

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

**С.И. Герасимов, Е.А. Долгачёва, И.Н. Желбаков,
К.А. Иваненко, А.Н. Серов, Д.А. Чумаченко**

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Практикум

по курсам «Метрология», «Метрология и информационно-измерительная техника»,
«Метрология стандартизация и сертификация»
для студентов, обучающихся по направлениям:
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»,
12.03.01 «Приборостроение»,
27.03.04 «Управление в технических системах».

Москва
Издательство МЭИ
2021

УДК 389
ББК 30.10
Д 444

Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ» в качестве учебного издания

Подготовлено на кафедре диагностических информационных технологий

Рецензенты: докт. техн. наук, с.н.с.. В.Ю. Лебедев;
кандидат техн. наук, доц. Г.В. Антипов

Герасимов, С.И.

Измерение частоты и интервалов времени: практикум/С.И. Герасимов, Е.А. Долгачёва, И.Н. Желбаков, К.А. Иваненко, А.Н. Серов, Д.А. Чумаченко; под ред. С.И. Герасимова. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 54с.

ISBN

В настоящем практикуме рассмотрен цифровой время-импульсный метод измерения частоты и периода. Получены зависимости для оценки погрешности измерения частоты и периода в условиях синусоидальных и полигармонических входных сигналов. Выполнение экспериментальной части предполагает использование виртуального стенда, разработанного с применением программы LabView компании National Instruments. Экспериментальная часть предполагает измерение частоты и периода с помощью цифрового частотомера ЧЗ-75, анализ полученных погрешностей в случае прямых и косвенных измерений и практическое применение способов уменьшения систематических и случайных её компонент. Рассмотрено применение многократных измерений и оценка погрешности при таком подходе к выполнению измерений. В пакете имитационного моделирования Simulink разработаны модели частотомера ЧЗ-75 в режимах измерения частоты и периода. Пособие предназначено для студентов института информационных и вычислительных технологий (ИВТИ).

**УДК 389
ББК 30.10**

ISBN © Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЦИФРОВЫЕ ЧАСТОТОМЕРЫ	5
1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ	5
1.3. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДА	6
2. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ	9
2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ	9
2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДА	11
3. ОПИСАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА	13
4. ЗАДАНИЕ	16
5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	17
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РАБОЧИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТОМЕРА ЧЗ-75	25
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЧАСТОТОМЕРА ЧЗ-75	26
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ РЕЖИМОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА ЦИФРОВОГО ЧАСТОТОМЕРА ЧЗ-75	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	33
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ЧАСТОТОМЕРА В ПАКЕТЕ SIMULINK	44
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	52

Введение

В настоящее время измерение частоты является одной из наиболее популярных задач измерительной техники в области электрических измерений. Частота является одним из основных параметров электрических сетей. С точки зрения терминологии ГОСТ на средства измерения показателей качества электрической энергии, частота напряжения и тока является одним из основных показателей качества электрической энергии.

Большое количество интегральных параметров сигнала таких как среднее квадратическое значение, активная мощность, полная мощность, реактивная мощность, зависят от значения частоты измеряемого сигнала. Некоторые методы измерения требуют дополнительного измерения частоты сигнала. По этой причине точность измерения частоты влияет на точность измерения указанных параметров.

Погрешность измерения частоты напрямую связана с погрешностью измерения комплексных спектров детерминированных сигналов. Обеспечение измерения частоты с высокой точностью позволяет эффективно бороться с так называемым эффектом «растекания спектра» посредством подстройки числа отсчетов или применения преобразователей частоты дискретизации. Таким образом, точное измерение частоты сигнала позволяет с высокой точностью выполнять измерения спектра и, как следствие, других параметров сигнала (среднее квадратическое значение, активная мощность, полная мощность, реактивная мощность, несимметрию) которые могут быть косвенно получены по известному комплексному спектру сигнала.

В настоящее время растет доля цифровых измерительных устройств, в связи с чем большую актуальность приобретают цифровые методы и средства измерения частоты электрических сигналов.

Целью данного пособия является изучение время-импульсного цифрового метода измерения частоты и периода электрических сигналов, анализ источников возникающих погрешностей и особенностей практической реализации. Кроме того, работа с виртуальной моделью частотомера способствует закреплению теоретических знаний в области цифровых измерительных приборов частотно-временной группы и получение навыков практической работы с одним из них.

1. Цифровые частотомеры

1.1. Основные положения

Среди цифровых приборов частотно-временной группы электронно-счетные частотомеры (в дальнейшем цифровые частотомеры – ЦЧ) являются наиболее распространенными, что объясняется, их универсальностью, высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

В основу построения ЦЧ положены общие принципы, позволяющие реализовать ряд режимов работы прибора для измерения нескольких величин.

Функционально полные ЦЧ позволяют измерять следующие величины: частоту, период, отношение двух частот (иногда выраженное в процентах), длительность импульса или интервала времени, задаваемого пользователем; предусматриваются также режим счета событий (импульсов) и использование ЦЧ как источника сигналов с известными (калиброванными) частотами. Режимы работы задаются и выбираются положением ряда переключателей (механических или электронных) и других органов управления.

В более простых вариантах исполнения ЦЧ используются для измерения меньшего числа величин (например, одной или двух).

В любом режиме часть структуры ЦЧ остается неизменной и в ней происходит счет числа импульсов N_x , пропорционального измеряемой величине. Эти импульсы проходят через электронный ключ ЭК, находящийся в замкнутом состоянии, на счетчик импульсов СИ. Код числа, образующийся в СИ, поступает на цифровое отсчетное устройство ЦОУ. В состав ЦОУ входит многодекадный цифровой индикатор с перемещающейся запятой и, как правило, индикатор с обозначением единиц измерения.

Время замкнутого состояния ЭК, называемое временем счета T_c , определяется родом измеряемой величины, а его конкретное значение рядом соображений, о которых будет сказано ниже.

1.2. Измерение частоты

Структурная схема ЦЧ в этом режиме работы приведена на Рис. 1а. Напряжение измеряемой частоты f_x (Рис. 1б) подается на вход формирующего устройства (ФУ), назначение которого – формирование сигнала стандартной формы при достаточно произвольной форме входного сигнала. Обычно в состав ФУ входят усилитель-ограничитель, обеспечивающий заданную амплитуду своего выходного сигнала, и формирователь для обеспечения малой длительности фронта и среза

импульсов на выходе ФУ. Частота этих импульсов равна частоте входного сигнала (Рис. 1в). Эти импульсы проходят через ЭК на СИ в течение времени счета T_c , которое задается генератором опорной частоты ГОЧ и делителем частоты ДЧ. Частота ГОЧ стабилизирована кварцевым резонатором. Необходимое T_c выбирается переключателем ВРЕМЯ СЧЕТА. При каждом запуске прибора на выходе ДЧ появляется один импульс (Рис. 1в), под действием которого замыкается ЭК.

Число импульсов N_x , прошедшее на СИ, определяется формулой:

$$N_x = \frac{T_c}{T_x} = T_c \cdot f_x, \quad (1)$$

а значение измеряемой частоты:

$$f_x = \frac{N_x}{T_c}. \quad (2)$$

В Приложении 7 представлена имитационная модель частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения частоты, выполненная в пакете Simulink, и временные диаграммы её работы.

1.3. Измерение периода

Структура ЦЧ в этом режиме приведена на Рис. 2а. В этом режиме время замкнутого состояния ЭК задается периодом (или n периодами). Входной сигнал, период которого T_x измеряется (Рис. 2б) так же, как и при измерении частоты, подается на вход ФУ. Выходной сигнал ФУ (Рис. 2в) поступает на делитель частоты ДЧ (множитель периодов T_x). Число n (обычно n – это 1, 10, 10^2 , 10^3 или 10^4) выбирается переключателем ВРЕМЯ СЧЕТА, т.е., nT_x . При запуске на выходе ДЧ появляется импульс по длительности равный nT_x (Рис. 2г), в течение которого СИ подсчитывает прошедшие за это время импульсы с известным периодом следования $T_{\text{такт}}$ (Рис. 2д), называемые часто «метками времени».

Число импульсов и период, определяются формулами (3) и (4):

$$N_x = \frac{nT_x}{T_{\text{такт}}}, \quad (3)$$

$$T_x = \frac{N_x T_{\text{такт}}}{n}. \quad (4)$$

Известно, что частота f и период T связаны формулой $1 = f \cdot T$. Поэтому через прямое измерение одной из величин можно найти результат косвенного измерения другой.

В Приложении 7 представлена имитационная модель частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения периода, выполненная в пакете Simulink, и временные диаграммы её работы.

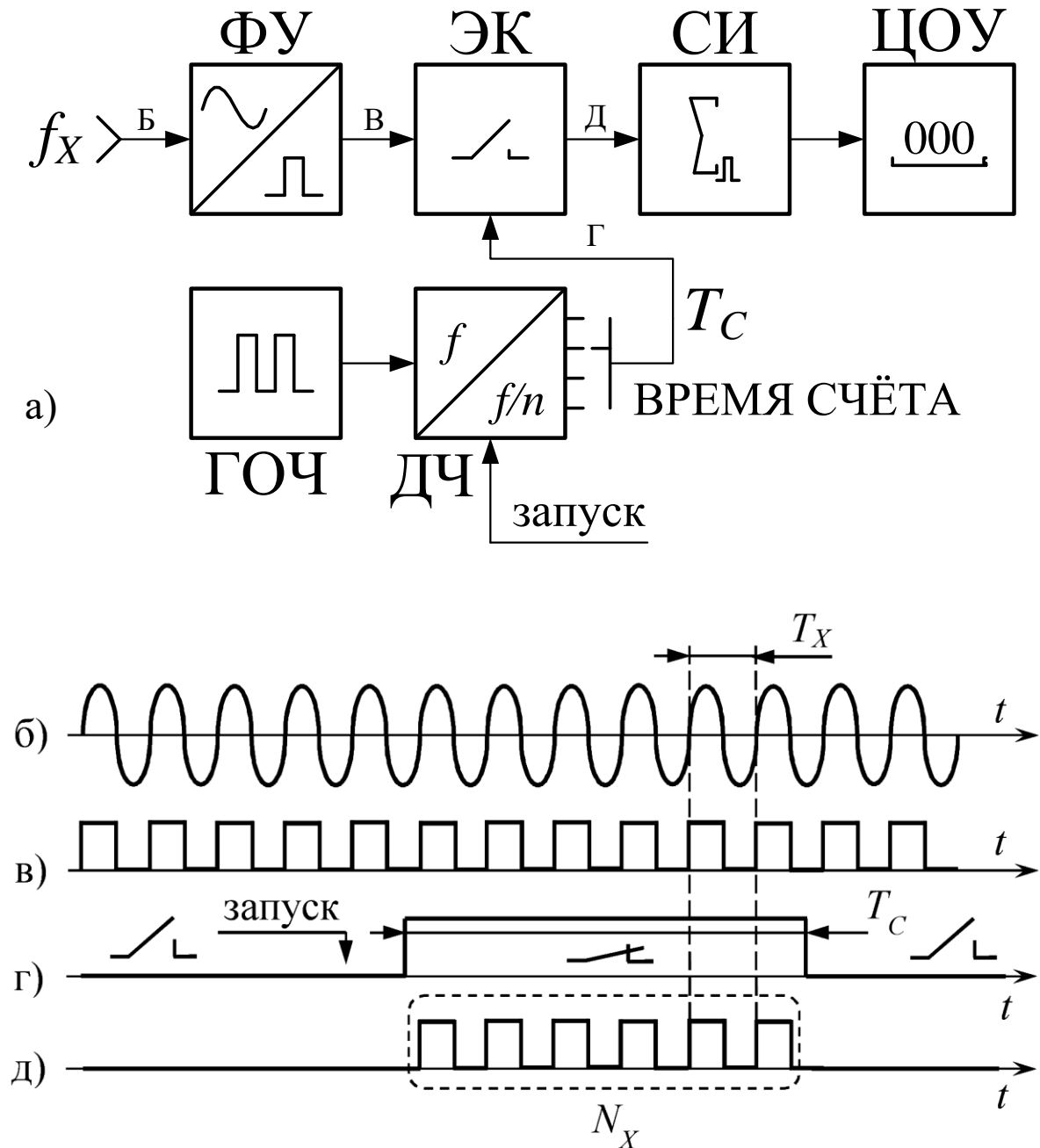


Рис. 1. Структурная схема ЦЧ в режиме измерения частоты и диаграммы сигналов

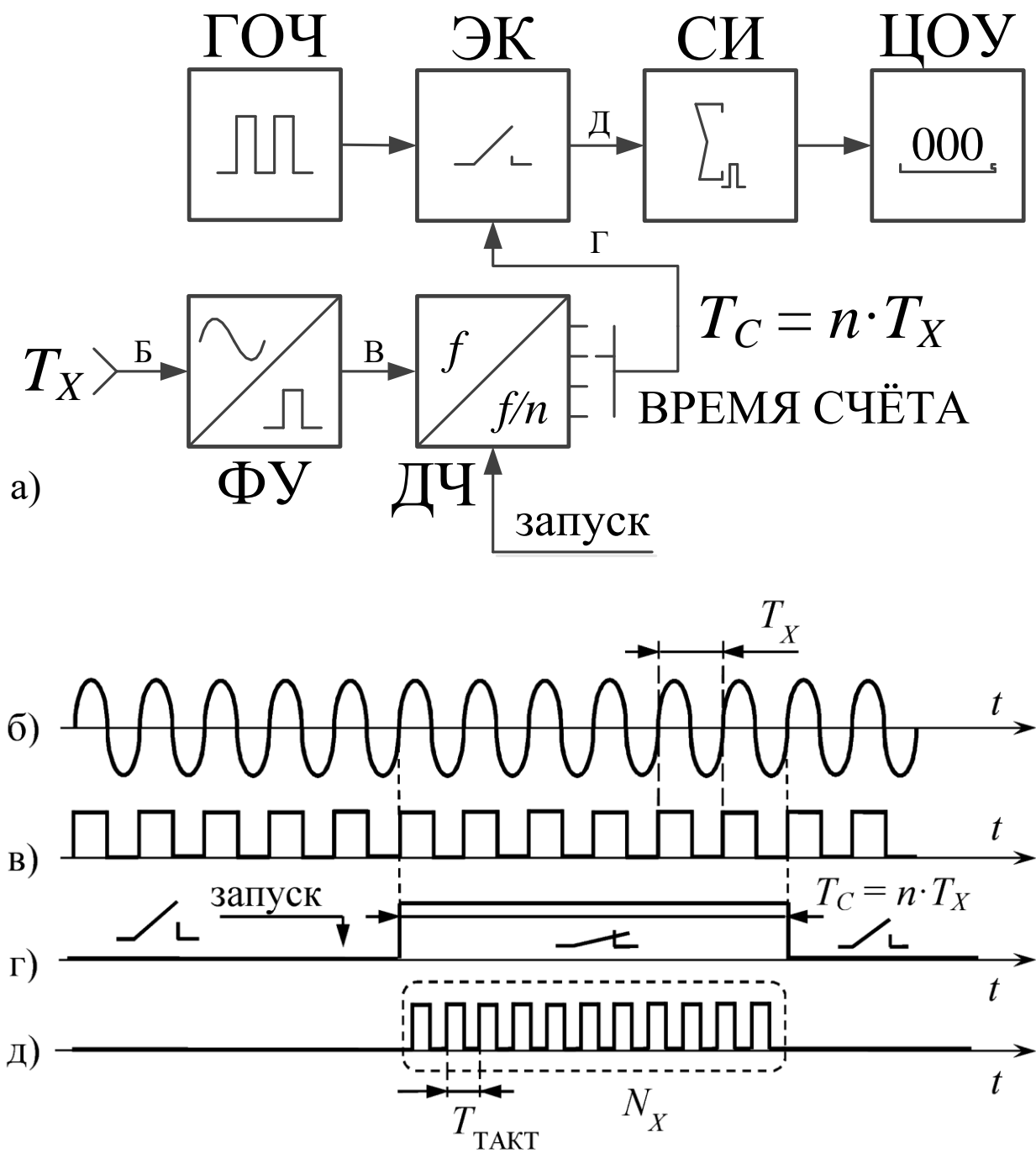


Рис. 2. Структурная схема ЦЧ в режиме измерения периода и диаграммы сигналов

2. Оценка погрешности измерения

2.1. Измерение частоты

В режиме измерения частоты в течение T_C подсчитываются импульсы, следующие с измеряемой частотой f_X (Рис. 3а). Для этого случая имеем:

$$T_C = N_X T_X - t_1 + t_2. \quad (5)$$

Если не принимать специальных мер по синхронизации импульса T_C и импульсов измеряемой частоты (т.е., если не задается принудительно определенное положение этих импульсов по отношению друг к другу), то интервалы t_1 и t_2 являются независимыми величинами, значение каждой из которых лежит в интервале $0 - T_X$ и поэтому:

$$-T_X \leq -t_1 + t_2 \leq T_X. \quad (6)$$

Поделив обе части уравнения (6) на произведение $T_C T_X$ получаем:

$$f_X = \frac{N_X}{T_C} \pm \frac{q}{T_C}, \quad (7)$$

с учетом, что $f_X = 1/T_C$ и $q = (-t_1 + t_2)/T_X$, $0 \leq q \leq 1$.

