

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине
“Приборы и техника радиоизмерений”

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА КОЛЕБА- НИЙ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА

Санкт-Петербург
2010

В работе исследуются способы измерения частоты и периода электрических сигналов методом дискретного счета. Изучаются основные структурные схемы частотомеров и их режимы работы. Проводится проверка генераторов НЧ и ВЧ с помощью вычислительного микропроцессорного частотомера Agilent 53181A. Измеряются распределение погрешности дискретности и нестабильность частоты генераторов.

1.1. Принцип действия и структурная схема электронно-счетного частотомера

Нахождение частоты f периодических сигналов лежит в основе многочисленных измерительных задач. Это определяет многообразие способов измерения частоты. Наиболее часто в настоящее время используют *метод дискретного счета*. Его принцип заключается в подсчете за известный (образцовый) интервал времени $T_{\text{сч}}$ числа импульсов N , сформированных из входного сигнала неизвестной частоты f_x . Тогда измеряемую частоту (точнее, ее среднее значение за время $T_{\text{сч}}$) можно определить по формуле

$$f_x \approx N/T_{\text{сч}}. \quad (1)$$

Метод дискретного счета является разновидностью метода сравнения - результат показывает, во сколько раз неизвестная частота больше образцовой $f = 1/T_{\text{сч}}$. Значение N соответствует целому числу периодов $T_x = 1/f_x$, укладывающихся в интервале $T_{\text{сч}}$.

Приборы, основанные на методе дискретного счета, называют *электронно-счетными частотомерами* (ЭСЧ), а в англоязычной литературе electronic counters. Современные ЭСЧ — это многофункциональные приборы для измерения частотно-временных параметров сигналов (частоты, периода, числа импульсов, временных интервалов и пр.). ЭСЧ различаются количеством измеряемых параметров, диапазоном и точностью измерений. Микропроцессорные ЭСЧ имеют расширенные функциональные возможности, повышенную точность, высокий уровень автоматизации и ориентированы на использование в измерительных системах.

Упрощенная структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты представлена на рис. 1.

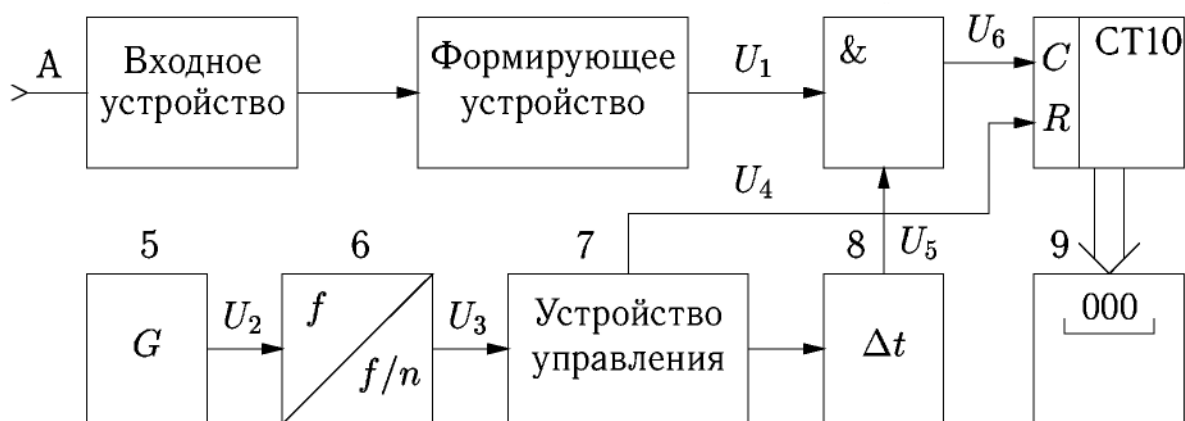


Рис. 1. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты

Сигнал неизвестной частоты f_x подают на вход А. Сигнал образцовой частоты $f_{кв} = 1/T_{кв}$ вырабатывается высокостабильным кварцевым генератором 5. *Входное устройство* частотомера содержит дискретный аттенюатор, схему автоматической регулировки уровня сигнала. Входное устройство должно обеспечивать достаточно большое входное сопротивление ЭСЧ (порядка 1 МОм). Для ВЧ-измерений используют стандартное входное сопротивление 50 Ом. Частотомер при этом включают как согласованную нагрузку линии передачи (соединительного кабеля).

Во входном устройстве предусматривают защиту прибора от перегрузок, а также режим "закрытого" входа. В этом режиме сигнал подается на частотомер через конденсатор, отделяющий его постоянную составляющую (например, напряжение питания).

Формирующее устройство представляет собой измерительный преобразователь формы сигнала. Оно содержит усилитель-ограничитель с регулируемым порогом срабатывания, дифференцирующую цепочку и импульсный диодный ограничитель. Задача устройства - преобразовать сигнал произвольной формы в короткие импульсы U_1 , частота повторения которых равна частоте входного сигнала (рис. 2). Так как именно эти импульсы в дальнейшем поступают на счетчик, то их называют *счетными импульсами*.

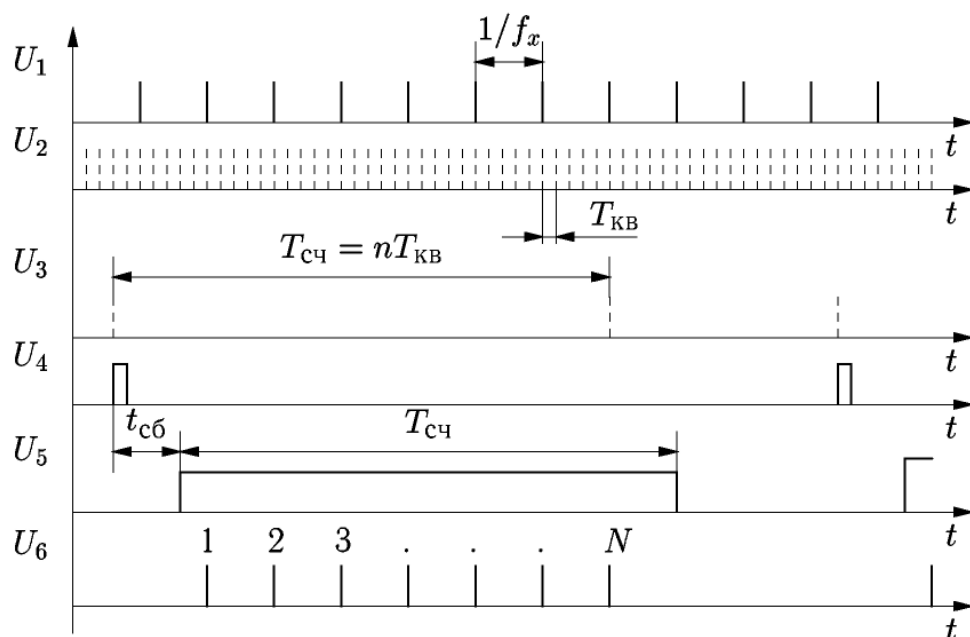


Рис. 2. Осциллограммы сигналов ЭСЧ в режиме измерения частоты

Временной селектор — это логический элемент "И", который выделяет из входной последовательности пачку N импульсов, укладываемых в образцовый интервал $T_{сч}$ (*временные ворота*). Длительность ворот $T_{сч}$ формируют делением частоты сигнала *кварцевого генератора 5*. В ЭСЧ используют термостатированные генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, частота генератора составляет обычно 10 или 100 МГц. Работа термостата контролируется по индикатору на лицевой панели прибора. Установку $T_{сч}$ производят делением частоты $f_{кв}$ с помощью *декадного делителя частоты 6*. Коэффициент деления выбирают из соотношения $n = 10^k$, $k = 0, 1, 2, \dots$. При этом время счета выбирают кратным 10:

