответствующего измерительного прибора в точке измерения.

3. Величины погрешностей необходимо взять из паспортных данных измерительных приборов (величины погрешностей Ц4315 указаны на шкале стрелочного индикатора прибора).

### 4.3. Требования к отчету

Отчёт должен содержать:

1. Схемы измерений параметров  $R$ ,  $C$  и  $L$ .
2. Таблицы результатов измерений.
3. Схему измерительного моста для измерения величины ёмкости и  $\operatorname{tg} \delta$  конденсаторов.

4. Схему измерительного моста для измерения величин индуктивности и  $Q$  катушек индуктивности.
5. Структурную схему высокочастотного измерителя параметров  $L$  и  $C$ .

#### 4.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы измерений параметров элементов цепей ( $R, C, L$ ) с сосредоточенными параметрами?
2. Дать определение абсолютной, относительной, приведённой погрешностей измерительного прибора, а также определение его основной и дополнительной погрешностей.
3. Объяснить принцип работы универсального моста для измерения параметров  $R, C$  и  $L$ .
4. Объяснить принцип работы омметра аналогового мультиметра (тестера).
5. Объяснить принцип работы омметра цифрового мультиметра на примере прибора В7-46.

### 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ОЦЕНОК ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ”

Цель работы: по результатам многократных отсчетов некоторой измеренной величины методом максимума функции правдоподобия определить (вычислить) эффективную оценку результата измерения, а также ее среднеквадратическое значение погрешности.

#### 5.1. Исходные данные

Отчеты результатов измерений находятся путем моделирования на ЭВМ.

Отсчет  $x_i$  состоит из двух слагаемых:

$$x_i = X_0 + \Delta_1 + \Delta_2, \quad (5.1)$$

где  $X_0$  – истинное значение измеряемой величины;  $\Delta_1, \Delta_2$  – составляющие погрешности измерения распределенные (варианты 1-13) по равномерному закону:  $\Delta_1$  в интервале  $(-1;+1)$ ,  $\Delta_2$  –  $(-a;+a)$ . Погрешности  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – некоррелированы.

Значения  $X_0$  и  $a$  в зависимости от варианта приведены в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Исходные данные для вариантов 1-13

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$X_0$	28	15	20	12	16	25	17	11	9	24	25	13	14
$a$	0.01	0.06	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.55	0.8	0.65

Справка: плотность распределения вероятности суммарной погрешности  $\Delta$  соответствует графику, приведенному на рис. 5.1.

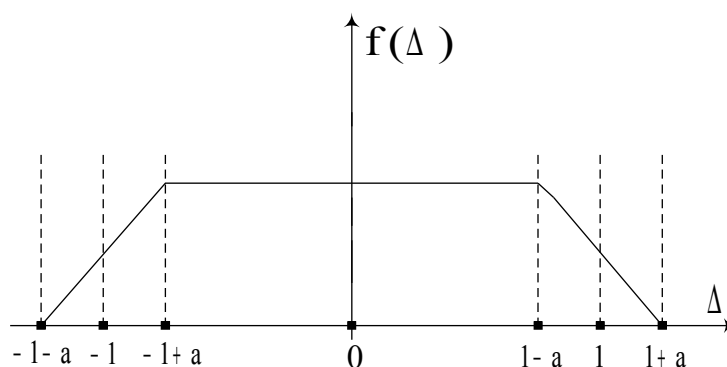


Рис. 5.1

Для вариантов 14-25: составляющая погрешности  $\Delta_1$  имеет нормальное распределение с математическим ожиданием  $m_x=0$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , составляющая  $\Delta_2$  имеет равномерное распределение в интервале от  $-1$  до  $+1$ .

Справка: плотность распределения суммарной погрешности определяется выражением [10]:

$$f(\Delta) = \frac{1}{2} \cdot \left[ \Phi\left(\frac{1-\Delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-1-\Delta}{\sigma}\right) \right], \quad (5.2)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$  - интеграл вероятности

Значения  $X_0$  и  $\sigma$  в зависимости от варианта приведены в табл. 5.2.