В режиме измерения частоты величина $1 / T_C$ является ценой единицы младшего разряда счетчика ($C_f = 1 / T_C$), имеющая размерность Гц(с⁻¹). В зависимости от выбранного значения T_C будем иметь $C_f = 1$ Гц ($T_C = 1$ с), $C_f = 10$ Гц ($T_C = 0,1$ с), $C_f = 0,1$ Гц ($T_C = 10$ с) и т.д. Поэтому (7) можно представить в виде:

$$f_X = N_X C_f \pm q C_f. \quad (8)$$

Случайную составляющую погрешности называют погрешностью счёта (при более строгом подходе к этой погрешности выделяют две составляющие: погрешность дискретности и погрешность несинхронизации).

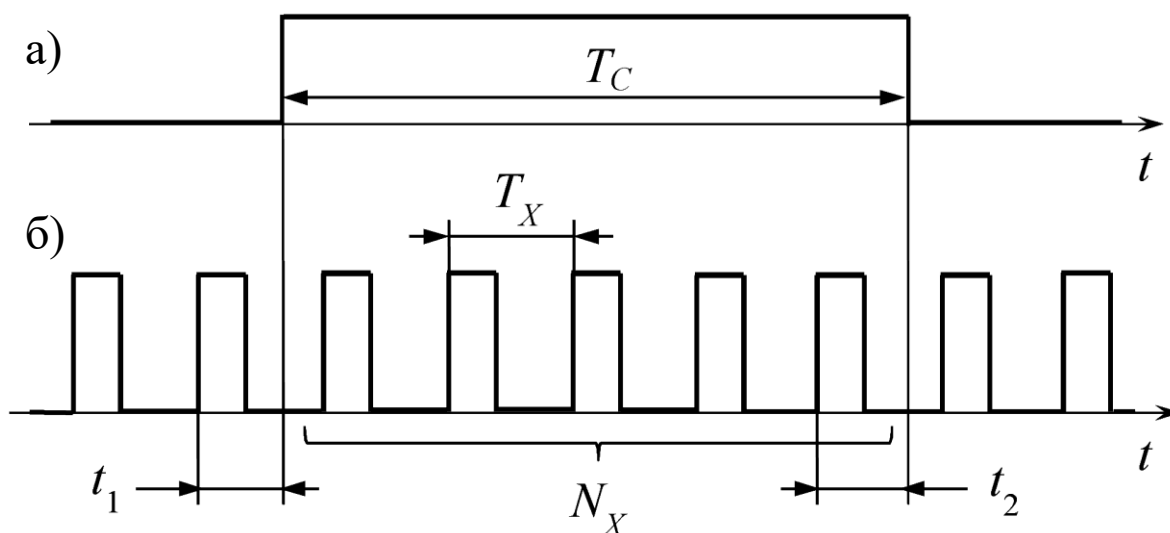


Рис. 3. К оценке погрешности счёта при измерении частоты

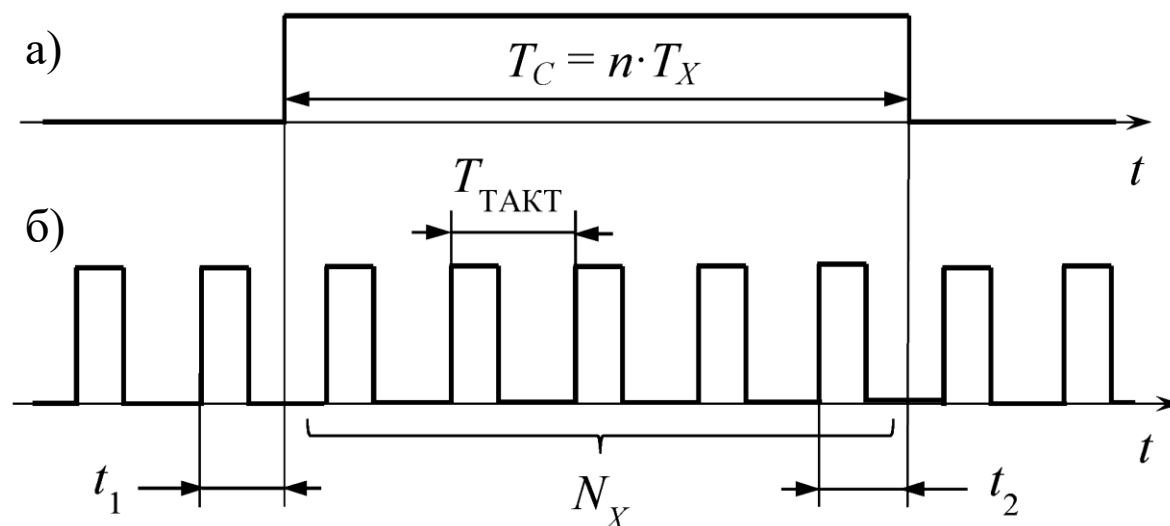


Рис. 4. К оценке погрешности счёта при измерении периода

Относительное значение этой погрешности равно:

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{f_X} 100 = \frac{q}{T_C} 100, \text{ причем } \delta_{1,max} \leq \frac{1}{T_C} 100. \quad (9)$$

Другим источником погрешностей ЦЧ является отклонение от номинального значения и его нестабильность. В ЦЧ формируется из целого числа периодов колебаний кварцевого генератора, для которого характерна чрезвычайно высокая стабильность частоты генерируемых им колебаний. Для уменьшения влияния температуры среды в ЦЧ применяется термостатирование генератора.

Таким образом, вторая составляющая погрешности измерения частоты определяется нестабильностью частоты кварцевого генератора $\delta_0 = \Delta f_0 \cdot 100 / f_0$ [%] и поэтому $\delta T_C = \delta_0$.

Следовательно,

$$\Delta_2 = \frac{N_X \delta_0}{T_C \cdot 100} = \frac{f_X \delta_0}{100}, \quad (10)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{f_X} 100 = \delta_0. \quad (11)$$

Суммарные погрешности измерения частоты равны

$$\Delta f_X = \Delta_1 + \Delta_2 = \pm \left(\frac{1}{T_C} + \frac{f_X \delta_0}{100} \right), \quad [\text{Гц}]. \quad (12)$$

Тогда предельное значение относительной погрешности измерения частоты:

$$\delta f_X = \left(\frac{100}{f_X T_C} + |\delta_0| \right), \quad [\%]. \quad (13)$$

2.2. Измерение периода

При измерении периода (Рис. 3б) в течение T_X (или nT_X) на СИ проходят импульсы с известным периодом следования $T_{ТАКТ}$ и поэтому (см. Рис. 4б):

$$T_X = N_X T_{ТАКТ} - t_1 + t_2. \quad (14)$$

Так же как и в предыдущем случае, $-t_1 + t_2$ является случайной величиной, причем, $-T_{ТАКТ} \leq -t_1 + t_2 \leq T_{ТАКТ}$ т.е.

$$\Delta_1 = q T_{ТАКТ} = q C_T. \quad (15)$$

При измерении n периодов имеем:

$$nT_X = N_X T_{\text{такт}} - t_1 + t_2, \quad (16)$$

или

$$T_X = N_X \frac{T_{\text{такт}}}{n} + q \frac{T_{\text{такт}}}{n} = N_X \frac{C_T}{n} \pm q_T \frac{C_T}{n}, \quad (17)$$

что эквивалентно уменьшению цены единицы младшего разряда в n раз.

Период следования импульсов $T_{\text{такт}}$ ($T_{\text{такт}} = 10^{-6}$ с) задается тем же кварцевым генератором, и все предыдущие замечания в отношении нестабильности T_C полностью справедливы и для этого режима работы. Поэтому:

$$\Delta_2 = \frac{N_X T_{\text{такт}} \delta_0}{100} = \frac{T_X \delta_0}{100}, \quad (18)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{T_X} 100 = \delta_0. \quad (19)$$

Суммарные погрешности (абсолютная и относительная) измерения периода определяются выражениями:

$$\Delta T_X = \Delta_1 + \Delta_2 = \pm \left(T_{\text{такт}} + \frac{T_X \delta_0}{100} \right), \quad [c] \quad (20)$$

Тогда предельное значение относительной погрешности измерения частоты:

$$\delta T_X = \delta_1 + \delta_2 = \left(\frac{T_{\text{такт}} 100}{n T_X} + |\delta_0| \right), \quad [\%]. \quad (21)$$

3. Описание виртуального лабораторного стенда

Стенд виртуальной лабораторной работы помимо ЦЧ содержит электроннолучевой осциллограф и ряд источников сигналов («Разъём»), пронумерованные от 1 до 9. В ходе выполнения работы измеряются частотно-временные параметры этих сигналов.

С помощью осциллографа определяется форма кривой сигнала, его амплитуда, а также может производиться предварительная оценка измеряемых параметров (частоты и периода).

Технические и метрологические характеристики, а также выписки из эксплуатационной инструкции ЦЧ приведены в Приложении 1 – 3.

Виртуальная лабораторная работа реализована в среде LabVIEW 2014. Для начала работы необходимо открыть программу с помощью запуска исполняемого файла Lab13.exe, находящийся в папке (Metrology / Lab13 на Рабочем столе компьютера).

Для запуска программы на компьютерах, на которых не установлена среда LabVIEW, нужно установить дополнительный модуль (находится в папке высланного материала по данной лабораторной работе) под названием LabVIEW run-time engine. Данный модуль может быть скачен с сайта National Instruments [5].

После запуска программы появляется панель, содержащая измерительные приборы (ЦЧ, осциллограф) и источники сигналов, используемые в данной лабораторной. Внешний вид панели показан на Рис. 5.

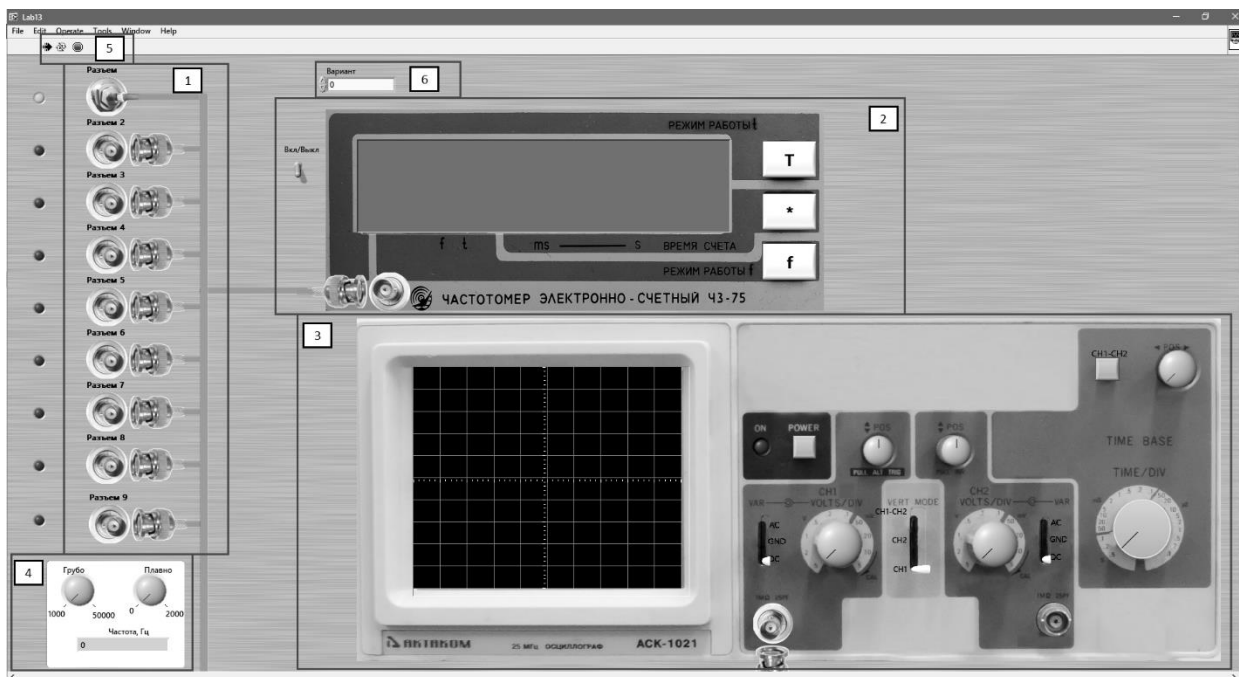



Рис. 5. Рабочая панель виртуальной лабораторной работы

На панели, изображенной на Рис. 5 можно выделить следующие элементы:

1. Набор источников сигнала (напряжения);
2. Частотомер ЧЗ-75;
3. Электроннолучевой осциллограф АСК-1021;
4. Органы управления частотой сигнала с выхода 9;
5. Кнопка запуска/останов программы;
6. Выбор варианта задания.

Перед запуском программы необходимо указать номер варианта в окне 6, в противном случае программа выполняться не будет. Для запуска программы необходимо нажать кнопку , расположенную в окне 5 Рис.

5. Для завершения работы программы необходимо нажать кнопку .