$$T_{сч} = nT_{кв} = T_{кв} 10^k.$$

Устройство управления 7 позволяет выбрать режим работы ЭСЧ. Типовым является режим *периодического запуска*, когда измерение повторяется через регулируемый интервал времени (иногда его называют *временем индикации*). В ряде случаев используют *одиночный запуск* — измерение выполняется при поступлении на вход внешнего запуска ЭСЧ импульса синхронизации или запуска. *Ручной запуск* осуществляют нажатием специальной кнопки.

В начале измерения на счетчик из устройства управления посылается импульс сброса U_4 . Одновременно триггером устройства управления формируется прямоугольный строб-импульс длительностью $T_{сч}$. Этот импульс сдвигается во времени в *устройстве задержки 8* на небольшое

время $t_{сб}$, необходимое для сброса счетчика. После задержки строб-импульс U_5 (иногда его называют *временные ворота*) подается на селектор и открывает его. Число импульсов U_6 , проходящих через временной селектор на *счетчик 4*, равно $N = \text{int} [f_x T_{сч}] \pm 1$, где скобки $\text{int} []$ означают целую часть числа.

Процесс измерения частоты сводится к подсчету числа импульсов N , попадающих во временные ворота $T_{сч}$, дешифрации показаний счетчика и индикации его состояния на *цифровом табло 9*. Если выбрать частоту кварцевого генератора в виде $f_{кв} = 10^p$ [Гц], где p — целое число, то с учетом коэффициента деления $n = 10^k$ получим

$$f_x \sim 10^{(p-k)} N \quad [\text{Гц}].$$

Таким образом, число сосчитанных импульсов пропорционально измеряемой частоте с коэффициентом, кратным 10. Это позволяет упростить масштабирование результатов измерения. На цифровом индикаторе предусматривают знак десятичной точки, положение которой связано с коэффициентом деления частоты кварцевого генератора n . Кроме этого на индикатор выводят обозначения производных единиц (кГц, МГц). Таким образом, ЭСЧ дает прямые показания измеряемой частоты, выраженной в системных единицах, хотя фактически на индикатор поступает число сосчитанных импульсов N .

Такой режим работы частотомера называют *методом прямого счета* (direct counting). Его особенностью является то, что количество значащих цифр в результате зависит от измеряемой частоты — чем больше частота, тем больше значащих цифр выводится на табло прибора.

Верхняя граница измеряемых частот определяется быстродействием основных элементов схемы, и прежде всего - счетчика. Она составляет обычно сотни МГц. Для расширения рабочего диапазона частот в область СВЧ применяют быстродействующие делители частоты входного сигнала, а также преобразователи и переносчики частоты, выпускаемые в виде вставных блоков и отдельных приборов. Нижняя граница рабочего диапазона определяется допустимой погрешностью дискретности, которая рассмотрена в следующем разделе.

1.2. Погрешность измерения частоты методом дискретного счета

Предел основной погрешности измерения частоты методом дискретного счета включает две составляющие: *погрешность частоты кварцевого генератора* $\delta_{кв} = \pm \Delta f_{кв} / f_{кв}$ и *погрешность дискретности счета* $\delta_{д}$

$$\delta f = \pm (\delta_{кв} + \delta_{д}).$$

Первая составляющая является погрешностью меры частоты и определяется нестабильностью частоты кварцевого генератора, а также погрешностью его калибровки. Типовые значения нестабильности генератора ЭСЧ составляют $\pm(2.5 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-9})$ при изменении температуры в пределах $0 - 50^\circ$ и долговременная нестабильность частоты (старение) в пределах $\pm(3 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8})$ за месяц.

Погрешность дискретности является методической погрешностью сравнения. Она возникает из-за того, что длительность временных ворот $T_{сч}$ в общем случае не совпадает с целым числом периодов измеряемого сигнала. На рис. 3 для примера приведены крайние ситуации, когда во временные ворота попадают 9 импульсов (верхний график) или 7 импульсов (нижний график), что может произойти из-за нестабильности срабатывания временного селектора.

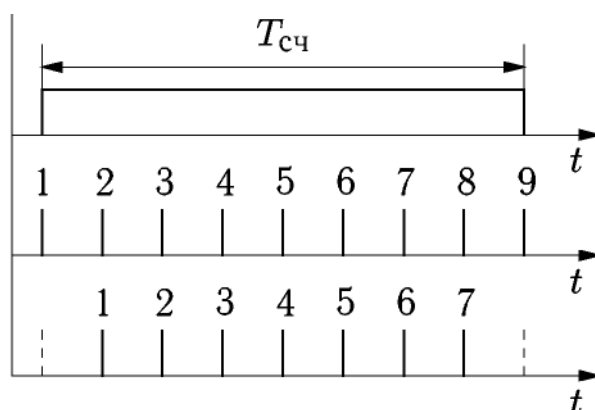


Рис. 3. Образование погрешности дискретности

Между тем число периодов входного сигнала, укладываемого во временные ворота, равно 8. Таким образом, максимальная ошибка при подсчете импульсов составляет ± 1 импульс, что соответствует единице последнего разряда счетчика. Это дает абсолютную погрешность дискретности при измерении частоты $\pm 1/T_{сч}$. Выбор длительности временных ворот определяет *разрешающую способность* ЭСЧ (возможность различать близко расположенные значения измеряемой частоты). Так, для $T_{сч} = 1$ с разрешающая способность равна 1 Гц (цена деления правого разряда индикатора). Разрешающая способность метода прямого счета не зависит от частоты входного сигнала. Относительная погрешность дискретности при этом обратно пропорциональна измеряемой частоте и равна

$$\delta_d = \pm 1/(f_x T_{сч}) = \pm 1/N. \quad (2)$$

На низких частотах δ_d является основной составляющей, определяющей точность измерений частоты методом дискретного счета.

Уменьшение погрешности дискретности осуществляют несколькими путями. Наиболее простой — увеличение длительности временных ворот $T_{сч}$ — приводит к росту времени измерения. На практике редко применяют время счета более 10 с. Другой способ — умножение частоты входного сигнала в целое число раз - требует применения дополнительных устройств (умножителей частоты). Поэтому наиболее часто используют переход от измерения частоты к измерению периода.

Упрощенная структурная схема ЭСЧ в режиме измерения периода представлена на рис. 4.