Табл. 5.2. Исходные данные для вариантов 14-25

№ варианта	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$X_0$	10	8	15	12	9	11	10	16,5	7,5	12,5	10,2	15
$\sigma$	0,01	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,05	0,15	0,25	0,05	0,06	0,03

## 5.2. Порядок выполнения работы.

1. Сформировать 100 значений отсчетов  $X$  в соответствии с (1) и записать в память ЭВМ.

2. Последовательно, задаваясь различными оценками результата измерения в пределах от  $X_0 - 1$  до  $X_0 + 1$ , с шагом 0,01, найти максимум функции правдоподобия. Значение оценки результата измерения, соответствующее максимуму функции правдоподобия, принять в качестве эффективной оценки.
3. Разность между полученной эффективной оценкой и  $X_0$  соответствует погрешности оценки.
4. Повторяя п.п. 1-3  $Z$  раз, найти среднеквадратическое значение погрешности оценки, где  $Z=50 \div 100$ .

### 5.3. Выводы по лабораторной работе

Сделать сравнение погрешности эффективной оценки с погрешностью оценок, полученных как среднее арифметическое:

$$\tilde{a} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i,$$

центр рассеяния:

$$\tilde{a}_{\text{цр}} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2},$$

и медианной оценки:

$$a_{\text{м}} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2}, & \text{если } n \text{ нечет} \\ \frac{x_n}{2}, & \text{если } n \text{ четно} \end{cases}$$

Определить наиболее эффективную среди полученных оценок.

### 5.4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. Блок-схему алгоритма разработанной программы моделирования;
2. График результатов измерений, сформированных в п.1 с определением среднего значения и СКП по графику;
3. График функции правдоподобия по п.2.
4. Результаты вычисления среднеквадратической погрешности эффективной оценки  $\sigma(a_{\text{эфф}})$ , а также погрешностей оценок среднего арифметического, медианной, и центра рассеяния по п.3.
5. Выводы по полученным результатам.

### 5.5. Методические указания

Интеграл вероятности может быть вычислен с использованием ряда:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{x^{2n+1}}{2^n \cdot n! \cdot (2n+1)} + 0.5.$$

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ. Программы моделирования разрабатываются самостоятельно в любой среде программирования.

### 5.6 Контрольные вопросы

1. Перечислите основные требования, предъявляемые к статистическим оценкам, поясните смысл этих требований.
2. Для чего используется метод максимума функции правдоподобия?
3. Дайте определение функции правдоподобия.
4. Выведите выражение для эффективной оценки истинного значения измеряемой величины, при нормальном законе распределения погрешности измерений, используя метод максимального правдоподобия.
5. Выведите выражение для эффективной оценки истинного значения измеряемой величины, при равномерном законе распределения погрешности измерений, используя метод максимального правдоподобия.
6. Выведите выражение для оценки среднеквадратической погрешности исходных данных при нормальном законе распределения погрешностей многократных измерений.

## 6. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.

При выполнении лабораторных работ предусматривается следующий регламент.

1. Первоначально студенту требуется ознакомиться с целью работы. Используя, приведенные основные обозначения, расчетные формулы и обозначения выполнить все пункты домашнего задания (самостоятельная работа).

1.1. Ознакомиться с содержанием предстоящей лабораторной работы и вопросами, предшествующий этой работе, по настоящему лабораторному практикуму. При этом следует уяснить цель и объем эксперимента и выделить теоретические положения, знание которых необходимо как для выполнения лабораторной работы, так и для понимания лабораторных наблюдений.

1.2 Пользуясь конспектом лекций и рекомендованной литературой, следует усвоить основные теоретические сведения, методику и технику измерений, которые необходимо выполнить в данной работе. При этом рекомендуется обратить внимание на допущения и упрощения, которые были приняты при теоретическом рассмотрении соответствующих процессов, явлений, характеристик и т.п. Это поможет понять возможные расхождения с теорией результатов проводимых в лаборатории экспериментов.