Частотомер, изображенный на Рис. 6, имеет следующие органы управления:

1. Кнопка включения/выключения прибора;
2. Соединительный провод для подачи измеряемого сигнала на вход частотомера;
3. Кнопка принудительного запуска/останов измерения параметра (частоты/периода) сигнала;
4. Кнопка, задания времени счета (режим измерения частоты) или число усредняемых периодов (режим измерения периода);
5. Кнопка установки режима работы ЦЧ (измерение сигнала по каналу А, измерение периода по каналу А, измерение частоты по каналу Б);

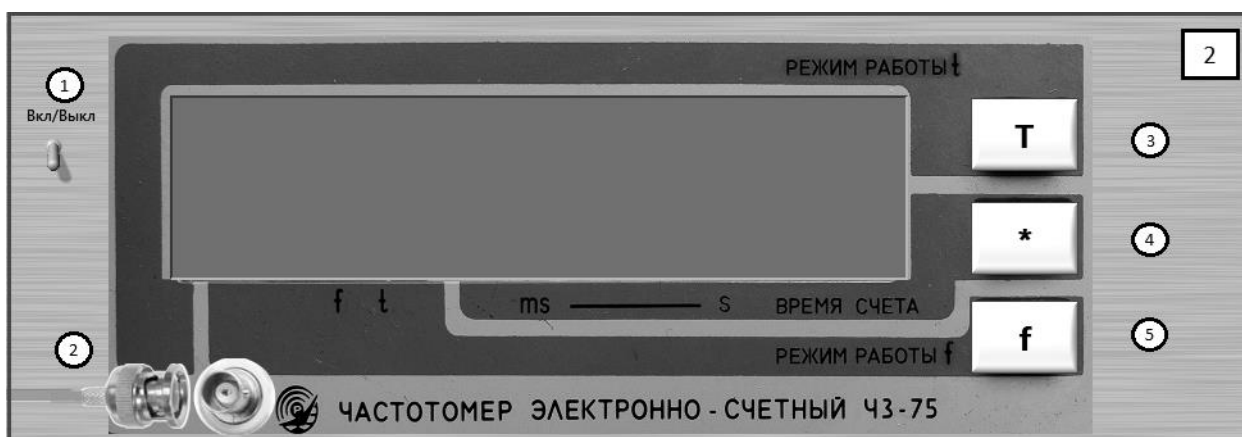


Рис. 6. Лицевая панель виртуального частотомера ЧЗ-75

Лицевая панель электроннолучевого осциллографа, используемого в виртуальной работе, изображена на Рис. 7. Осциллограф имеет следующие органы управления:

1. Кнопка включения/выключения прибора;
2. Ручка смещения сигнала по оси Y;
3. Ручка смещения сигнала по оси X;
4. Переключатель выбора режима отображения (устранение постоянной составляющей (AC) / нулевой уровень (GND) / сигнал без изменений (DC));
5. Ручка изменения масштаба по оси Y;
6. Ручка изменения масштаба по оси X.

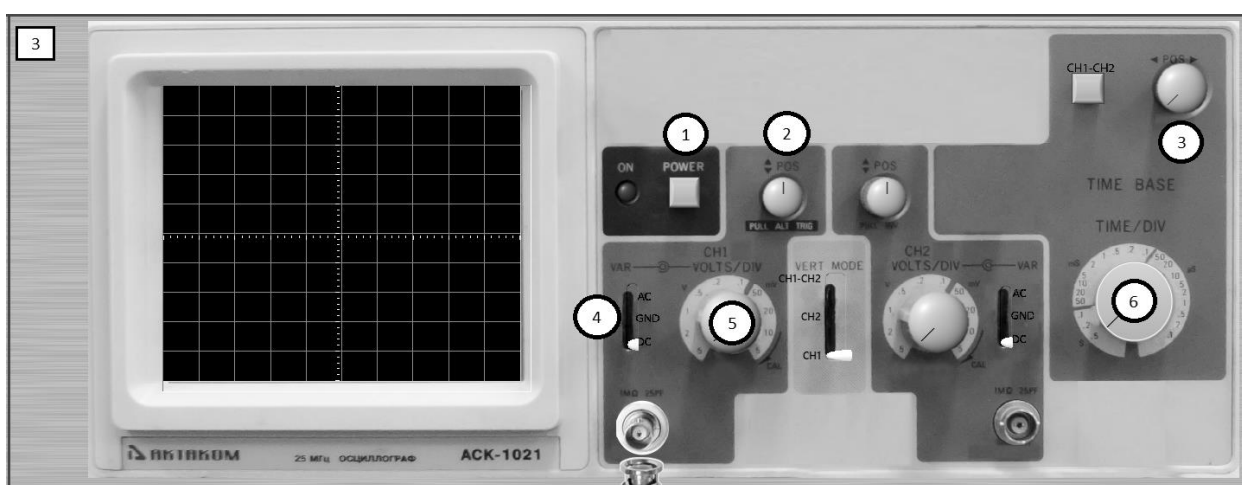


Рис.7. Лицевая панель осциллографа

4. Задание

Ознакомиться с лабораторным стендом, инструкциями по эксплуатации приборов, получить индивидуальное задание у преподавателя. Ниже представлен вариант задания.

1. Получить осциллограммы входных сигналов и проверить возможность применения частотомера для измерения их частоты и периода.

2. Измерить частоту и период сигналов 1, 2, 3 цифровым частотомером с наименьшей погрешностью.

3. Выбрать минимально необходимое время счета при измерении частоты сигнала 4 с погрешностью, не превышающей 0,05 %.

4. Выбрать минимально необходимое время счета при измерении периода сигнала 5 с погрешностью, не превышающей 0,02 %.

5. Измерить частоту (период) сигналов 6, 7 с максимальной точностью. Определить какое измерение (прямое или косвенное) точнее.

6. Найти оценку математического ожидания, среднего квадратического отклонения измерений и среднего квадратического отклонения среднего значения результатов измерения частоты ($t_{сч} = 1$ мс) и периода ($n = 1$) сигнала 8 при проведении 10–20 повторных наблюдениях.

7. Измерить среднее арифметическое значение периода сигнала 8 при заданном числе усредняемых периодов ($n = 1000$).

8. Для всех пунктов задания необходимо записать результаты измерений с указанием пределов абсолютных и относительных погрешностей.

5. Методические указания

1. С помощью встроенного в виртуальный стенд осциллографа получить изображения осциллограмм измеряемых сигналов. Для полученных изображений сделать фотографии (изображения экрана) и сохранить в памяти компьютера или внешнем запоминающем устройстве.

Произвести грубую оценку размаха сигнала по напряжению. Пользуясь данными Приложения 1 сделать вывод о возможности использования частотомера ЧЗ-75 для измерения рассматриваемых сигналов. Требуется убедиться в наличии минимально допустимого значения сигнала по напряжению, которое может быть принято частотомером в качестве положительного логического уровня. Фактически, здесь осциллограф выступает в качестве вспомогательного средства измерения для визуальной оценки формы исследуемого сигнала.

Определить период сигналов. При работе с осциллографом использовать только первый канал (канал X) осциллографа и одноканальный режим отображения.

В соответствии с Приложением 4 формула расчета относительной погрешности измерения частоты сигнала косвенным методом с помощью осциллографа может быть связана с относительной погрешностью измерения периода сигнала осциллографа $\delta T_{X, \text{осц}}$ (см. Приложение 6) следующим образом: $\delta f_{X, \text{осц}} = -\delta T_{X, \text{осц}}$.

2. Выполнить измерение частоты и периода каждого сигнала с помощью частотомера ЧЗ-75. Использовать канал «А» частотомера. Измерения выполнить для всех возможных значений времени счета (режим измерения частоты) и числа усредняемых периодов (режим измерения периода). Выполнить расчет погрешности с помощью зависимости (13) (режим измерения частоты) и зависимости (21) (режим измерения периода). Результаты выполнения пункта задания записать в Таблицу 1 (измерение частоты) и Таблицу 2 (измерение периода).

Таблица 1.

Измерение частоты

Опыт	Время счета, $T_{сч}$, мс	Результат измерения, f_X , Гц	Погрешность измерения, %
1.	10^0		
2.	10^1		
3.	10^2		
4.	10^3		
5.	10^4		

Таблица 2.

Измерение периода

Опыт	Число усредняемых периодов, n	Результат измерения, T_X , с	Погрешность измерения, %
1.	10^0		
2.	10^1		
3.	10^2		
4.	10^3		
5.	10^4		

3. Для выполнения пункта задания следует воспользоваться зависимостью (13). При условии поиска времени счета, при котором погрешность измерения частоты не превышает требуемое максимальное значение, зависимость (13) принимает вид:

$$\delta f_{X,max} \geq \left(|\delta_0| + \frac{100}{f_X T_{C,min}} \right), \quad [\%]. \quad (22)$$

где $\delta f_{X,max}$ – максимальное допустимое значение погрешности измерения частоты; $T_{C,min}$ – минимальное значение времени счета, при котором погрешность измерения частоты не превышает значения $\delta f_{X,max}$.

Искомый параметр (время счёта, $T_{C,min}$) выражается из неравенства (22) с помощью алгебраических преобразований:

$$T_{C,min} \geq \left(\frac{100}{f_X \cdot (\delta f_{X,max} - |\delta_0|)} \right), \quad [с]. \quad (23)$$

Таким образом, для выполнения данного пункта задания требуется знание частоты входного сигнала с целью последующей его подстановки в выражение (23). В соответствии с этим, необходимо оценить значение частоты сигнала. В качестве значения частоты входного сигнала может быть использован результат измерения частоты соответствующий среднему уровню достигаемой точности ($T_{Cч} = 10^1$ или 10^2 мс).

Примечание:

Допустимо проводить предварительное измерение частоты сигнала для оценки данной величины при любом из возможных для данного частотомера уровне точности. Значение частоты, полученное как при минимальном времени счета $T_{Cч} = 10^0 = 1$ мс, так и при максимальном $T_{Cч} = 10^4$ мс, не окажет сильного влияния на решение неравенства (23).

В качестве значения частоты входного сигнала в выражении (23) следует использовать результат измерения, полученный при выполнении пункта 2. При определении минимального времени счета следует учитывать, что данный параметр может принимать значения из ряда $[10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4]$, см. Приложение 2 и Приложение 3.

По результату расчета минимального времени счета следует выполнить проверку в соответствии с выражением (22).

4. Для выполнения пункта задания следует воспользоваться зависимостью (21). При условии поиска числа усредняемых периодов при котором погрешность измерения частоты не превышает требуемое максимальное значение, зависимость (21) принимает вид:

$$\delta T_{X,max} \geq \left(|\delta_0| + \frac{T_{\text{такт}} 100}{n_{\min} T_X} \right), \quad [\%]. \quad (24)$$

где $\delta T_{X,max}$ – максимальное допустимое значение погрешности измерения периода; n_{\min} – минимальное значение числа усредняемых периодов, при котором погрешность измерения периода не превышает значения $\delta T_{X,max}$.

Выражая из соотношения (24) значение n_{\min} , получаем:

$$n_{\min} \geq \left(\frac{100 \cdot T_{\text{такт}}}{T_X \cdot (\delta T_{X,max} - |\delta_0|)} \right), \quad (25)$$

Аналогично предыдущему пункту, для определения минимального числа усредняемых периодов согласно неравенству (25) требуется знание периода входного сигнала. В качестве значения периода входного сигнала может быть использован результат его прямого измерения, соответствующий времени счёта $T_{\text{сч}} = 10^1$ или 10^2 мс.

При определении минимального числа усредняемых периодов следует учитывать, что данный параметр может принимать значения из ряда $[10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4]$, см. Приложение 2 и Приложение 3.

По результату расчета минимального числа усредняемых периодов следует выполнить проверку в соответствии с выражением (24).

5. Измерение частоты и периода можно выполнить как прямым, так и косвенным способом. Связь частоты и периода сигнала определяется простой формулой:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (26)$$

Выполнение данного пункта рекомендуется производить в следующей последовательности:

1) Произвести прямое измерение заданной величины (частота или период, в зависимости от условия задания) с помощью частотомера с наибольшей точностью.

2) Далее существуют два варианта равноправных действий: а) произвести дополнительное прямое измерение обратной величины с помощью частотомера также с наибольшей точностью; б) возможно не проводить дополнительное измерение, ограничившись аналитическим расчетом обратной величины согласно (26).

Примечание:

Стоит отметить, что во втором случае остается справедливым утверждение об измерении с помощью частотомера с наибольшей точностью. По сути, Вы, не производя непосредственно измерения с помощью частотомера, получаете требуемое значение, при этом предполагается, что данная величина была как бы измерена с помощью частотомера, соответственно, при дальнейшем расчете погрешности косвенного измерения необходимо учитывать все параметры измерения, устанавливаемые на частотомере.

3) Вычислить погрешности прямого измерения величины ($\delta f_{\text{п}}$ или $\delta T_{\text{п}}$) в зависимости от условия задания и погрешности косвенного измерения (прямого измерения обратной величины, соответственно, $\delta f_{\text{к}}$ или $\delta T_{\text{к}}$).

Рекомендуется производить расчет погрешностей в относительной форме, поскольку в этом случае погрешности и прямого и косвенного измерений будут иметь одинаковые размерности.

При выполнении прямого измерения значение погрешности определяется зависимостью (13) – для частоты и (21) – для периода. В случае косвенного измерения частоты, погрешность измерения связана с погрешностью прямого измерения периода соотношением (см. Приложение 4):

$$\delta_{f,\text{к}} = \delta_{T,\text{п}}, \quad (27)$$

где $\delta_{f,\text{к}}$ – значение погрешности косвенного измерения частоты через прямое измерение периода (см. зависимость (26)); $\delta_{T,\text{п}}$ – значение

погрешности прямого измерения периода, полученное согласно зависимости (21).

Для случая косвенного измерения периода через прямое измерение частоты может быть получена аналогичная зависимость:

$$\delta_{T,к} = \delta_{f,п}, \quad (28)$$

где $\delta_{T,к}$ – значение погрешности косвенного измерения периода через прямое измерение частоты (см. зависимость (26)); $\delta_{f,п}$ – значение погрешности прямого измерения частоты, полученное согласно зависимости (13).

Из зависимости (13) и (21) видно, что погрешности прямых измерений частоты и периода зависят от частоты измеряемого сигнала. Для случая измерения частоты данные зависимости схематично изображены на Рис. 8.

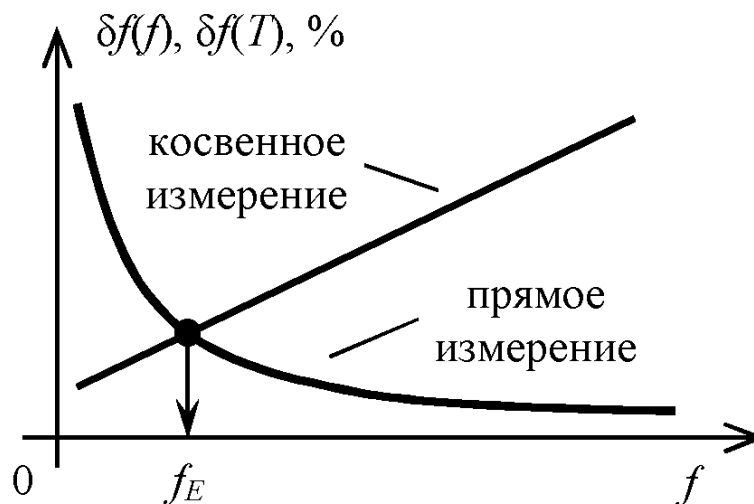


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения частоты при прямом и косвенном (через прямое измерение периода) измерении

Из Рис. 8 видно, что в случае прямого измерения частоты погрешность имеет тенденцию к уменьшению с увеличением значения частоты. Наоборот, при косвенном измерении частоты через период, с увеличением значения частоты погрешность имеет тенденцию к росту. Если частота входного сигнала находится в диапазоне $0 \div f_E$ (см. Рис. 8), то большую точность обеспечивает косвенное измерение частоты через период. Для диапазона частот входного сигнала $f_E \div \infty$ меньшая погрешность достигается путем прямого измерения.