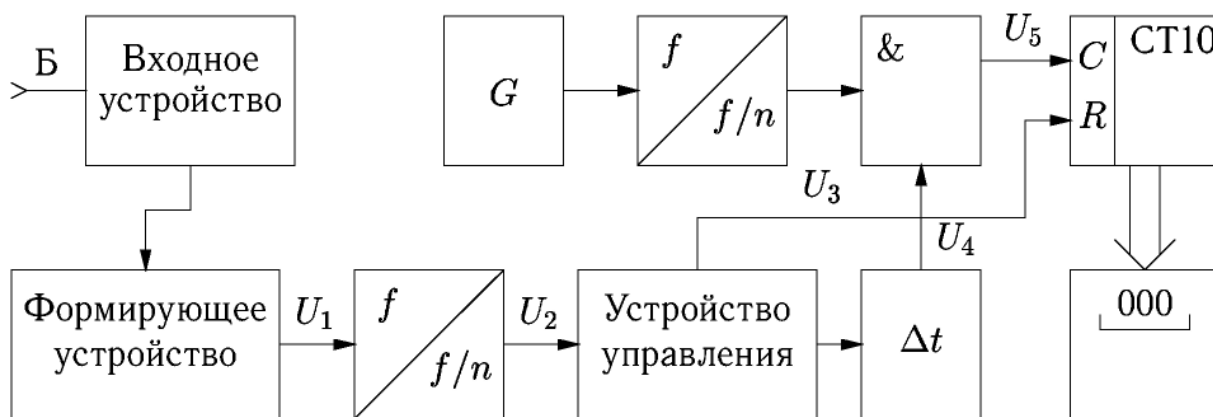


Рис. 4. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения периода

В отличие от предыдущего варианта, временные ворота образуют из исследуемого сигнала, который подают на вход Б частотомера. С помощью формирующего устройства его преобразуют в последовательность коротких импульсов U_1 с периодом T_x (рис. 5).

Длительность временных ворот $T_{сч}$ образуют делением частоты импульсов U_1 в m раз. Это эквивалентно увеличению периода

$$T_{сч} = mT_x.$$

Коэффициент деления делают кратным 10 ($m = 10^r$, $r = 0, 1, 2, \dots$).

Счетные импульсы формируют делением частоты образцового кварцевого генератора $f_{кв}$ в n раз. Их период T_m делают кратным 10, он является мерой временного интервала. Поэтому длительность T_m называют *меткой времени*:

$$T_m = n/f_{кв} = nT_{кв} = 10^{-s},$$

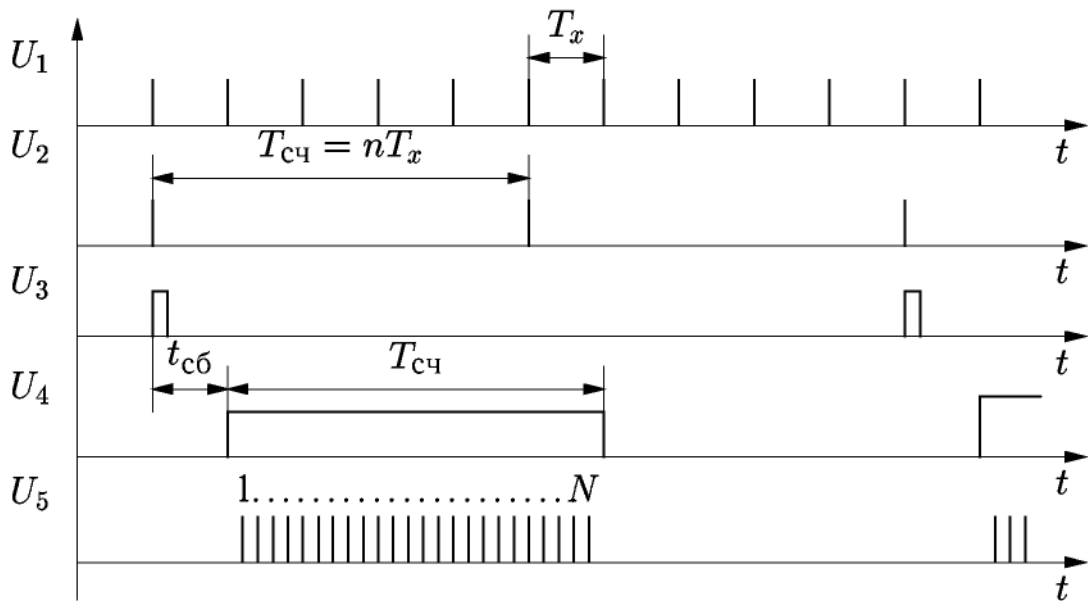


Рис. 5. Осциллограммы сигналов ЭСЧ в режиме измерения периода

где $s = 7,6,5, \dots$. Минимально возможная метка времени определяется быстродействием счетчика и обычно составляет $10 \dots 100$ нс. Таким образом, на счетчик поступают импульсы U_5 , прошедшие через временной селектор за время счета $T_{сч} = mT_x$,

$$N \approx T_{сч}/T_M = T_x 10^{(r-s)}.$$

На цифровом табло ЭСЧ предусматривают индикацию знака десятичной точки, положение которой (а также указатель размерности — с, мс, мкс) связано с регулировками делителей частоты. При этом прибор дает прямые показания измеренного периода.

Погрешность измерения периода содержит составляющую $\delta_{кв}$, определяемую нестабильностью кварцевого генератора (погрешность установки метки времени), и погрешность дискретности δ_d . Абсолютная величина погрешности дискретности равна $\pm T_M$ (не превышает по модулю периода счетных импульсов). Разрешающая способность ЭСЧ в режиме измерения периода определяется выбором метки времени. Максимальная относительная погрешность дискретности в данном случае равна

$$\delta_d = \pm T_M/T_x = \pm 1/N, \quad (3)$$

что совпадает с погрешностью (2) измерения частоты. С ростом измеряемого периода T_x число импульсов N растет и относительная погрешность снижается. Напомним, что в режиме измерения частоты все происходит наоборот. Следовательно, измерение периода дает малую погрешность на низких частотах, а измерение частоты — на высоких.

При измерении периода следует учитывать дополнительные источники погрешности, связанные с нестабильностью порога срабатывания формирующего устройства. Погрешность вызывает также случайный сдвиг фронта или среза временных ворот из-за наложения на сигнал внешних шумов. Это требует по сравнению с режимом измерения частоты более тщательной настройки входного устройства частотомера. Для измерения периода НЧ сигналов в условиях помех во входное устройство прибора включают сглаживающий фильтр.

Погрешность дискретности по своей природе случайна, и выражение (3) определяет ее максимальное значение. Для оценки среднеквадратической погрешности необходимо знать закон распределения плотности вероятности погрешности. Это позволяет произвести интервальную оценку среднеквадратической погрешности метода дискретного счета с заданной доверительной вероятностью.

Рассмотрим закон распределения погрешности дискретности при измерении периода T_x . Как следует из рис. 6, начало измеряемого интервала T_x (временные ворота) в общем случае не синхронизировано с метками времени.