1.3. Продумать условия проведения лабораторного эксперимента в соответствии с описанием: наличие готовой лабораторной установки или необходимость ее сборки, предписанные пределы изменения тех или иных параметров, ожидаемые пределы изменения наблюдаемых в эксперименте величин и т.д.

1.4. Детально изучить схему лабораторной установки, приведенную в описании. При этом надо обратить внимание на аппаратуру, которая будет использована во время работы, правила ее эксплуатации. (Непонятные вопросы выяснить у преподавателя накануне занятия).

1.5. Продумать методику лабораторного эксперимента на основании «хода работы», представленного в пособии по лабораторным работам. При этом необходимо обратить внимание на последовательность операции в эксперименте, на последовательность необходимых наблюдений и на подлежащие фиксации результаты эксперимента.

1.6. Мысленно "провести" лабораторный эксперимент, полагая, что от начала и до конца надо самому производить все необходимые операции и наблюдения.

1.7. Прodelать технические расчеты и построить графики согласно домашнему заданию.

1.8. Заготовить бланк лабораторного отчета. В этом бланке надо записать наименование, цель и краткое содержание работы, начертить схему лабораторной установки и привести необходимые предварительные данные в соответствии с заданием на лабораторную работу. Кроме того, в бланке надо заготовить соответствующие таблицы для записи протокола лабораторного эксперимента. Форму таблиц для протокола целесообразно заготовить с некоторым запасом: если, например, для построения некоторой исследуемой характеристики требуется до десяти точек, предусмотрите в таблице место для записи результатов не десяти, а двадцати измерений. Это нужно, во-первых, потому, что некоторые измерения могут оказаться ошибочными и их придется повторить. Во-вторых, по ходу эксперимента или построения графика исследуемой характеристики может потребоваться снятие дополнительных точек, например, в области экстремальных значений характеристик или за пределами исследуемого диапазона.

1.9. Подготовить ответы на вопросы, по основным обозначениям, расчетным формулам и обозначениям, приведенным к данной работе.

1.10. Для подготовки к получению разрешения – «допуска» к выполнению лабораторной работы необходимо оформить краткий конспект, где отметить для себя цель работы, основные теоретические данные, схему измерительной установки и кратко законспектировать ответы на вопросы, указанные в пособии. Предполагается, что во время получения «допуска» при ответах на вопросы преподавателя студенты могут пользоваться этими конспектами. Использование других источников во время получения «допуска» запрещается.



1.11. Записать вопросы, которые остались не понятыми в ходе подготовки.

Подготовку к лабораторным занятиям студент может считать законченной, если он имеет ясное представление о том, что делать, как делать и что он ожидает получить в результате эксперимента.

2. Преподаватель, проверив выполнение домашнего задания и знание целей проведения работы студентом, дает «допуск» на выполнение лабораторной работы. Студент, показавший на «допуске» недостаточные знания, к выполнению данной лабораторной работы не допускается. Остальные студенты получают допуск к работе, проходят краткий инструктаж по работе с установкой, получают задание на лабораторную работу и непосредственно приступают к ее выполнению. В то время как они выполняют лабораторную работу, неуспевающим студентам предоставляется возможность здесь же в лаборатории восполнить недостаток своих знаний и подготовиться к повторному получению «допуска» в установленное преподавателем время.

3. Студенты приступают к выполнению работы. Для выполнения лабораторной работы преподавателю следует довести до студентов следующую информацию:

3.1. Приступая к работе, в составе своей команды (3-4 человека) обсудить цель и содержание лабораторного эксперимента.

3.2. Если лабораторная установка подлежит сборке, следует собрать ее коллективно. Это не означает, что три человека должны подключать один прибор. Но если первый студент подключает один прибор, то другие студенты должны подключать следующие приборы. При этом пока один студент подключает прибор, остальные члены команды должны контролировать его действия. После сборки лабораторной установки следует получить у преподавателя или лаборанта разрешение на ее включение.

3.3. Коллективно «проиграть» эксперимент до включения лабораторной установки.