Вывод об оптимальном режиме измерения (прямом или косвенном) для заданного сигнала может быть сделан по результатам расчета погрешности прямого (соотношение (13)) и косвенного (соотношения (27) и (21)) измерений. При этом время счета (для измерения частоты) и число усредняемых периодов (для измерения периода) выбираются максимальными (см. Приложение 3).

Отметим, что при расчете погрешностей прямого и косвенного измерений в относительной форме, их размерности (проценты или относительные единицы) совпадают, что существенно облегчает последующее сравнение указанных погрешностей.

Примечание:

Вместе с тем, снижается вероятность допущения ошибки при преобразовании единиц измерения. Конечно, вполне допустимо выполнять сравнение погрешностей и в абсолютной форме, но тогда следует принимать во внимание, что при сопоставлении значений погрешностей их единицы измерения окажутся разнородными, соответственно, производить их непосредственное сравнение нельзя. Для этой цели потребуется приведение единиц измерения прямого или косвенного измерений к единому стандарту. Взаимосвязь погрешностей прямого и косвенного измерений согласно выражению (26) подчиняется общеизвестному методу оценки погрешностей косвенных измерений – закону накопления частных погрешностей (см. Приложение 4).

6. При выполнении пункта предполагается, что измеряемая величина является случайной величиной (результат измерения, детерминированная и случайная составляющие погрешности). Проведение многократных наблюдений позволяет рассчитать следующие параметры (для случая измерения частоты, см. Приложение 5):

а) среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$f_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}, \quad (29)$$

где f_i – результат i -го измерения частоты сигнала f ; N – число результатов измерения;

б) оценки математического ожидания результатов измерения

$$\tilde{m}_f = f_{\text{cp}}; \quad (30)$$

в) среднее квадратическое отклонение результатов измерения

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_{cp})^2}{N - 1}}; \quad (31)$$

г) среднее квадратическое отклонение f_{cp}

$$\tilde{\sigma}[f_{cp}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_{cp})^2}{N(N - 1)}}. \quad (32)$$

Среднее квадратическое отклонение (СКО) характеризует доверительный интервал предельной погрешности результата измерения. Из сопоставления формул (31) и (32) видно, что среднее значение для результатов измерения обладает в $1/\sqrt{N}$ меньшим значением среднего квадратического отклонения. Следовательно, и случайная составляющая погрешности для среднего значения результатов измерения будет в $1/\sqrt{N}$ раз меньше, чем для отдельного измерения.

7. В данном пункте требуется произвести только измерение среднего значения периода. При этом, необходимо установить на частотомере такие настройки параметров измерения, при котором определение среднего арифметического значения периода сигнала будет происходить аппаратным способом. В этом случае, по сути, непосредственно усреднение производится доступным функционалом самого частотомера.

Примечание:

Для выполнения данного пункта требуется переключить частотомер в режим измерения периода, если это не было сделано ранее, установить на частотомере заданное значение числа усредняемых периодов n . Произвести одно измерение, зафиксировать в протокол полученные показания частотомера. Выполнить расчет погрешности с помощью зависимости (21). Предоставить окончательный результат измерения среднего значения в форме ответа по стандартной форме.

Принцип измерения периода используемого цифрового частотомера основан на подсчете числа импульсов генератора опорной частоты (ГОЧ) за время, соответствующее заданному числу периодов измеряемого сигнала (см. структурную схему на рис. 2). Число измеряемых периодов задается пользователем посредством соответствующей кнопки. Соотношение между периодом генератора опорной частоты и периодом входного сигнала с учетом девиации последнего может быть записано в следующей форме:

$$N_X T_{\text{такт}} = T_A = \sum_{i=1}^n T_{X,i}, \quad (33)$$

где T_A – интервал времени, соответствующий заданному пользователем числу усредняемых периодов входного сигнала (параметр n); $T_{X,i}$ – i -ое значение периода измеряемого сигнала.

Используя понятие среднего значения величины, можно записать:

$$T_{X,\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{X,i}}{n}. \quad (34)$$

С учетом (34), выражение (33) принимает вид:

$$N_X T_{\text{такт}} = n T_{X,\text{ср}}, \quad (35)$$

Таким образом, результат измерения периода для данного режима – это среднее значение периода за рассматриваемый временной интервал. При этом, число усредняемых периодов соответствует значению параметра n , устанавливаемому пользователем.

Приведенные выводы наглядно показывают, что в силу особенностей принципа работы цифрового частотомера, прибор в любом случае не может измерять мгновенное значение частоты или периода сигнала, а вычисляет некое усредненное значение. Степень этого усреднения определяется числом периодов исследуемого сигнала N_X (режим измерения частоты) в течение установленного времени счета T_C или числом n периодов сигнала опорной частоты (режим измерения периода). Более подробно см. описание принципа работы частотомера в разных режимах в п.1.

Приложение 1. Рабочие условия эксплуатации цифрового частотомера ЧЗ-75

Таблица П1.1

Рабочие условия эксплуатации прибора ЧЗ-75

Характеристика	Рабочий диапазон
Температура окружающего воздуха	От 5 до 40 °С (от 278 до 313 К)
Относительная влажность воздуха	До 90% при температуре 25 °С (298 К)
Атмосферное давление	От 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.)
Напряжение питающей сети	(240 ± 24) В или (220 ± 22) В или (120 ± 12) В или (110 ± 11) В частотой (50 ± 1) Гц или (60 ± 1) Гц

Приложение 2. Основные технические данные частотомера ЧЗ-75

Таблица П2.1

Технические данные цифрового частотомера ЧЗ-75

Номер	Параметр	Условия	Значение			Примечание
			Минимальное	Номинальное	Максимальное	
1.	Диапазон измерения частоты, канал А и В	Напряжение синусоидального входного сигнала от 0,02 до 10 В	10 Гц	—	10 МГц	Допустимое отношение напряжения сигнала к напряжению помехи не менее 30 дБ.
		Напряжение синусоидального входного сигнала от 0,05 до 1 В	10 МГц	—	1000 МГц	
2.	Диапазон измерения периода, канал А	Напряжение синусоидального входного сигнала от 0,02 до 10 В	1 мкс	—	100 мс	Допустимое отношение напряжения сигнала к напряжению помехи не менее 30 дБ.
3.	Диапазон изменения входного напряжения в режиме измерения частоты, канал А и В	Диапазон частот от 10 Гц до 10 МГц	0,02 В	—	10 В	
		Диапазон частот от 10 МГц до 1000 МГц	0,05 В	—	1 В	
4.	Диапазон изменения входного напряжения в режиме измерения периода, канал А	Диапазон значений периода сигнала от 1 мкс до 100 мс	0,02 В	—	10 В	
5.	Погрешность измерения частоты, канал А		0,00020 %	—	10 %	1*)
6.	Погрешность измерения частоты, канал В		0,00020 %	—	16 %	1*)

Таблица П2.1

Технические данные цифрового частотомера ЧЗ-75 (Продолжение)

Номер	Параметр	Условия	Значение			Примечание
			Минимальное	Номинальное	Максимальное	
7.	Погрешность измерения периода, канал А		0,00020 %	—	100 %	2*)
8.	Частота внутреннего кварцевого генератора		4,995 МГц	5 МГц	5,005 МГц	3*)
9.	Входное сопротивление прибора по входу А		1 МОм	—	—	
10.	Входная ёмкость прибора по входу А		—	—	50 пФ	
11.	Входное сопротивление прибора по входу В		—	50 Ом	—	
12.	Частота опорного сигнала			5 МГц		4*)

1*) Относительная погрешность измерения частоты вычисляется по формуле:

$$\delta_f = \pm \left(\delta_0 + \frac{1}{f_{\text{изм}} \cdot t_{\text{сч}}} \right),$$

где δ_0 – относительная погрешность по частоте внутреннего кварцевого генератора или внешнего источника, используемого вместо внутреннего кварцевого генератора; $f_{\text{изм}}$ – измеряемая частота, Гц; $t_{\text{сч}}$ – время счета, с.

Время счета прибора $10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4$ мс в режиме измерения частоты по входу А « f_A » и $6,4 \cdot 10^{-1}, 6,4 \cdot 10^0, 6,4 \cdot 10^1, 6,4 \cdot 10^2, 6,4 \cdot 10^3$ мс в режиме измерения частоты по входу В « f_B ».

2*) Относительная погрешность измерения периода вычисляется по формуле:

$$\delta_{\tau} = \pm \left(\delta_0 + \frac{T_{\text{такт}}}{n \cdot T_{\text{изм}}} \right),$$

где δ_0 – относительная погрешность по частоте внутреннего кварцевого генератора или внешнего источника, используемого вместо внутреннего кварцевого генератора; n – число измеряемых периодов; $T_{\text{такт}}$ – период меток времени ($T_{\text{такт}} = 10^{-6}$ с); $T_{\text{изм}}$ – измеряемый период.

Число усредняемых периодов (множитель периода) $10^0, 10^1, 10^2, 10^3, 10^4$.

3*) Относительная погрешность по частоте внутреннего кварцевого генератора в пределах: 1) $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ за 30 сут;
2) $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ за 12 мес;

Интервалы времени 30 сут и 12 мес отсчитываются с момента коррекции частоты с относительной погрешностью в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ (при работе с выключениями или без выключений).

Относительное изменение частоты внутреннего кварцевого генератора в диапазоне рабочей температуры от 5 до 40 °С, в пределах $\pm 2 \cdot 10^{-8}$.

4*) Погрешность по частоте, равна погрешности внутреннего кварцевого генератора, размах сигнала не менее 0,4 В на конце кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом длиной 1 м, нагруженного на сопротивление 100 Ом.

Приложение 3. Краткие сведения режимов измерения частоты и периода цифрового частотомера ЧЗ-75

Измерение частоты

Для измерения частоты периодического сигнала по входу А последовательным нажатием кнопки РЕЖИМ РАБОТЫ установить одноименный курсор на индикаторе в положение f_A . Сигнал с частотой в диапазоне 10 Гц до 10 МГц уровнем от 0,02 В до 10 В подать на вход А. Установить необходимое время счета последовательным нажатием кнопки ВРЕМЯ СЧЕТА в соответствии с табл. 1.

Измерение периода

Для измерения периода периодического сигнала по входу А последовательным нажатием кнопки РЕЖИМ РАБОТЫ установить одноименный курсор на индикаторе в положение t_A . Сигнал с периодом в диапазоне 1 мкс до 100 мкс (частота сигнала от 10 Гц до 1 МГц) и уровнем от 0,02 В до 10 В подать на вход А. Установить требуемое количество усредняемых периодов (от 1 до 10^4) последовательным нажатием кнопки ВРЕМЯ СЧЕТА в соответствии с табл. 2.

Таблица ПЗ.1.

Измерение частоты

Номер	Время счёта, мс	Положение курсора ВРЕМЯ СЧЁТА	Цена единицы младшего разряда
1	10^0	▽	1 кГц
2	10^1	▽▽	100 Гц
3	10^2	▽▽▽	10 Гц
4	10^3	▽▽▽▽	1 Гц
5	10^4	▽▽▽▽▽	0,1 Гц

Относительная погрешность измерения частоты:

$$\delta_f = \pm \left(|\delta_0| + \frac{1}{f_{\text{изм}} \cdot t_{\text{сч}}} \right),$$

где δ_0 – относительная погрешность по частоте внутреннего кварцевого генератора или внешнего источника, используемого вместо внутреннего кварцевого генератора; $f_{\text{изм}}$ – измеряемая частота, Гц; $t_{\text{сч}}$ – время счета, с.

Измерение периода

Номер	Число усредняемых периодов	Положение курсора ВРЕМЯ СЧЁТА	Цена единицы младшего разряда
1	10^0	▽	1 мкс
2	10^1	▽ ▽	100 нс
3	10^2	▽ ▽ ▽	10 нс
4	10^3	▽ ▽ ▽ ▽	1 нс
5	10^4	▽ ▽ ▽ ▽ ▽	0,1 нс

Относительная погрешность измерения периода

$$\delta_{\tau} = \pm \left(|\delta_0| + \frac{T_{\text{такт}}}{n \cdot T_{\text{изм}}} \right),$$

где δ_0 – относительная погрешность по частоте внутреннего кварцевого генератора или внешнего источника, используемого вместо внутреннего кварцевого генератора; n – число измеряемых периодов; $T_{\text{такт}}$ – период меток времени ($T_{\text{такт}} = 10^{-6}$ с); $T_{\text{изм}}$ – измеряемый период.

Приложение 4. Определение погрешности косвенных измерений

При оценке погрешности косвенных измерений применяют так называемый закон накопления частных погрешностей. Пусть величина Y зависит (функционально связана) от величин $X_1, X_2 \dots X_N$. Данная зависимость может быть представлена в аналитическом виде:

$$Y = func(X_1, X_2 \dots X_N), \quad (\text{П4.1})$$

где X_i – i -ая влияющая величина.

Значения влияющих величин получены в ходе выполнения прямых измерений и могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} X_1 = X_{1,\text{изм}} + \Delta X_1, \\ \dots \\ X_N = X_{N,\text{изм}} + \Delta X_N; \end{cases} \quad (\text{П4.2})$$

где $X_{i,\text{изм}}$ – результат прямого измерения i -ой влияющей величины X_i ; ΔX_i – погрешность измерения i -ой влияющей величины X_i .

Погрешность измерения величины Y , полученной путем применения соотношения (П4.1) может быть найдена с помощью следующего приближенного выражения:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial(func(X_1, X_2 \dots X_N))}{\partial X_i} \Delta X_i \right|, \quad (\text{П4.3})$$

где ΔX_i – максимальное значение погрешности измерения i -ой влияющей величины X_i ; $\partial(func(X_1, X_2 \dots X_N)) / \partial X_i$ – коэффициент влияния X_i влияющей величины; $\partial(func(X_1, X_2 \dots X_N)) \Delta X_i / \partial X_i$ – частная погрешность X_i влияющей величины.

Для случая косвенного измерения частоты через период:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (\text{П4.4})$$

где T – значение периода входного сигнала, имеем одну влияющую величину – период.

Предположим, что значение периода получено в ходе прямого измерения с погрешностью ΔT . Тогда погрешность измерения частоты может быть получена с помощью соотношения (П4.3) и представлена в виде:

$$\Delta f = -\frac{1}{T^2} \Delta T. \quad (\text{П4.5})$$

Тогда в относительном виде погрешность косвенного измерения частоты через период может быть выражена как:

$$\delta f = -\frac{1}{T} \Delta T = -\delta T, \quad (\text{П4.6})$$

где δT – относительная погрешность прямого измерения периода.

Откуда можно записать:

$$|\delta f| = |\delta T|. \quad (\text{П4.7})$$

Таким образом, при косвенном измерении частоты её относительная погрешность равна относительной погрешности прямого измерения периода. Аналогичный вывод можно сделать и для случая косвенного измерения периода: при косвенном измерении периода относительная погрешность его измерения равна относительной погрешности прямого измерения частоты.