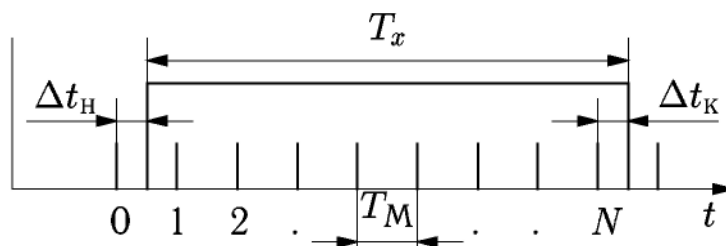


Рис. 6. Погрешность дискретности при измерении периода

Результат измерения включает два временных интервала, $\Delta t_н$ и $\Delta t_к$:

$$T_x = NT_M - \Delta t_н + \Delta t_к = NT_M - \Delta t_д,$$

где $\Delta t_д$ — общая абсолютная погрешность измерения периода T_x .

Начало временных ворот может с одинаковой вероятностью попасть в интервал времени от нулевого до первого счетного импульса. Эта погрешность подчинена равномерному закону с предельными значениями

— T_M и 0. Конец временных ворот с одинаковой вероятностью может попасть в любую точку между двумя счетными импульсами в пределах $0 \dots T_M$. Таким образом, общая погрешность порождается двумя случайными погрешностями с равномерными законами распределения $p(\Delta t_H)$ и $p(\Delta t_K)$ (рис. 7).

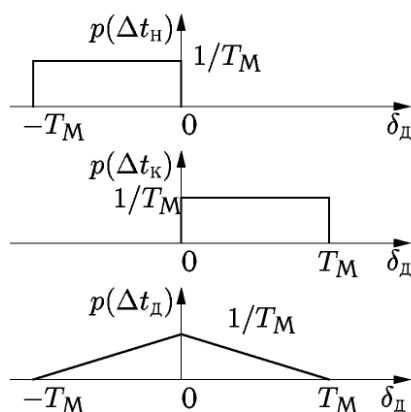


Рис.7. Закон распределения погрешности дискретности

Если интервал T_x неизвестен, то эти случайные погрешности независимы. Как следует из теории вероятности, закон распределения общей погрешности $p(\Delta t_д)$ определяется сверткой законов распределения $p(\Delta t_H)$ и $p(\Delta t_K)$. В результате получается треугольная форма зависимости (закон распределения Симпсона) с предельными значениями $\pm T_M$ (см. рис. 7):

$$p(\delta_д) = \begin{cases} \frac{\delta_д}{(T_M)^2} + \frac{1}{T_M} & \text{при } -T_M \leq \delta_д \leq 0 \\ -\frac{\delta_д}{(T_M)^2} + \frac{1}{T_M} & \text{при } 0 \leq \delta_д \leq T_M \end{cases}$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) для треугольного закона распределения равно $T_M/\sqrt{6}$, поэтому относительная среднеквадратическая погрешность дискретности определяется соотношением

$$\delta_д = \frac{СКО}{NT_M} = \frac{1}{\sqrt{6}N}$$

При экспериментальном определении закона на основе многократных измерений строят гистограмму — графическое изображение распределения погрешностей. Она представляет собой ряд смежных прямоугольников - карманов гистограммы (рис. 8).

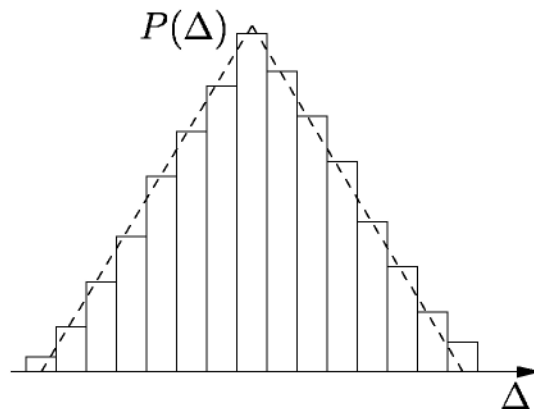


Рис.8. Гистограмма треугольного закона распределения погрешности

Ширина кармана равна заранее выбранному шагу значений погрешности, высота — числу опытных данных, попавших в данный интервал. После нормирования к общему числу опытов высота равна относительной частоте (оценке вероятности) попадания погрешности в карман. Огибающая гистограммы дает форму экспериментального закона распределения погрешности дискретности.

1.3.Электронно-счетный вычислительный частотомер с комбинированным методом измерения

В современных вычислительных частотомерах для определения частоты используют оба описанных выше варианта схем—

а) измерение периода путем подсчета тактовых импульсов кварцевого генератора и дальнейшее вычисление частоты по формуле $f_{ВХ} = 1/T_{ВХ}$ (рис.9 а),

б) прямой метод - путем подсчета входных импульсов в течение выбранного временного окна (рис. 9.б). Как показано выше, первый метод дает хорошую точность для низких частот $f_{ВХ}$ (то есть для больших $T_{ВХ}$). Второй метод дает хорошую точность только для относительно высоких частот $f_{ВХ}$. В первом случае для увеличения точности необходимо увеличивать тактовую частоту, во втором - увеличивать длительность временного окна.

Время измерения по первому методу составляет $T_{вх}$. Для второго метода оно постоянно и равно длительности временного окна. Комбинированный способ косвенного измерения частоты (reciprocal counting), применяемый в вычислительных частотомерах, позволяет сочетать оба способа.

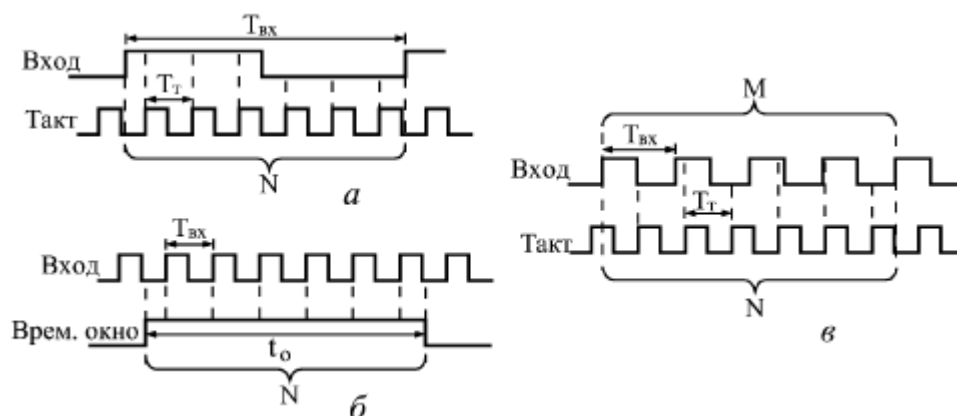


Рис. 9. Сравнение основных методов измерения частоты: через период (а), прямой (б) и комбинированный (в)

Суть его – измерение периода входного сигнала, умноженного в M раз (рис.9,в). Счетные импульсы меток времени подсчитываются в течение M полных периодов входного сигнала. При этом общее количество сосчитанных импульсов N определяет точность измерения (относительная погрешность не превышает $1/N$). Для получения высокой точности необходимо выбором числа M обеспечить, чтобы N было достаточно большим. Например, при $N > 100$ относительная погрешность не превысит 1%, а при $N > 1000$ она будет меньше 0,1%.