3.4. Распределить между членами команды обязанности по выполнению эксперимента. При этом недопустимо выделять кого-либо из студентов для пассивной записи результатов наблюдений. Все члены команды должны по возможности работать непосредственно с приборами.

3.5. Вне зависимости от распределения обязанностей между членами команды лабораторный эксперимент должен выполняться коллективно. Это означает, что каждое действие каждого студента должно контролироваться остальными членами бригады. При этом результаты осмысленных по ходу эксперимента наблюдений должны заноситься каждым студентом в свой протокол. Протокол лабораторного эксперимента следует вести начисто. Если некоторое измерение оказалось ошибочным, не пачкайте протокол, вычеркивая записанные неверные цифры, а сделайте в графе примечаний пометку, анну-

лирующую неверную запись. При этом полезно разобраться в причинах ошибки, отметив заслуживающие внимания причины в графе примечаний. Сами же ошибки и их причины не забудьте обсудить коллективно перед записью в протокол.

3.6. Как можно тщательнее выполнить все измерения, положенные по ходу лабораторной работы. Одновременно с записью показания рекомендуется наносить на график наиболее характерные точки исследуемой характеристики. Это погложет сразу представить вид характеристики, определить необходимое количество точек и интервалы между ними. На участках резких изменений показаний их следует снимать чаще. Если экспериментально снятые точки исследуемой характеристики не укладываются на плавную кривую из-за ошибок наблюдения или из-за невозможности сохранить неизменными условия работы, нужно соединять их не ломанной линией, а проводить по ним кривую, соответствующую усредненным значениям измеряемой величины. Если какая-либо из точек выпадает, то при построении кривых ее можно не учитывать, но она должна быть ясно нанесена на график и специально оговорена в отчете.

3.7. Обработать результаты эксперимента, произведя (при необходимости) дополнительные измерения, недостающие для точного построения графика. Не исключено также, что при обработке результатов эксперимента выявится ошибочность некоторых наблюдений, которые придется повторить.

3.8. Коллективно обсудить результаты проведенного эксперимента.

3.9. Каждую экспериментально снятую характеристику сравнить с теоретически рассчитанной характеристикой (в том случае, когда расчет производился на стадии домашней подготовки к выполнению лабораторной работы). При обнаружении значительных расхождений в ходе этих кривых постараться самостоятельно выяснить причины этих расхождений, изложив свои соображения. Причины расхождений должны быть проанализированы с учетом погрешности измерений и точности самой теории. В случае затруднения следует незамедлительно обращаться за помощью к преподавателю.

3.10. По окончании работы отключить установку от источников питания и, если это необходимо, аккуратно разобрать.

Студент, совершив необходимые измерения в соответствии с лабораторным заданием, предоставляет преподавателю полученные результаты, описанные в виде таблиц и записанных данных для дальнейших расчетов.

4. Преподаватель ставит в журнале отметку о проделанной студентом работе при полном соответствии необходимых результатов с полученными и оформленными студентами в ходе работы (аудиторные занятия).

5. Ознакомившись с требованиями содержания отчета по работе, студент оформляет отчет, заносит результаты домашних расчетов и данные практической работы (самостоятельная работа). В отношении оформления отчета стоит отметить следующее. Отчет оформляется в электронном виде один на всю команду. В отчете должны быть отражены цели и задачи работы, схема

измерительной установки, ход работы, результаты работы и выводы. Каждый из разделов должен содержать заголовок, набранный жирным шрифтом. Раздел «Ход работы» следует сопровождать необходимыми комментариями.

При составлении отчета рекомендуется:

5.1. Сосредоточить основное внимание на анализе полученных зависимостей, их объяснении и практических выводах. Выводы по лабораторному эксперименту необходимо делать самостоятельно. В отчете можно отразить мнения всех членов команды. Разумеется, эти выводы не должны противоречить друг другу. В выводах можно выразить свои критические замечания по методам измерений и расчетам исследуемых зависимостей и величин.