Приложение 5. Основы статистической обработки результатов измерений

Результаты измерения частоты (периода) содержат две составляющие погрешности: детерминированную и случайную. Случайная составляющая погрешности может быть существенно снижена путем выполнения многократных измерений и усреднения полученных результатов.

Рассмотрим случай измерения частоты. Пусть в результате проведения N независимых измерений получены результаты $f_1, f_2 \dots, f_N$. Поскольку результат измерения частоты – случайная величина, то он характеризуется своим законом распределения, математическим ожиданием, дисперсией и другими параметрами случайных величин.

Оценка математического ожидания может быть получена через среднее арифметическое значение результатов измерения:

$$f_{\text{cp}} = \tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}, \quad (\text{П5.1})$$

где f_i – результат i -го измерения частоты сигнала f ; N – число результатов измерения.

Для оценки среднего квадратического отклонения результатов измерения частоты (периода) может быть использована формула:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \tilde{m})^2}{N - 1}}, \quad (\text{П5.2})$$

где \tilde{m} – оценка математического ожидания, полученная с помощью формулы (П5.1).

Соответственно, оценка дисперсии результатов измерения частоты(периода):

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \tilde{m})^2}{N - 1}. \quad (\text{П5.3})$$

Среднее арифметическое значение результатов измерения (см. формулу (П5.1)) также является случайной величиной, но со своим законом распределения и статистическими параметрами:

$$\tilde{D}[f_{\text{cp}}] = \frac{\tilde{D}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \tilde{m})^2}{N(N-1)}. \quad (\text{П5.4})$$

Тогда среднее квадратическое отклонение среднего значения результатов измерения:

$$\tilde{\sigma}[f_{\text{cp}}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \tilde{m})^2}{N(N-1)}}. \quad (\text{П5.5})$$

Полученные оценки математического ожидания (П5.1), дисперсии результатов измерения (П5.3) и дисперсии среднего значения (П5.4) являются состоятельными, несмещенными и эффективными [3].

Приложение 6. Электронно-лучевые осциллографы

Электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО) активно применяются для наблюдения форм кривых периодических и непериодических напряжений, а также для измерений мгновенных значений напряжений, интервалов времени, фазовых сдвигов, частоты и других параметров электрических сигналов. Осциллографы обладают малым собственным потреблением от источников исследуемых напряжений, высокой чувствительностью, широким частотным диапазоном.

Некоторые типы ЭЛО позволяют наблюдать одновременно несколько исследуемых напряжений, запоминать и обрабатывать исследуемые напряжения с целью измерения их мгновенных значений, интервалов времени и других параметров, а также для более детального анализа отдельных участков исследуемых процессов.

Основными составными частями ЭЛО являются:

- 1) электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) – в рамках данного приложения не рассматривается детально;
- 2) каналы CH1 \boxed{X} и CH2 \boxed{Y} ;
- 3) канал развертки.

Канал вертикального отклонения (CH1)

Исследуемые напряжения, подаваемые на вход CH1 могут иметь значительный динамический диапазон значений (например, от 1 мВ до 100 В). Для получения приемлемого размера изображения по вертикали в канал вводятся делитель напряжения ДН для ослабления напряжений в целое число раз, а для усиления – усилитель постоянного напряжения U_Y .

Если на вход Y подано исследуемое напряжение, то координата y светящегося на экране пятна в любой момент времени пропорциональна мгновенному значению исследуемого напряжения $u_Y(t)$:

$$y = S_Y \cdot K_{ДН} \cdot K_{УН, Y} \cdot u_Y(t) = S_Y \cdot u_Y(t), \quad (П6.1)$$

где $K_{ДН}$ – коэффициент передачи делителя напряжения ДН; $K_{УН, Y}$ – коэффициент усиления усилителя напряжения по каналу Y . Величину S_Y называют чувствительностью осциллографа по входу Y или чувствительностью по каналу Y .

Величина $1/S_Y = K_Y$ называется коэффициентом отклонения осциллографа по вертикали и является нормированной величиной для каждого положения переключателя ДН. Она имеет размерность В/дел. Обычно деление равно сантиметру.

Второй канал по составу входящих в него функциональных узлов аналогичен первому. Если на вход X подать напряжение $u_X(t)$, то для координаты x светящегося пятна аналогично получим:

$$x = S_X \cdot U_X(t). \quad (\text{П6.2})$$

Вышеприведенные формулы для расчета координат x и y полностью описывают движение светящегося пятна на экране осциллографа для любых $u_X(t)$ и $u_Y(t)$, действующих одновременно.

Канал горизонтального отклонения (развертки)

Для получения на экране кривой исследуемого напряжения $u_Y(t)$ в прямоугольной системе координат необходимо, чтобы точка (проекция луча) перемещалась по экрану слева направо с постоянной скоростью. Этому соответствует изменение напряжения по линейному закону (размерность В/с), поступающему на канал горизонтального отклонения, в течение некоторого интервала времени: $u_X(t) = K_X \cdot t = K_P \cdot t$. Тогда в соответствии с формулой расчета значения координаты X (см. выражение П6.2) имеем:

$$x = S_X \cdot K_P \cdot t. \quad (\text{П6.3})$$

Сравнивая полученное выражение с зависимостью исследуемого напряжения u_Y от времени (см. выражение (П6.1)), нетрудно увидеть, что координаты изображения y и x связаны между собой той же функциональной зависимостью. Постоянные множители S_X , S_Y и K_P определяют лишь масштаб изображения. С этой целью в состав канала вводится генератор развертки ГР, формирующий так называемое пилообразное напряжение развертки $u_X(t)$ (см. рис. П6.1).

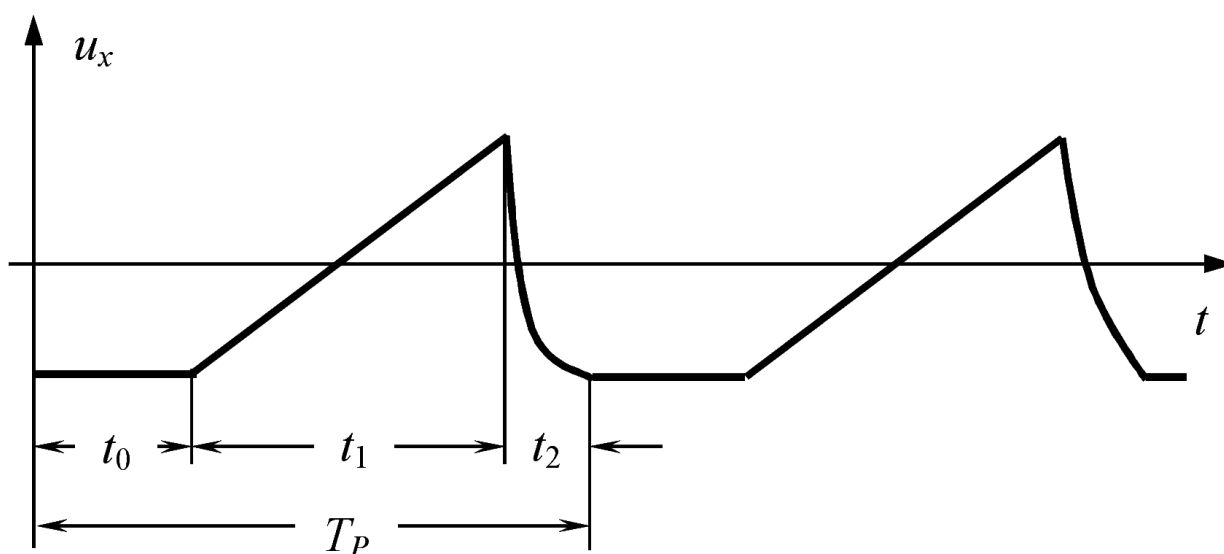


Рис. П6.1. Осциллограмма напряжения на выходе генератора развертки

Здесь на рис. Пб.1 интервал времени t_0 – время ожидания запуска генератора. В течение t_0 светящееся пятно находится в левой части экрана; координата x пятна в течение этого интервала времени не изменяется. Интервал времени t_1 называют временем прямого (рабочего) хода луча. В течение t_1 под действием линейно нарастающего напряжения $u_x(t)$ светящееся пятно движется по экрану слева направо с постоянной скоростью. В течение t_2 (времени обратного хода луча) луч движется справа налево в исходное положение. Время t_2 стремятся сделать как можно меньшим ($t_2 \ll t_1$).

Синхронизация

При исследовании периодических напряжений изображение на экране будет неподвижным и удобным для наблюдения, если во время каждого прямого хода луча светящееся пятно движется по одной и той же траектории. Это возможно лишь в том случае, когда период напряжения развёртки T_p равен или в целое число раз больше периода исследуемого напряжения T . Регулируя время рабочего хода t_1 или время ожидания t_0 , можно изменять период T_p и, следовательно, добиваться неподвижности изображения (время обратного хода луча не регулируется).

На практике периоды исследуемого и развёртывающего напряжений обычно нестабильны. Вследствие этого изображение на экране ЭЛО будет перемещаться. Для получения неподвижного изображения осуществляется жёсткая связь (синхронизация) между периодами исследуемого и развёртывающего напряжений.

Идея синхронизации в режиме непрерывной развёртки, когда $t_1 = 0$, заключается в том, что прямой ход луча принудительно заканчивается при вполне определённом мгновенном значении исследуемого напряжения. При этом малое изменение периода исследуемого напряжения автоматически ведёт к соответствующему изменению периода развёртывающего напряжения. Данный режим синхронизации и работы ГР хорошо удовлетворяет требованиям наблюдения периодических сигналов.

Измерение мгновенных значений напряжений

Возможность измерения мгновенных значений напряжений – одно из основных достоинств ЭЛО. При использовании откалиброванных осциллографов измерение напряжения (см. рис. Пб.2) сводится к измерению длины линейного отрезка на экране ЭЛО, (его вертикальная проекция между двумя точками на изображении, соответствующим определённым мгновенным значениям исследуемого напряжения), характеризующего измеряемое напряжение, и умножению его на коэффициент отклонения по вертикали.

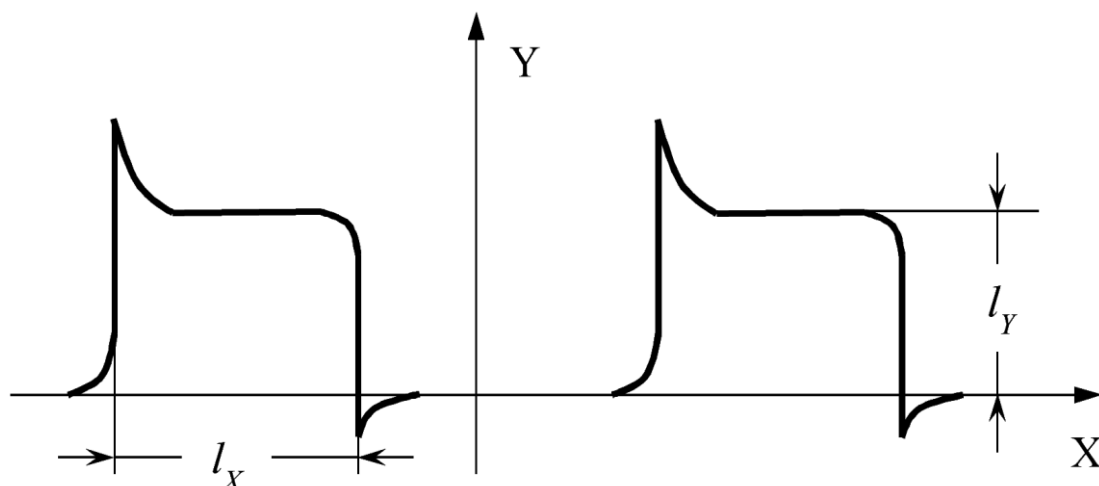


Рис. П6.2. Иллюстрация измерения напряжений сигналов и временных интервалов

Исследуемое напряжение подаётся на вход Y, подключается ГР, и на экране устанавливается устойчивое изображение. Коэффициент K_Y при этом изменять нельзя. Зная K_Y и измерив отрезок l_Y , соответствующий искомому мгновенному значению исследуемого напряжения u_Y , можно определить значение этого напряжения по следующей формуле (см. П6.1):

$$u_Y [\text{В}] = l_Y [\text{см}] \cdot K_Y [\text{В/см}]. \quad (\text{П6.4})$$

Общая формула оценки относительной погрешности измерения мгновенных значений напряжений:

$$\delta u_Y = \delta_{l_Y} + \delta_{K_Y}; \quad \delta_{l_Y} = \frac{\Delta l_Y}{l_Y}, \quad (\text{П6.5})$$

где δK_Y – относительная погрешность коэффициента отклонения по оси Y, $\delta K_Y = \pm 5,0 \%$ (нормируется для ЭЛО модели АСК-1021); δ_{l_Y} – субъективная (визуальная) составляющая погрешности – погрешность отсчитывания числа делений по экрану ЭЛО, соответствующего длине измеряемого отрезка сигнала l_Y по напряжению (оси Y); Δl_Y – толщина луча, соответствует погрешности отсчета по линейной шкале на экране ЭЛО. Для уменьшения данной погрешности рекомендуется увеличить видимый размер l_Y .

Предел допускаемой абсолютной визуальной погрешности измерения напряжения Δl_Y определяют по формуле:

$$\Delta l_Y = 0,4 \cdot b \cdot 100 \%, \quad (\text{П6.6})$$

где b – ширина линии луча (для ЭЛО АСК-1021: $b = 0,6 \text{ мм}$).

Измерение временных интервалов

ЭЛО широко применяется для измерений временных интервалов между различными точками на оси времени и мгновенными значениями исследуемых напряжений (см. рис. П6.2). При этом необходимо знание коэффициента развёртки – масштаб изображения по горизонтали. Коэффициент развёртки численно равен интервалу времени, за который светящееся пятно перемещается по экрану на одно деление (или сантиметр) по горизонтали. Коэффициент развёртки обратно пропорционален скорости движения пятна по горизонтали, которая зависит от скорости нарастания пилообразного напряжения развёртки и чувствительности S_X по входу X.

В современных осциллографах коэффициент развёртки K_X (или K_P) может принимать лишь фиксированные, заранее известные значения (калиброванная развёртка).

Вычислить требуемый временной интервал можно следующим образом. При использовании откалиброванных осциллографов для этого достаточно измерить длину линейного отрезка l_X (его горизонтальная проекция между двумя точками на изображении, соответствующим определённым значениям моментов времени исследуемого напряжения), характеризующего измеряемому интервалу времени, умножить его на коэффициент отклонения по горизонтали или коэффициент развёртки (см. (П.6.3)), т.е.:

$$\Delta t[\text{с}] = l_X[\text{см}] \cdot K_X[\text{с/см}] = l_X[\text{см}] \cdot K_P[\text{с/см}] \quad (\text{П6.7})$$

Точность измерения в рассматриваемом случае зависит от погрешности значения K_P и погрешности измерения отрезка l_X . При выборе размера l_X следует руководствоваться соображениями, изложенными выше применительно к выбору размеров вертикальных отрезков.