В вычислительных ЭСЧ ориентировочно задается требуемое время измерения $T_{сч}$ и определяется целое количество периодов входного сигнала M , укладывающееся в этот интервал. Затем подсчитывается количество тактовых импульсов, укладывающееся во временные ворота интервал $T_{сч} = M \cdot T_x$. Значение частоты входного сигнала вычисляется микропроцессором

$$f_{вх} = M / (N \cdot T_M)$$

Достоинством такого подхода является свободный выбор времени измерения (не обязательно кратный 10) и постоянная относительная погрешность измерения, не зависящая от входной частоты. Действительно, абсолютная погрешность измерения длительности интервала $M \cdot T_x$ равна длительности метки времени (периоду тактовых импульсов). Относительная погрешность измерения частоты примерно равна

$$\delta_f = \frac{T_M}{MT_X} = \frac{T_M}{T_{CЧ}}$$

Таким образом, относительная погрешность дискретности в комбинированном методе зависит от выбранного времени измерения и тактовой частоты меток времени и постоянна во всем диапазоне измерения. Поэтому разрешающую способность таких частотомеров указывают не в единицах частоты (Гц), а в количестве десятичных знаков результата для времени счета 1 сек (размерность [знак/секунда]). Так, для тактовой частоты 100 МГц погрешность измерения будет составлять 10^{-8} , а число знаков в результате – 8 знаков/сек.

Универсальный частотомер Agilent 53181A использует комбинированный метод измерения. Частотомер обеспечивает разрешение по частоте 10 знаков/секунда для частот до 225 МГц. Он предназначен для измерения частоты и периода непрерывных электрических сигналов при скорости до 200 измерений в секунду.

Прибор измеряет частоту и период сигналов в диапазоне частот от 0 Гц до 225 МГц при уровне входного сигнала от 0.04 до 5 В; период



Рис. 10. Частотомер Agilent 53181A – передняя панель

сигнала от 4,44 нс до 10 с. Долговременная нестабильность внутреннего кварцевого генератора прибора $\delta_{кв} = \pm 3 \cdot 10^{-7}$ за 30 суток. Температурная нестабильность генератора менее $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Возможно использование внешнего высокостабильного генератора опорной частоты.

Время счета можно установить от 1 мс до 1000с, предусмотрен режим автоматического выбора. Входное устройство обеспечивает два значения входных сопротивлений (50 Ом или 1 Мом), переключение

открытый/закрытый вход (DC/AC), включение/выключение ФНЧ с частотой среза 100 кГц, аттенюатор для уменьшения входного сигнала в 10 раз, переключение чувствительности (низкая, средняя или высокая - LOW/MED/HI).

Прибор обеспечивает следующие функции: автоматический, ручной и внешний запуск, установку и измерение уровней срабатывания формирующих устройств (что важно для импульсов прямоугольной формы и гармонических сигналов), автоматическую и ручную установку оптимального времени измерения, выбор требуемого количества значащих цифр. Режимы работы можно запомнить в регистрах прибора и при необходимости вызвать их из памяти. Предусмотрено 20 регистров сохранения состояния прибора.

Микропроцессор обеспечивает ряд математических операций над результатом измерения и статистическую обработку потока данных:

а) масштабирование результата (умножение на константу)

б) сдвиг результата (добавление константы)

в) проведение многократных измерений (количество опытов от 2 до 10^6) и обработку данных – расчет среднего отклонения, среднего значения, максимального и минимального результата. фильтрацию потока измеряемых данных по предварительно введенным пределам – выводятся только те результаты, которые попадают в эти пределы.

Предусмотрена возможность работы прибора в составе измерительных систем с интерфейсом GPIB (КОП- канал общего пользования, IEEE 488). Прибор полностью поддерживает систему программирования средств измерения SCPI-1992.0 (Standard Commands for Programmable Instruments). Это позволяет дистанционно управлять его работой и выводить результаты измерения на внешнее устройство обработки (компьютер) с большой скоростью (до 200 результатов в сек).

Упрощенная структурная схема прибора представлена на рис. 11.