5.2. Не загромождать отчет многочисленными таблицами и пояснениями, взятыми из учебника. Указать, что исследовалось, метод измерения, метод расчета, привести сопоставление результатов расчета и эксперимента в виде графиков.

5.3. В отчеты по работам, включающим теоретические расчеты, вписывают необходимые расчеты по формулам с указанием размерности всех входящих в используемую формулу физических величин. По каждой из формул числовой расчет должен быть произведен отдельно, остальные результаты расчета, если это необходимо, заносятся в таблицу в окончательном виде.

5.4. Теоретически рассчитанные графики при сравнении их с экспериментальными оформляют либо другим цветом, либо тем же цветом, что и экспериментальный график, но линией другого типа (пунктир, штрих-пунктир, двойной штрих-пунктир и т.д.).

5.5. Отчет должен заканчиваться сводкой результатов работы, оформленной в разделе «Результаты работы», и краткими выводами по проделанной работе, оформленными в одноименном разделе.

Отчет по лабораторной работе засчитывается при правильном оформлении отчета, удовлетворительных результатах работы и грамотно сделанных выводах.

6. При подготовке к «защите» лабораторной работы студент проверяет свои знания, отвечая на контрольные вопросы по работе, используя предлагаемую литературу (самостоятельная работа).

7. Преподаватель проверяет порядок и правильность выполнения отчета, задает необходимые вопросы по теме, возникающие у преподавателя при оценке отчета и работы в целом, и, если содержание отчета и ответы достаточны, ставит «защиту» лабораторной работы студенту.

К выполнению новой работы в лаборатории студент может приступить только после сдачи отчета по выполненной ранее лабораторной работе.

Литература для подготовки к «защите» лабораторных работ, а также для выполнения домашнего задания к работам, приведена в таблице 4.4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном учебном пособии по циклу лабораторных работ по дисциплине «Метрология и радиоизмерения» приведены теоретические сведения и методические указания к выполнению лабораторных работ по темам «Измерение временных интервалов», «Исследование цифрового метода измерения частоты и характеристик измерительных генераторов», «Измерение напряжений постоянного и переменного токов», «Измерение параметров элементов электрических цепей с сосредоточенными параметрами», «Моделирование эффективных оценок при статистической обработке результатов измерения».

Выполнение указанных лабораторных работ обеспечивает формирование у студентов навыков работы с электрорадиоизмерительными приборами, а также обработки полученных результатов измерений, в том числе и статистической, состоящей в определении погрешностей результатов и проверки статистических гипотез о законах распределения погрешностей измеряемых параметров. Кроме того, в процессе подготовки, выполнения и защиты, приведенных в данном пособии лабораторных работ, закрепляются теоретические сведения, полученные студентами на лекционных занятиях и при самостоятельной работе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алёшечкин А.М., Кокорин В.И. Методы измерения частотно–временных параметров сигналов. Красноярск: Изд-во КГТУ. 2001. 96 с.
2. Статистическая теория погрешностей. Методы описания погрешностей: Методические указания по выполнению лабораторных работ и дипломных проектов для студентов специальности 2301 – "Радиотехника"/ Сост. М.К. Чмых; КрПИ. Красноярск, 1993. 36 с.
3. Статистическая теория погрешностей. Методы статистической обработки: Методические указания по выполнению лабораторных работ и дипломных проектов для студентов специальности 2301 – "Радиотехника"/ Сост. М.К. Чмых; КрПИ. Красноярск, 1993. 36 с.
4. Атамалян Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Высшая школа, 1982.
5. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Мирский Г.Я. Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1987.
7. Дворяшин Б. В., Кузнецов Л. И. Радиотехнические измерения. М.: Сов. Радио, 1978.
8. Измерения в электронике: Справочник. Под. ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Мусонов В. М., Чижиков В. А. Электрорадиоизмерения. СибГАУ, Красноярск, 2005.

10. Венцель, Е.С. Теория вероятностей.: Учеб. для вузов. – 7-е изд. Стер. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.: ил. С. 23-230, 286-306.