Общая формула оценки относительной погрешности измерения значений временных интервалов сигналов по аналогии с выражением (П6.5):

$$\delta_{\Delta t} = \frac{\Delta l_X}{l_X} + \delta_{K_X} \quad (\text{П6.8})$$

где δ_{K_X} – относительная погрешность коэффициента отклонения по оси X, $\delta_{K_X} = \pm 5,0 \%$ (нормируется для ЭЛО модели АСК-1021); δ_{l_X} – субъективная (визуальная) составляющая погрешности – погрешность отсчитывания числа делений по экрану ЭЛО, соответствующего длине измеряемого отрезка сигнала l_X по времени (оси X); Δl_X – толщина луча, соответствует погрешности отсчета по линейной шкале на экране ЭЛО. Для уменьшения данной погрешности желательно увеличить видимый размер l_X . Предел допускаемой абсолютной визуальной погрешности измерения временного интервала Δl_X рассчитывается согласно формуле (П6.6) аналогично визуальной погрешности измерения напряжения ΔU_Y .

Измерение частоты

Измерение частоты с помощью ЭЛО широко распространено, несмотря на наличие цифровых частотомеров. Измерение частоты исследуемого напряжения обычно сводят к измерению интервала времени, т.е. периоду, косвенным методом. Подобное измерение целесообразно производить при сложной форме исследуемого напряжения, так как в этом случае не всегда можно использовать частотомер.

Основные функции органов управления осциллографом

Вид передней панели используемого в работе виртуального аналогового электронно-лучевого осциллографа приведен на рис. П6.3. Поскольку надписи на ней сделаны на английском языке, в ниже приведенном описании ЭЛО приводится их перевод, а также описание органов управления и их назначения. Для облегчения работы с ЭЛО и ориентации органы управления функционально связанных узлов объединены в сектора, выделенные цветом и обведенные сплошной линией (см. рис. П6.3).

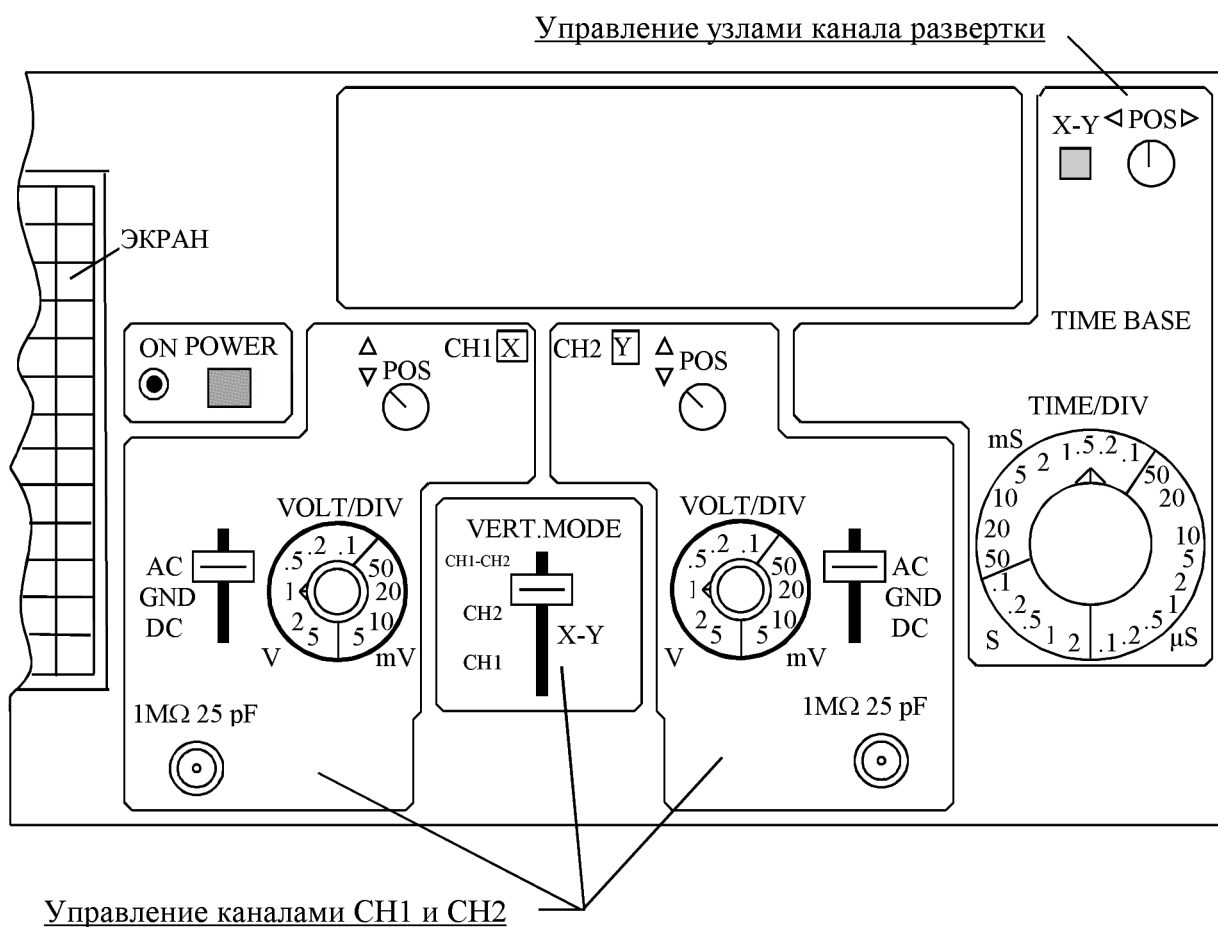


Рис. П6.3. Передняя панель аналогового осциллографа АСК-1021

Органы управления работой каналов находятся в двух симметрично расположенных областях голубого цвета и в области серого цвета,

расположенной между ними (см. рис. П6.3). В каждой из первых двух областей имеется:

- 1) Гнездо для подключения входного кабеля с обозначением $1\text{ M}\Omega\ 25\text{pF}$ (входное сопротивление и входная ёмкость).
- 2) Рычажный переключатель на три позиции:
 - AC – включается разделительный конденсатор, пропускающий только переменную составляющую входного напряжения (закрытый вход);
 - GND – входной сигнал отключён, вход замкнут на землю, т.е. общую точку схемы АО;
 - DC – закорачивается разделительный конденсатор, обеспечивая открытый вход для постоянной составляющей входного напряжения.
- 3) Переключатель с двумя круглыми соосными ручками с обозначением над ним VOLT/DIV (В/дел). Нижняя – на 10 положений со значениями K_Y от 5 В/дел (крайнее против часовой стрелки) до 5 мВ/дел (крайнее по часовой).
- 4) Ручка POS (положение) с двумя стрелками, направленными вверх и вниз для плавного перемещения изображения вверх или вниз без изменения размеров.

Между двумя голубыми областями находится серая область с рычажным переключателем VERT. MODE (режим по вертикали) на 3 позиции (см. рис. П6.3):

- а) CH1-CH2 – на экран выведены изображения напряжений, поданных на входы обоих каналов (не требуется использовать в данной лабораторной работе);
- б) CH2 – то же, что и канал № 1, но на вход канала № 2 (или канал Y); в этой позиции справа от переключателя есть ещё второе обозначение X–Y: переключатель находится в этой позиции в режиме X–Y; данный режим не используется в текущей лабораторной работе.
- в) CH1 – на экран выведено изображение напряжения, поданного на вход канала № 1 (или канала X);

Органы управления каналом развёртки расположены в голубой области справа (см. рис. П6.3), названной (TIME BASE). В ней помещены:

- 1) Переключатель коэффициента горизонтального отклонения TIME/DIV на 23 значения от 2 с/дел. (крайнее положение против часовой стрелки) до 0,1 мкс/дел. (крайнее по часовой).
- 2) Ручка для плавного перемещения изображения направо или налево без изменения размеров. Над ней обозначение POS с двумя стрелками, направленными направо и налево.
- 3) Красная квадратная кнопка с обозначением X–Y. Если её нажать, то будет установлен режим X–Y, при этом канал развёртки входных напряжений выключается (присутствует на стенде, но для выполнения лабораторной работы не используется).

Режимы работы осциллографа

Всего предусмотрено несколько возможных режимов работы осциллографа: одноканальный, двухканальный с временной развёрткой, двухканальный режим X–Y (для построения фигур Лиссажу). В рамках данной лабораторной работы и учебно-методического пособия в целом, рассмотрен только одноканальный режим работы осциллографа. Остальные режимы при выполнении текущей работы не используются.

В общем случае, при работе осциллографа в одноканальном режиме можно выбрать любой из двух каналов. Отметим, что все последующие действия следует производить только для канала № 1 (канал X). Несмотря на то, что канал № 2 визуально присутствует на виртуальном стенде, он недоступен для пользователя, его не требуется использовать при выполнении лабораторной работы.

Перед началом работы рекомендуется произвести соответствующую настройку. Для того, чтобы иметь возможность оперировать с осциллографом в выбранном режиме, необходимо определённым образом установить описанные выше переключатели. Так, переключатель AC-GND-DC (канал № 1, X) должен иметь позицию AC или DC (в зависимости от того, требуется ли исключить постоянную составляющую входного напряжения, или нет). Для первичного регулирования положения изображения осциллограммы сигнала на экране осциллографа может быть полезным перевести переключатель AC-GND-DC в позицию GND. В этом случае быстрый поиск нулевого потенциала исследуемого сигнала может существенно облегчить дальнейшую настройку положения изображения сигнала на экране. Другой переключатель – VERT MODE должен быть установлен в позицию CH1 для выбранного режима работы (канал № 1, X).

Общие рекомендации при работе с осциллографом АСК-1021 в одноканальном режиме

Исходное положение кнопок и ручек:

- Кнопки POWER и X–Y не нажаты.
- Все три ручки POS примерно в средних положениях.

Настройка:

- Установите переключатели в указанные позиции:
 - AC-GND-DC (канала CH1) \Rightarrow GND;
 - VERT MODE \Rightarrow CH1.
- Нажмите красную кнопку POWER в чёрной области; если всё в порядке, слева от неё должен засветиться красный индикатор ON.

- Примерно через 20 секунд на экране должна появиться горизонтальная линия. Ручкой POS в области канала CH1 установите её в середине экрана.

Присоедините кабель с исследуемым напряжением к гнезду 1 MΩ 25 pF одного из каналов.

- Установите переключатели в указанные позиции:
 - AC-GND-DC \Rightarrow AC или DC;
 - VERT MODE \Rightarrow CH1.
- Установите переключатель масштаба по вертикали VOLT/DIV в канале в положение 5 В/дел, а переключатель масштаба по горизонтали TIME/DIV в положение 0,5 мс/дел.
- Поворачивая ручку переключателя VOLT/DIV по часовой стрелке, выберите такое её положение, при котором измеряемый по вертикали отрезок, например, соответствующий размаху (двойной амплитуде) синусоиды займёт как можно бóльшую часть экрана по вертикали. При этом пользуйтесь ручкой POS в канале для перемещения изображения вверх – вниз без изменения размеров.
- Поворачивая ручку переключателя TIME/DIV в ту или другую сторону, выберите такое её положение, при котором измеряемый по горизонтали отрезок, например, соответствующий периоду синусоиды займёт как можно бóльшую часть экрана. При этом пользуйтесь ручкой POS в области развёртки для перемещения изображения вправо – влево без изменения размеров.

Измерение с помощью ЭЛО амплитуды и периода сигнала в п.1 задания:

- Установить AC-GND-DC \Rightarrow AC.
- Выполнить указания по первичной настройке осциллографа для одноканального режима работы и получить устойчивое и максимально масштабное изображение сигнала. Измерить линейные отрезки, соответствующие амплитудному значению напряжения и периоду сигнала. Рассчитать измеренные параметры.

Приложение 7. Моделирование цифрового частотомера в пакете Simulink

Имитационное моделирование цифрового частотомера позволяет выполнять анализ работы отдельных его блоков, а также оценку погрешности измерения частоты (или периода) для входных сигналов сложной формы. Данный подход позволяет обойтись без трудоемкой разработки прототипа измерительного устройства и применения дорогостоящих средств генерации сигнала (генераторов) и средств его отображения (осциллографов).

Процесс создания имитационной модели, как правило, предшествует разработке его физического прототипа и позволяет опробовать различные модификации с целью определения оптимальной. Кроме того, наличие имитационной модели позволяет подтвердить правильность полученных аналитических соотношений. Для построения имитационной модели устройств может быть эффективно использован пакет имитационного моделирования Simulink, который является составной частью среды Matlab.

Режим измерения частоты

На Рис. П7.1 показана общая схема применения имитационной модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения частоты. Внутреннее устройство данной модели показано на Рис. П7.2. Структурные элементы модели соответствуют элементам структурной схемы, показанной на Рис. 1 основной части описания принципов работы устройства. В модели на Рис. П7.2 реализованы блоки «Формирующее устройство», «Генератор опорной частоты», «Электронный ключ», «Делитель частоты», «Счетчик импульсов», «Цифровое отсчетное устройство», информация, устройство и принципы функционирования которых будет дана ниже в данном приложении. Каждый из указанных блоков реализован в виде маскированной Simulink-подсистемы и соответствует аналогичному блоку исходной структурной схемы Рис. 1.

На Рис. П7.3 показаны временные диаграммы работы модели для случая входного синусоидального сигнала амплитудой 3 В, частотой 50 Гц и начальной фазы, равной $\pi/6$. Для удобства представления диаграмм, время счета выбрано равным 10^2 мс, а период меток времени $T_{\text{ТАКТ}} = 10^{-6}$ с.