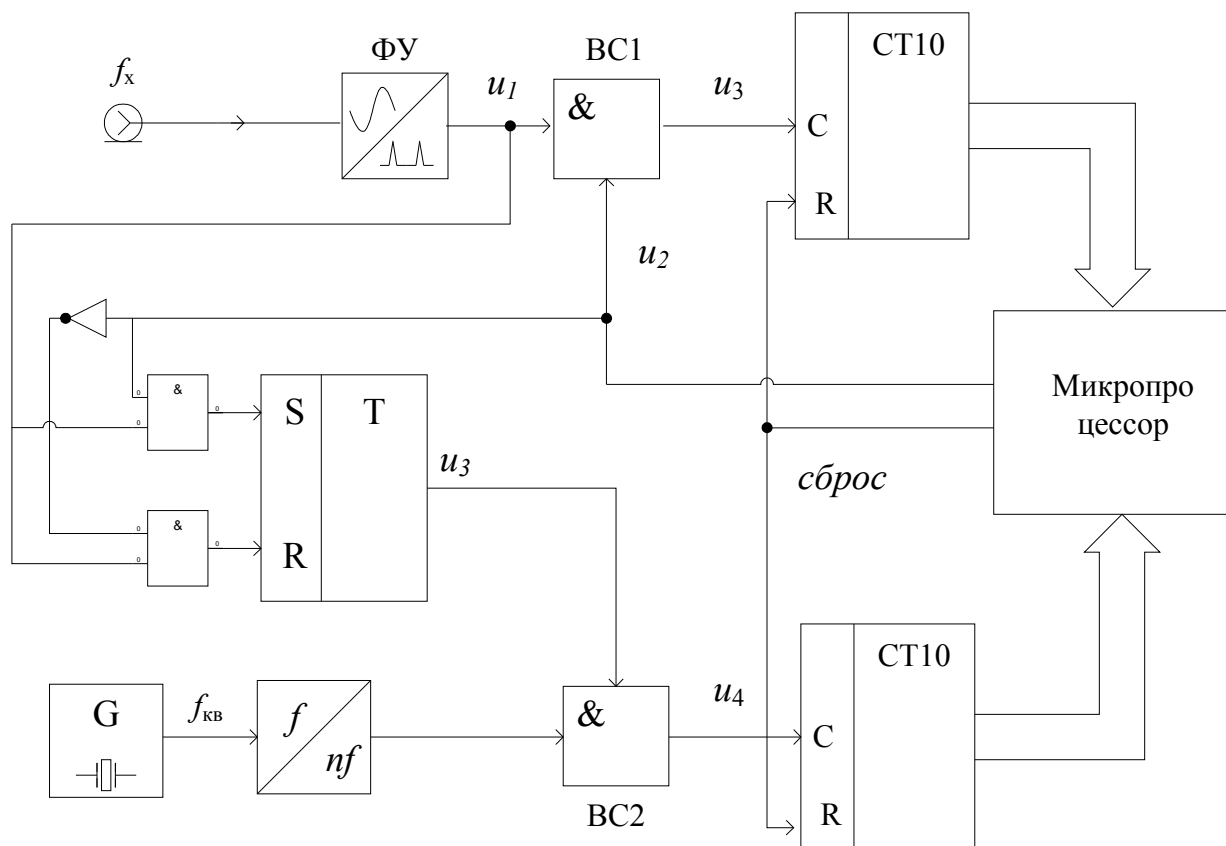


Рис.11. Упрощенная схема вычислительного частотомера

Входной сигнал с частотой f_x поступает на формирующее устройство, где преобразуется в последовательность импульсов u_1 (рис.12). Эти импульсы выделяются первым временным селектором. На него с микропроцессора подается строб-импульс u_2 . Длительность его устанавливается оператором, исходя из требуемого времени измерения (устреднения). Прошедшие M импульсов u_1 подсчитываются первым счетчиком. Одновременно с помощью двух схем И, инвертора и RS-триггера формируется импульс временных ворот u_4 длительностью $M \cdot T_x$. Второй временной селектор выделяет N счетных импульсов u_5 генератора меток времени T_m .

Количество входных импульсов M за время счета $T_{сч}$, а также количество импульсов N за время $M \cdot T_x$ поступают в микропроцессор, который рассчитывает измеряемую частоту

$$f_x = \frac{M}{N \cdot T_m}$$

В режиме измерения периода входного сигнала на индикатор выводится величина, обратная частоте.

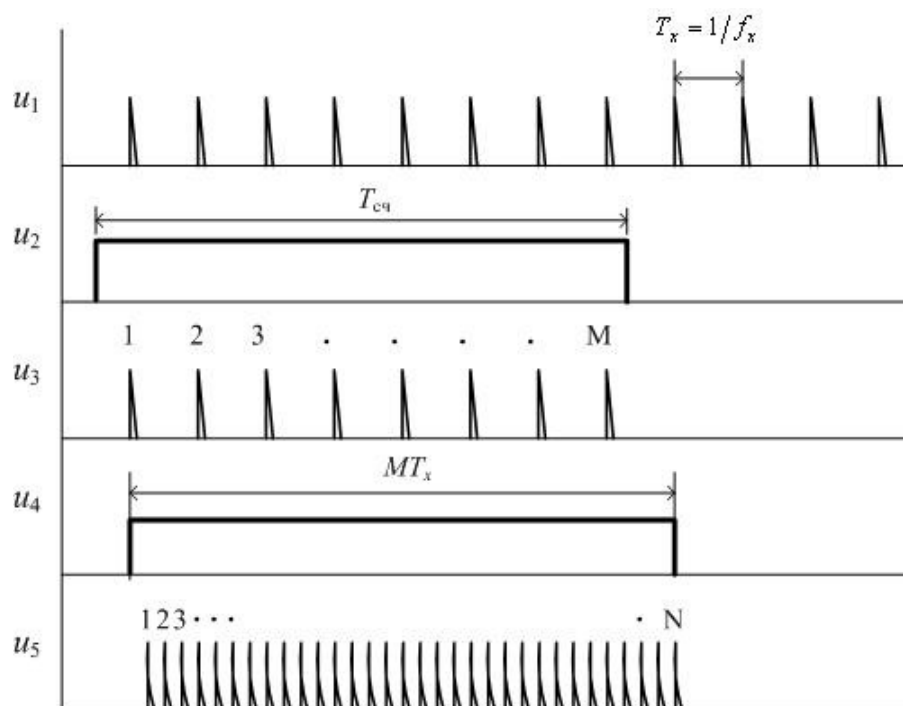


Рис.12. Временные диаграммы для комбинированного метода измерения частоты

Погрешность дискретности в данном методе зависит от минимальной длительности метки времени T_m (как в случае прямого измерения периода). При этом относительная погрешность измерения составляет

$$\delta f_x = \frac{T_m}{MT_x} \approx \frac{T_m M}{MT_{сч}} = \frac{T_m}{T_{сч}}$$

Здесь учтено, что

$$T_x = \frac{1}{f_x} \approx \frac{T_{сч}}{M}$$

Таким образом, погрешность дискретности определяется выбранным временем счета и длительностью метки времени и не зависит от измеряемой частоты. Эта погрешность определяет разрешающую способность частотомера. Для $T_{сч}=1$ сек и опорной частоты 10 МГц точность результата составляет 7 значащих цифр.

Увеличение точности в рассматриваемом частотомере достигнуто интерполяционным способом снижения погрешности дискретности. На рис. 13 показаны временные диаграммы частотомера, где измеряемый интервал $t_x = M \cdot T_x$ заполняется метками времени T_m . Счетчик фиксирует число импульсов N , попавших в этот интервал. Из рис.13 видно, что

$$t_x = t_0 + t_1 - t_2, \quad (4)$$

где $t_0 = NT_m$, t_1 — интервал между стартовым импульсом и нулевым

счетным импульсом, t_2 — интервал между стоповым импульсом и последним сосчитанным импульсом.

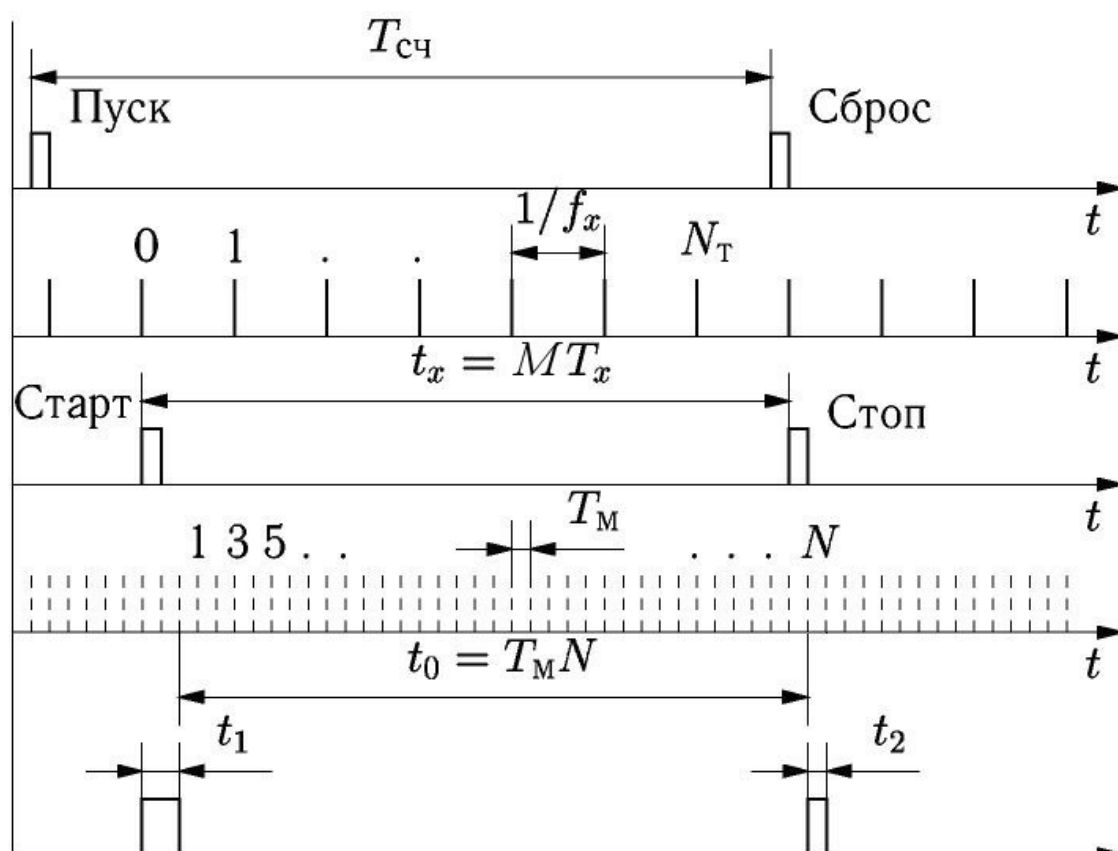


Рис. 13. Интерполяционный метод измерения временного интервала

Интервалы t_1 и t_2 определяют погрешность дискретности при измерении длительности всего t_x . Для их измерения используют расширители импульсов, построенных на схемах заряда и разряда конденсатора с разной скоростью. Интервалы t_1 и t_2 расширяются в целое число раз (например в 1000) и заполняются счетными импульсами с тем же периодом (меткой времени) T_M .

Количество импульсов N_1 и N_2 фиксируется счетчиками и, соответственно,

$$t_1 \approx N_1 T_M, \quad t_2 \approx N_2 T_M. \quad (5)$$

Результат измерения вычисляется микропроцессором на основании данных счетчиков M , N , N_1 и N_2 по формуле, вытекающей из соотношений (4), (5):

$$t_x = \{N + (N_1 - N_2)/1000\} T_M/M.$$

Максимальная погрешность при таком методе измерения соответ-

ствует погрешности дискретности для интервалов t_1 , t_2 и равна $\pm T_M / (1000 T_{сч})$. Таким образом, интерполяционный метод в этом случае обеспечивает повышение разрешающей способности на 3 порядка (до 10 значащих цифр). Дальнейшее увеличение точности ограничено возрастанием погрешностей расширителей импульсов.

1.4. Состав лабораторного макета

В лабораторный макет входят электронно-счетный частотомер Agilent 53181A, аналоговые генераторы гармонических колебаний (ВЧ — Г4-102 и НЧ — Г3-102 или аналогичные им) и персональный компьютер с интерфейсным USB-блоком. Для связи частотомера и компьютера использован интерфейс GPIB (КОП). Реализация протокола обмена данными по интерфейсу осуществляется на программном уровне. Интерфейс обеспечивает полное управление работой прибора и передачу данных изменений в компьютер. Для управления работой прибора используется программа FreqUSB, позволяющая выполнить все пункты лабораторной работы.

В процессе лабораторного занятия выполняется определение погрешности установки частоты ВЧ и НЧ-генераторов, измерение гистограммы распределения погрешности дискретности, исследование временной нестабильности частоты генераторов.

1.5.Задание и указания к выполнению работы

Включите питание частотомера. Частотомер автоматически переходит в режим самоконтроля. При этом на индикаторе высвечиваются все символы индикатора, затем прибор переходит в режим измерения. Частотомер полностью управляется компьютером, поэтому органы управления, находящиеся на его лицевой панели, в процессе работы не используются.

Включите питание компьютера и запустите программу лабораторной работы FreqUSB. В дальнейшем при работе с программой следуйте инструкциям, выводимым на экран. В программе предусмотрен режим непрерывного сохранения данных в текстовый файл. Для их просмотра предусмотрен пункт меню «сохранение данных». Здесь же можно указать путь для сохранения результатов работы в пользовательском файле данных

В программе предусмотрен переход в демонстрационный режим работы при отключенном частотомере. Режим позволяет посмотреть работу программы во всех режимах. Для перехода в рабочий режим необходимо выйти из программы, включить частотомер и повторно запустить программу FreqUSB.

5.1. Измерение погрешности установки частоты генераторов ВЧ и НЧ

На данном этапе работы производится измерение погрешности установки частоты:

- для генератора ВЧ Г4-102 на отметках частот четвертого поддиапазона 0.8, 1.2 и 1.6 МГц;
- для НЧ-генератора ГЗ-112 - на отметках частот 20, 100 и 200 кГц.

Выберите первый пункт программы FreqUSB. Установите на генераторе Г4-102 режим немодулированных колебаний ("АМ ВНЕШ."), включите некалиброванный выход 1V и соедините его с входом CHANNEL1 частотомера Agilent 53181A.

Установите на генераторе Г4-102 частоту $f_{\text{ген}} = 0.8$ МГц (4 частотный поддиапазон). Введите значение установленной на генераторе частоты $f_{\text{ген}}$ (в мегагерцах) и количество измерений в каждой частотной точке M в пределах 30... 50. Укажите оценку допустимого отклонения частоты (для исключения грубых погрешностей при серии измерений) или оставьте значение по умолчанию. Нажмите кнопку «Начать серию измерений».

Одно измерение частоты (единичный опыт) производится после

нажатия клавиши «пробел» или кнопки «Запуск частотомера». Перед проведением каждого последующего измерения необходимо сбить настройку генератора и заново вручную установить измеряемую частоту $f_{\text{ген}}$. Для этого на шкале установки частоты генератора нужно слегка сместить указатель, а затем вернуть на отметку $f_{\text{ген}}$. Чтобы учесть влияние люфта механизма перестройки, в половине опытов следует перемещать указатель к отметке справа налево, в другой половине - слева направо..

Выполните M измерений частоты $f_{\text{ген}}$. После каждого измерения по интерфейсу в программу передается строка данных, которая выводится в статусной полосе программы. В окне программы выводятся следующие результаты: измеренная частота f_i , текущая средняя частота

$$f_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i,$$

средняя погрешность установки частоты

$$\Delta f_{\text{cp}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (f_i - f_{\text{ген}})$$

и оценка среднеквадратического отклонения (СКО):

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\Delta f_i - \Delta f_{\text{cp}})^2}$$

После проведения всех M измерений занесите полученные результаты поверки в таблицу по форме 2.

Аналогичным образом проведите поверку генератора в двух других точках шкалы $f_{\text{ген}} = 1.2$ МГц и $f_{\text{ген}} = 1,6$ МГц.

Отключите Г4-102 от частотомера Agilent 53181A. Соедините выход генератора Г3-112/1 с входом CHANNEL1 частотомера Agilent 53181A. По аналогичной методике проведите измерение погрешности установки для частот 0.02, 0.1 и 0.2 МГц.