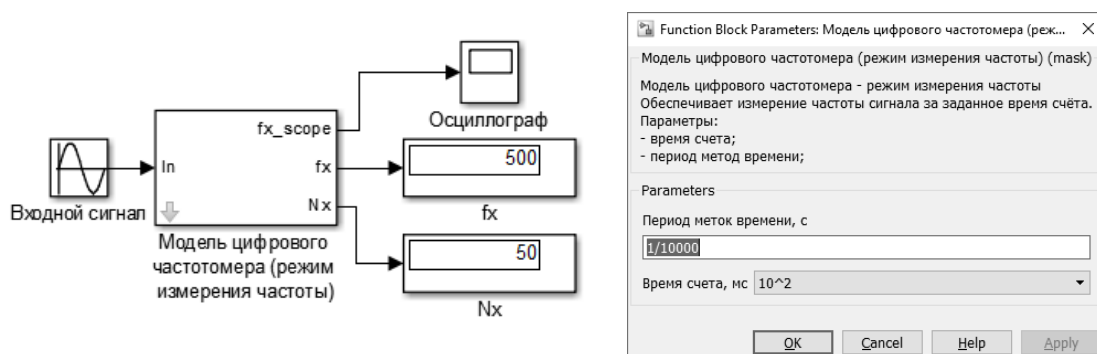


Рис. П7.1. Схема применения модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения частоты (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

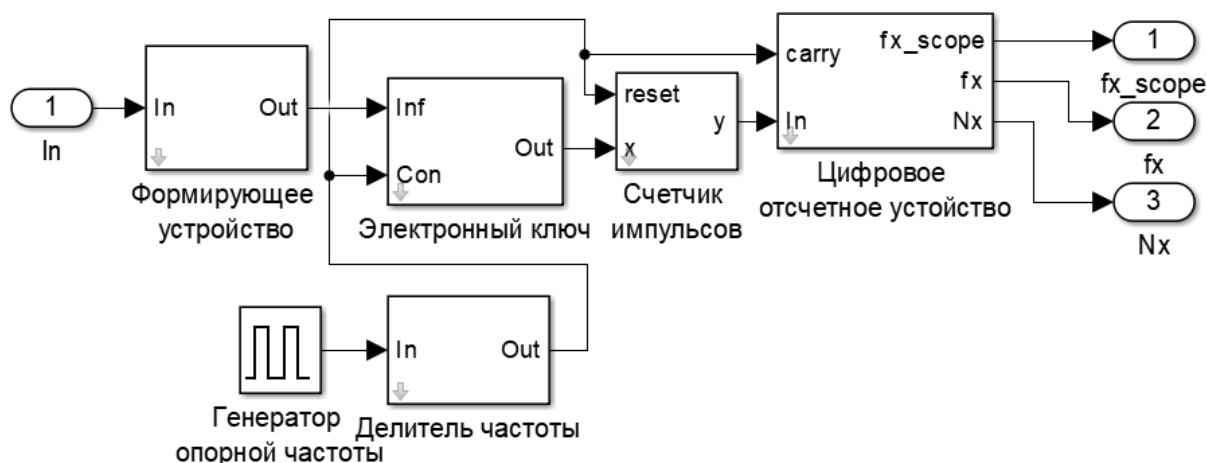


Рис. П7.2. Схема модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения частоты

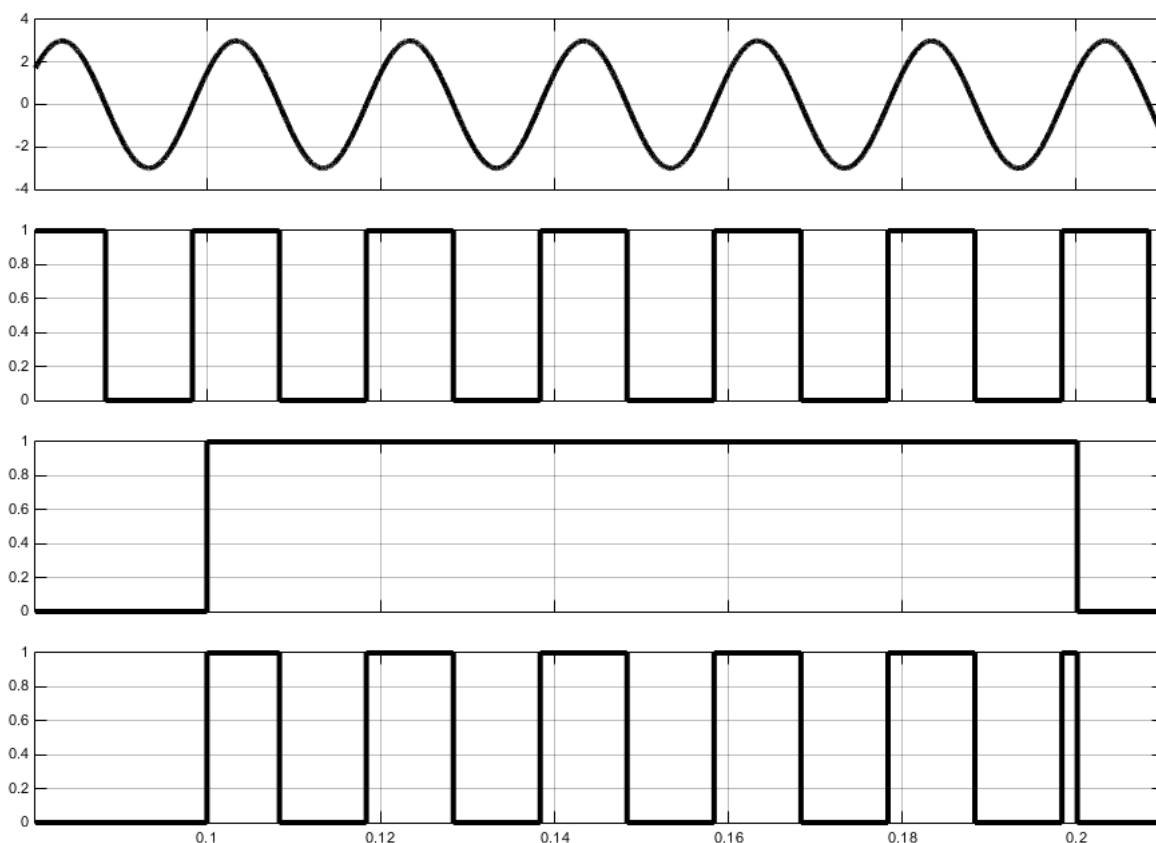


Рис. П7.3. Временные диаграммы работы имитационной модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения частоты для случая входного синусоидального сигнала

Формирующее устройство.

Схема модели блока «Формирующее устройство» показано на Рис. П7.4 (слева). Данный блок оформлен в виде маскированной подсистемы и не имеет параметров, задаваемых пользователем. Диалоговое окно с пользователем показано на Рис. П7.4 (справа). Блок «Формирующее устройство» состоит из двух основных узлов: аналогового фильтра верхних частот и блока

определения знака текущего значения входного сигнала. Аналоговый фильтр верхних частот применяется для подавления постоянной составляющей входного сигнала. В данной модели реализован фильтр Баттерворта пятого порядка с частотой среза, равной 10 Гц. Для реализации фильтра в модели был применен стандартный блок «Analog filter design».

Диапазон изменения выходного сигнала для блока «Sign» равен $[-1 \div 1]$ В. Для обеспечения уровней выходного сигнала значениям логических «нуля» и «единицы» может быть использована дополнительная схема, включающая блоки «Bias» и «Gain», как это показано на Рис. П7.4. Выходным сигналом формирующего устройства является цифровой сигнал прямоугольной формы с частотой, равной частоте входного сигнала.

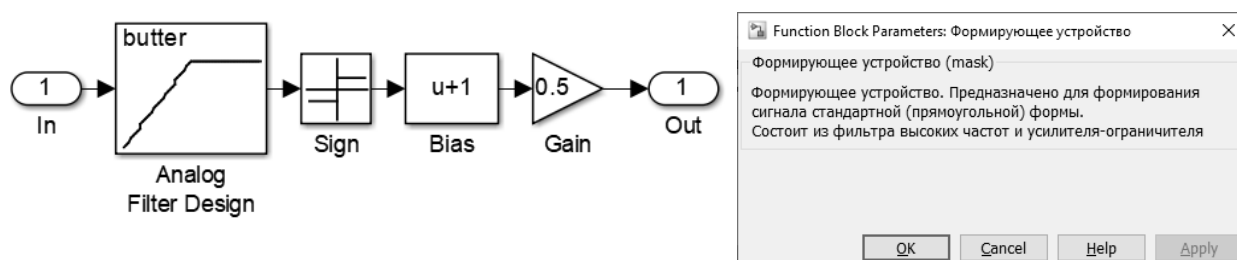


Рис. П7.4. Схема имитационной модели блока «Формирующее устройство» (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

Генератор опорной частоты.

Блок «Генератор опорной частоты» построен на основе стандартного блока «Pulse Generator» библиотеки «Sources» пакета Simulink. Частота выходного сигнала генератора выбрана равной 10 МГц, что соответствует частоте импульсов тактирования частотомера ЧЗ-75 (см. Приложение 2).

Электронный ключ.

На Рис. П7.5 показана схема модели блока «Электронный ключ». Данная модель построена на основе блока «Switch» библиотеки «Commonly Used Blocks» пакета Simulink. Входы «Inf» и «Con» модели соответствуют информационному и управляющему сигналам «Электронного ключа». Коммутация осуществляется в двух вариантах: информационный сигнал с входа «Inf» поступает на выход при значении управляющего сигнала «Con», отличного от нуля; на выход поступает нулевой сигнал при значении управляющего сигнала «Con», отличного от нуля.

Делитель частоты.

На Рис. П7.6 показана схема модели блока «Делитель частоты». Данная модель построена на основе блоков выборки и хранения («Sample and Hold» библиотека «DSP System Toolbox»), сравнения «Compare To Constant» (библиотека «Logic and Bit Operations»), электронных ключей («Switch»

библиотеки «Commonly Used Blocks»), задержки распространения сигнала («Delay», библиотека «Commonly Used Blocks») и исключающего ИЛИ («XOR», библиотека «Logic and Bit Operations»).

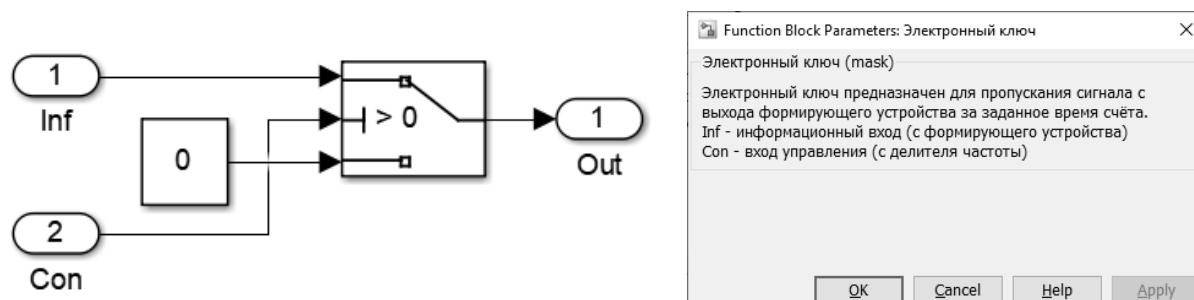


Рис. П7.5. Схема имитационной модели блока «Электронный ключ» (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

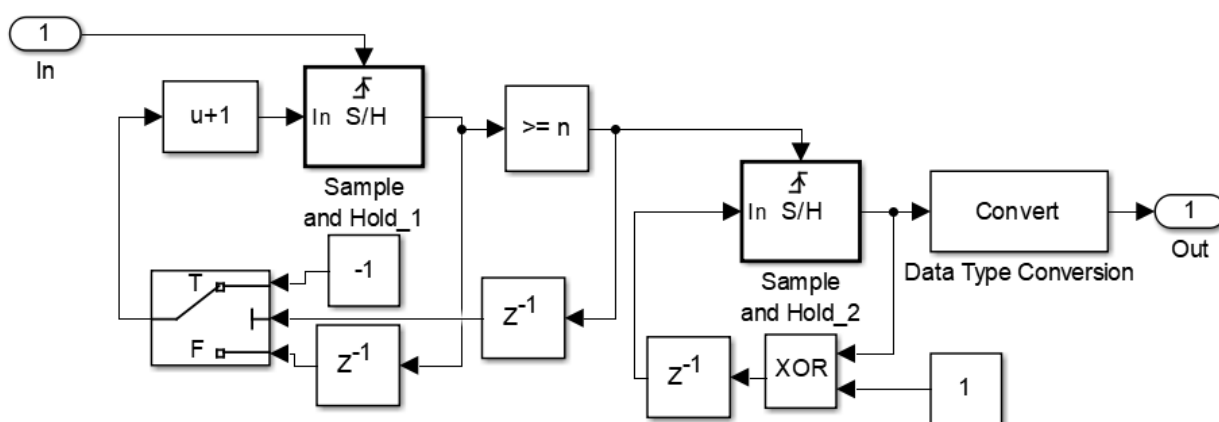


Рис. П7.6. Схема имитационной модели блока «Делитель частоты»

Левая часть схемы, состоящая из блока «Sample and Hold_1» и обратных связей предназначена для определения числа положительных перепадов (фронтов) входного сигнала, поступающего на порт «x». Для исключения возникновения «петель» в схеме применяется блок задержки распространения сигнала «Delay». Номинальное значение периода выходного сигнала генератора опорной частоты $T_{\text{ТАКТ}}$ используется для настройки данного блока.

Блок сравнения «Compare To Constant» служит для определения моментов времени, когда счетчик достиг заданного значения уставки $N = T_C / T_{\text{ТАКТ}}$ (где T_C – время счёта; $T_{\text{ТАКТ}}$ – период выходного сигнала генератора опорной частоты). Выходной сигнал блока сравнения используется для формирования выходного сигнала блока «Делитель частоты» и сброса счетчика импульсов, расположенного в левой части схемы.

Правая часть схемы предназначена для удержания уровня выходного сигнала постоянным до момента достижения счетчика очередного значения уставки N . Значение N соответствует коэффициенту деления рассматриваемого делителя частоты. Дополнительный блок «Data Type Conversion» (библиотека «Commonly Used Blocks») используется для преобразования типов данных: выход блока «Делитель частоты» и управляющий вход «Con» блока «Электронный ключ», рассмотренный выше.

Значение времени счета является параметром модели блока «Делитель частоты» и задается через диалоговое окно пользователя – см. Рис. П7.7. Вторым параметром является номинальное значение периода выходного сигнала генератора опорной частоты $T_{\text{ТАКТ}}$.

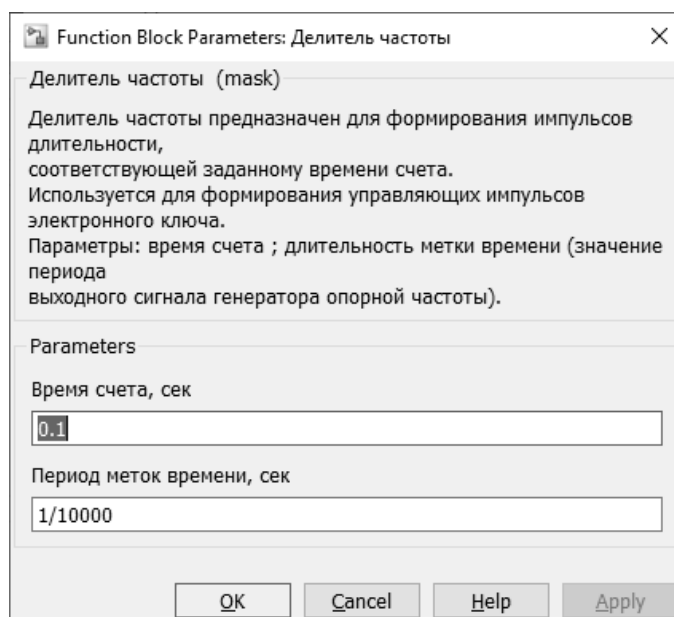


Рис. П7.7. Диалоговое окно пользователя для имитационной модели блока «Делитель частоты»

Счетчик импульсов.

Схема модели блока «Счетчик импульсов» показана на Рис. П7.8. Из сравнения блоков «Счетчика импульсов» и «Делитель частоты» видно, что первый является составной частью последнего. Данная модель построена на основе блоков «Sample and Hold» (библиотека «DSP System Toolbox»), электронных ключей («Switch» библиотеки «Commonly Used Blocks»). Принцип работы изложен выше в разделе «Делитель частоты».