Поскольку количество измерений в каждой отметке шкалы ограничено, полученная Δf_{cp} сама содержит погрешность, зависящую от M . Иными словами, результат измерений - погрешность установки генератора – сама является случайной величиной. Поэтому в качестве конечного результата измерений следует принять доверительный интервал, в который попадает погрешность установки частоты с заданной заранее вероятностью.

Рассчитайте доверительный интервал для погрешности установки частоты по следующей методике. Считая, что закон распределения погрешности установки частоты близок к нормальному, определите интервал:

$$\Delta f_{cp1} < \Delta f_{cp} < \Delta f_{cp2},$$

в который с заданной доверительной вероятностью P_{Δ} попадает оцениваемый параметр. Доверительная вероятность для малого количества опытов определяется законом распределения Стьюдента. Она зависит от числа измерений M и границ интервала, нормированных к СКО. Эти границы заданы коэффициентами Стьюдента t_M — они табулированы в таблице 1 для заранее выбранного значения P_{Δ} .

Таблица 1

M	$P_{\Delta}(t, M) = 0.8$	$P_{\Delta}(t, M) = 0.9$	$P_{\Delta}(t, M) = 0.95$
20	1.32	1.73	2.09
30	1.31	1.70	2.05
40	1.30	1.68	2.02
50	1.30	1.68	2.01

Сначала выберите доверительную вероятность. Для простых измерений можно использовать $P_{\Delta} = 0.8$; в более ответственных случаях выберите $P_{\Delta} = 0.9$; 0.95 . Затем по таблице 1 для проведенного числа опытов M найдите коэффициент Стьюдента t_M . Границы доверительного интервала рассчитайте затем по формулам

$$\Delta f_{cp1} = \Delta f_{cp} - \frac{t_M \cdot \text{СКО}}{\sqrt{M}}, \quad \Delta f_{cp2} = \Delta f_{cp} + \frac{t_M \cdot \text{СКО}}{\sqrt{M}}$$

Результаты расчетов сведите в таблицу по форме 2.

5.2. Измерение закона распределения погрешности дискретности

Проведите определение закона распределения погрешности дискретности, построив гистограмму разброса погрешности измерения частоты генератора Г4-102 в первом поддиапазоне (0.1.. 0.18 МГц).

Соедините выход 1V генератора Г4-102 с входом CHANNEL1 частотомера Agilent 53181A.

Выберите пункт 2 программы и введите число опытов (число точек измерения) порядка 100... 200. Чем больше точек измерения, тем более точной является оценка закона распределения. Для определения границ гистограммы введите оценку максимальной погрешности дискретности. Она соответствует погрешности частотомера при времени счета 1 мс и метке времени 10^{-10} с. Границу гистограммы рекомендуется задавать в пределах 10^{-5} 10^{-7} .

Произведите измерение следующим образом. Настройте генератор на одну из частот 1-го поддиапазона и запустите частотомер кнопкой «Начать измерение». В процессе работы программы автоматически производится два измерения частоты генератора с разными временами счета и, соответственно, разной точностью. Разность показаний дает погрешность дискретности. Она выводится на график и диаграмму разброса частоты. После 3-5 измерений перестройте генератор на любую другую частоту из того же поддиапазона. Повторяйте перестройку в процессе всего измерения — ошибочные значения, полученные в момент перестройки генератора, в пределы гистограммы не попадают и не влияют на окончательные результаты.

По завершении измерений гистограмма нормируется по максимальному значению. Запишите данные уровней гистограммы, выводимые в таблицу программы, и постройте по ним гистограмму. Аппроксимируйте полученную гистограмму треугольным законом распределения погрешности дискретности.

5.3. Измерение нестабильности частоты генераторов ВЧ и НЧ

В данном пункте работы измеряется временная зависимость частоты выходного сигнала генераторов Г4-102 и ГЗ-112/1 и ее нестабильность за выбранный интервал времени.

Установите на генераторе Г4-102 частоту 100 кГц. Соедините выход «1V» генератора Г4-102 с входом CHANNEL1 частотомера Agilent 53181A. Перейдите к пункту 3 программы и введите время, за которое производится измерение нестабильности (1-10 мин), число частотных точек (например, 100) и значение установленной по шкале частоты. Введите оценку допустимого отклонения частоты для исключения грубых погрешностей (0.01 - 1%).

Произведите измерение временной зависимости ухода частоты генератора Г4-102. Занесите полученные данные в таблицу по форме 3, используя пункт меню "Сохранение данных". Зарисуйте вид графика зависимости частоты от времени. Запишите полученные данные абсолютной и относительной нестабильности (ухода) частоты за время измерения и общее время измерения.

Повторите измерения для генератора ГЗ-112/1 на той же частоте. При этом учтите, что нестабильность частоты RC-генератора типа ГЗ-112, как правило, на порядок ниже ($10^{-4} \dots 10^{-5}$), чем у ВЧ-генератора Г4-102 с высокодобротными LC-контурами.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать структурные схемы частотомера в режиме измерения частоты и периода, таблицы с результатами измерений и расчетов, графики измеренных зависимостей.

Рекомендуемые формы таблиц

Таблица 2

Генератор _____							
$f_{\text{ген}},$ МГц	$f_{\text{ср}},$ МГц	$\Delta f_{\text{ср}},$ кГц	СКО, МГц	М	$t_{\text{м}}$	$\Delta f_{\text{ср1}},$ кГц	$\Delta f_{\text{ср2}},$ кГц

Таблица 3

Генератор _____		
N точки	$f_i,$ МГц	$\Delta f / f_{\text{ген}}$

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение и основные функции элементов структурной схемы электронно-счетного частотомера.
2. В каких случаях от измерения частоты следует переходить к измерению периода?
3. Какие функции реализует формирующее устройство электронно-счетного частотомера?
4. Как формируются временные ворота при измерении частоты? Почему их длительность выбирают кратной 10?
5. Как выбирается длительность периода счетных импульсов (метка времени) при измерении переиодна и временных интервалов? Почему ее выбирают кратной 10?
6. Чем определяются верхняя и нижняя граничные частоты рабочего диапазона электронно-счетного частотомера?
7. Поясните причины появления погрешностей при измерении частоты методом дискретного счета. Как производят уменьшение погрешности дискретности?
8. Какие дополнительные составляющие погрешности появляются при измерении периода по сравнению с измерением частоты?
9. Для чего необходимо знать закон распределения погрешности дискретности? Какими факторами определяется его форма?
10. Опишите косвенный метод измерения частоты, использованный в электронно-счетном частотомере Agilent 53181A.
11. Каким методом реализовано уменьшение погрешности дискретности в ЭСЧ Agilent 53181A?
12. Поясните методику получения гистограммы распределения погрешности дискретности.

Список литературы

1. Дворяшин Б. В. Метрология и радиоизмерения. М.: Академия, 2005.
2. Метрология и радиоизмерения./Под.ред.В.И.Нефедова-М.:Высш. шк., 2003
3. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения. М.: Высш. шк., 1986.
4. Мирский Г. З. Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1986.
5. Измерения в электронике: Справ. / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.