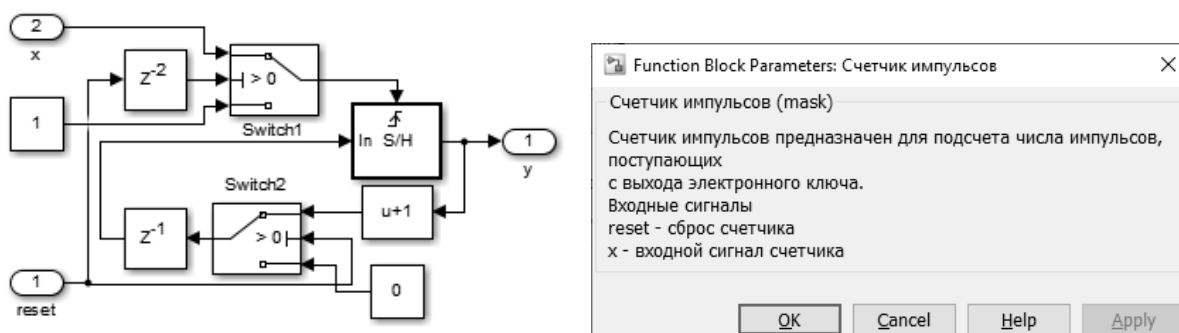


Рис. П7.8 Схема имитационной модели блока «Счетчик импульсов» (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

Блок имеет два входа: информационный «x» и сброса «reset». Номинальное значение периода выходного сигнала генератора опорной

частоты $T_{\text{ТАКТ}}$ является параметром данного блока и задается с помощью диалогового окна с пользователем. Данный параметр используется для настройки блока задержки («Delay», библиотека «Commonly Used Blocks»), который служит для исключения появления «петель» в схеме.

Схема сброса блока «Счетчика импульсов» построена аналогично схеме внутреннего сброса рассмотренного ранее блока «Делитель частоты».

Цифровое отсчетное устройство

На Рис. П7.9 показана схема имитационного моделирования «Цифрового отсчетного устройства». Схема состоит из блоков «Sample and Hold» (библиотека «DSP System Toolbox»), предназначенных для удерживания (буферизации) последнего результата измерения частоты и числа прошедших импульсов с блока «Электронный ключ». Последний полученный результат измерения частоты поступает на порт «fx», последний полученное число импульсов с выхода блока «Электронный ключ» поступает на порт «Nx». Дополнительный порт «fx_score» может быть использован для построения временных диаграмм текущего результата измерения частоты сигнала. Дополнительный входной сигнал «carry» служит для синхронизации работы буферов хранения результатов измерения. В качестве этого сигнала используется выходной сигнал блока «Делитель частоты», который является управляющим сигналом блока «Электронный ключ».

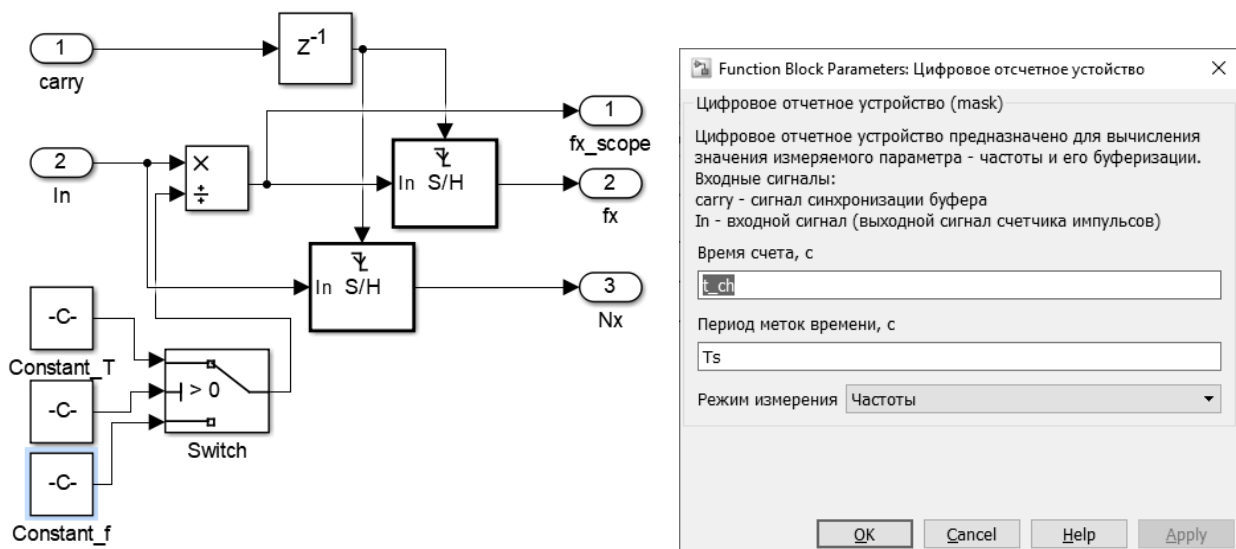


Рис. П7.9 Схема имитационной модели блока «Цифровое отсчетное устройство» (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

Расчет значения частоты входного сигнала выполняется на базе общего соотношения (2) описания принципов работы частотомера:

$$f_X = \frac{N_X}{T_C} = \frac{N_X}{n \cdot T_{\text{ТАКТ}}}, \quad (\text{П7.1})$$

где N_X – число импульсов (фронтов импульсов в рассматриваемом случае), прошедших на электронный ключ, на счетчик импульсов за время измерения; T_C – время счета; n – коэффициент деления делителя частоты; $T_{\text{ТАКТ}}$ – частота выходного сигнала генератора опорной частоты (частота тактирования).

Значение в блоке «Const_f» в соответствии с формулой (П7.1) определяется как $T_C = n \cdot T_{\text{ТАКТ}}$.

Режим измерения периода

Аналогично режиму измерения частоты, рассмотренному выше, может быть смоделирован режим измерения периода. Как видно из сравнения структурных схем для режима измерения частоты (Рис. 1) и периода (Рис. 2), состав блоков устройства не изменяется (за исключением блока «Цифровое отсчетное устройство»), но меняется их взаимное расположение («Формирующее устройство» и «Генератор опорной частоты» меняются местами).

В режиме измерения периода по сравнению с режимом измерения частоты, меняется расчетное соотношение для вычисления значения периода:

$$T_X = \frac{N_X \cdot T_{\text{такт}}}{n}, \quad (\text{П7.2})$$

где N_X – число импульсов (фронтов импульсов в рассматриваемом случае) от генератора опорной частоты, прошедших на электронный ключ, на счетчик импульсов за время измерения; n – число усредняемых периодов (коэффициент деления делителя частоты); $T_{\text{ТАКТ}}$ – частота выходного сигнала генератора опорной частоты (частота тактирования).

В соответствии с формулой (П7.2) значение в блоке «Const_T» для режима измерения периода определяется как $n / T_{\text{ТАКТ}}$.

На Рис. П7.10 показана общая схема применения имитационной модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения периода. Внутреннее устройство данной модели показано на Рис. П7.11. Структурные элементы модели соответствуют элементам структурной схемы, показанной на Рис. 2 основной части описания принципов работы устройства.

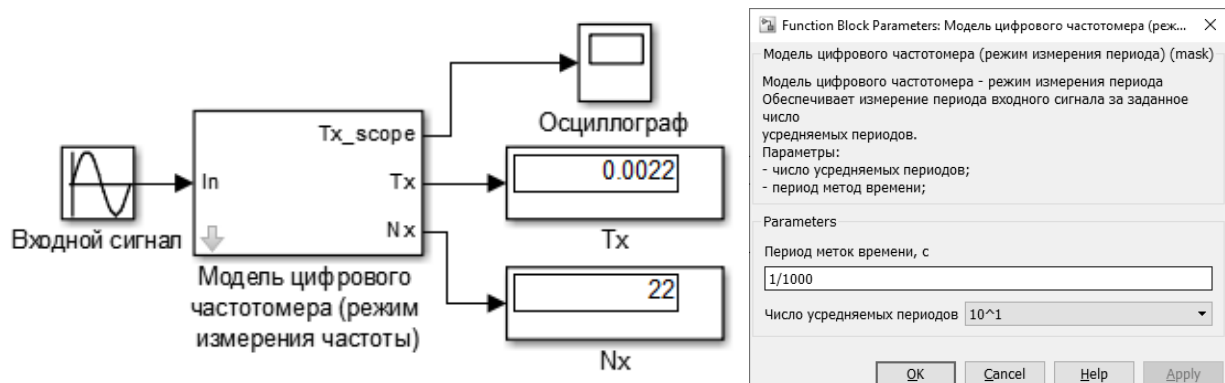


Рис. П7.10. Схема применения модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения периода (слева) и диалоговое окно пользователя (справа)

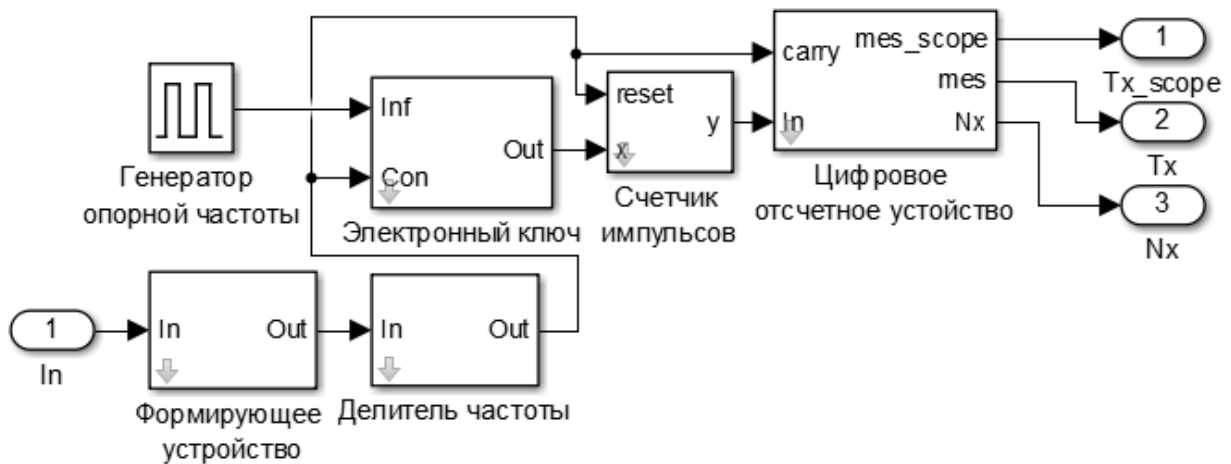


Рис. П7.11. Схема модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения периода

На Рис. П7.12 показаны временные диаграммы работы модели для случая входного синусоидального сигнала амплитудой 3 В, частотой 500 Гц и начальной фазы, равной $\pi/6$. Для удобства представления диаграмм, число усредняемых периодов выбрано равным 10 мс, а период меток времени $T_{\text{ТАКТ}} = 10^{-3}$ с.

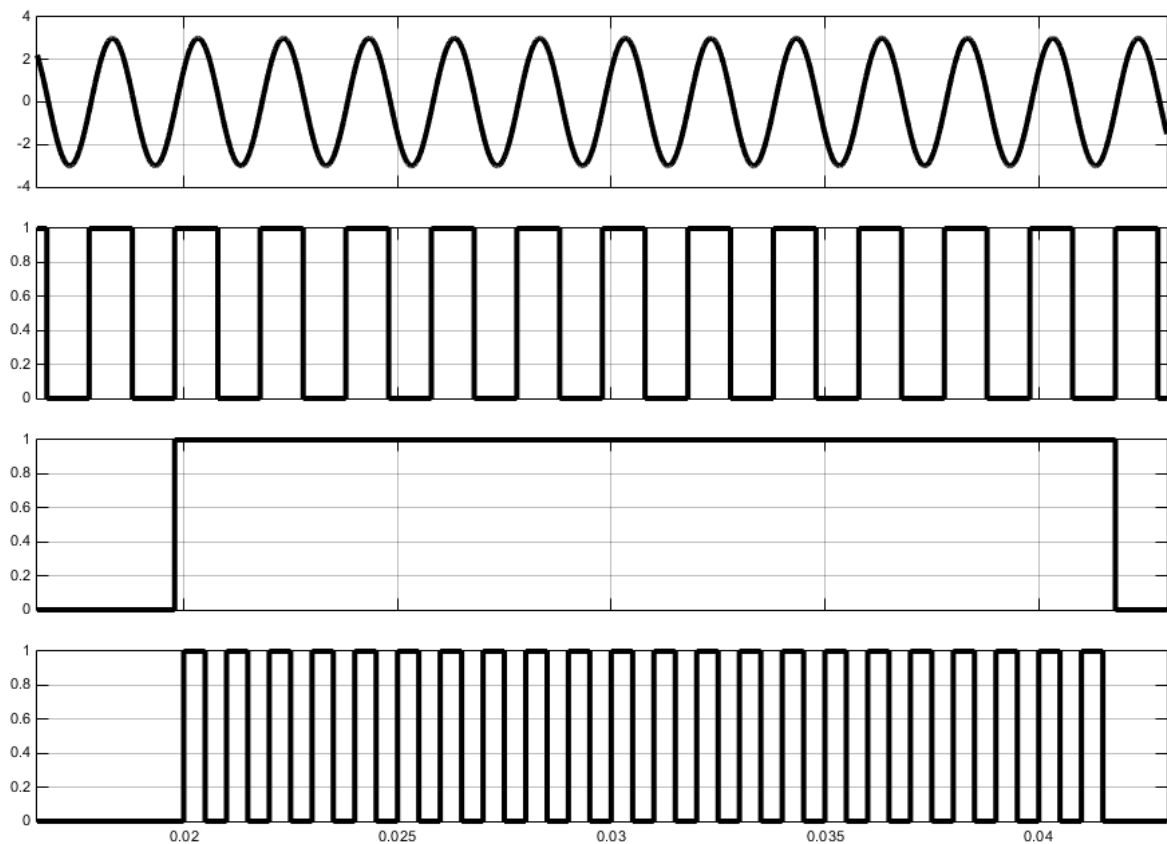


Рис. П7.12. Временные диаграммы работы имитационной модели цифрового частотомера ЧЗ-75 в режиме измерения периода для случая входного синусоидального сигнала

Список рекомендуемой литературы

Основная

1. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabView для всех. 4-е издание переработанное и дополненное – М.: ДМК Пресс, 2015. – 904 с.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – Спб.: Питер, 2007. – 751 с.: ил.
3. G. D'Antona and A. Ferrero, Digital Signal Processing for Measurement Systems. Theory and Applications. New York, NY, USA: Springer, 2006.
4. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерения. – М.: Высшая школа, 2001. – 205 с.
5. Сайт National Instruments. – URL: <https://www.ni.com> (дата обращения 30.10.2021).
6. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК, 2016. – 976 с.

Дополнительная

1. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с., ил.
2. Электрические измерения / Байда Л. И., Добротворский Н. С., Душин Е. М. и др.: Под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392с.
3. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов, – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей, – М.: Наука, 1969. – 576 с.
5. Кончаловский В.Ю., Купершмидт Я.А., Сыропятова Р.Я., Харченко Р.Р. Электрические измерительные преобразователи. / Под ред. Р.Р. Харченко. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 408 с.
6. Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. II. Algorithms and applications // Proceedings of the IEEE. – 1992. – Vol. 80, issue 4. – Pp. 540–568.
7. Begovic M.M., Djuric P.M., Dunlap S., Phadke A.G. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8, issue 2. – Pp. 480–486.

Учебное издание

Герасимов Сергей Игоревич
Долгачёва Екатерина Александровна
Желбаков Игорь Николаевич
Иваненко Кирилл Андреевич
Серов Андрей Николаевич
Чумаченко Дмитрий Анатольевич

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ИНТЕРВАЛОВ ВРЕМЕНИ

Практикум

Редактор С.И. Герасимов