

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им.В.И.Ульянова (Ленина)"

кафедра Теоретических основ радиотехники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине
"Приборы и техника радиоизмерений"

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА

Санкт-Петербург

2012

1. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОГО СЧЕТА

В работе изучаются способы измерения частоты и периода электрических сигналов методом дискретного счета. Проводится поверка генераторов НЧ и ВЧ с помощью вычислительного микропроцессорного частотомера Agilent 53181A. Измеряются распределение погрешности дискретности и нестабильность частоты генераторов во времени.

Принцип действия и структурная схема электронно-счетного частотомера

Наиболее часто для измерения частоты периодических сигналов в настоящее время используют *метод дискретного счета*. Он заключается в подсчете за образцовый интервал времени $T_{сч}$ числа импульсов N , сформированных из входного сигнала. Тогда измеряемую частоту f_x (точнее, ее среднее значение за время $T_{сч}$) можно определить по формуле

$$f_x \approx N/T_{сч} \quad (5.1)$$

Значение N соответствует целому числу периодов $T_x = 1/f_x$, укладывающихся в интервал $T_{сч}$.

Приборы, основанные на методе дискретного счета, называют электронно-счетными частотомерами (electronic counters) (ЭСЧ). Современные ЭСЧ – это многофункциональные приборы для измерения частотно-временных параметров сигналов (частоты, периода, числа импульсов, временных интервалов и пр.). Микропроцессорные вычислительные 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. 5.1.

Сигнал неизвестной частоты f_x подают на вход А. *Входное устройство* частотомера содержит разделительный конденсатор, дискретный аттенуатор, схему автоматической регулировки уровня сигнала. *Формирующее устройство* представляет собой преобразователь формы сигнала. Он 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. 5.2). Так как эти импульсы в дальнейшем поступают на счетчик, то их называют *счетными импульсами*. *Временной селектор* – это логический элемент «И» (логическое умножение). Он выделяет из входной последовательности пачку N импульсов, попадающих в образцовый интервал $T_{сч}$ (*временные ворота*). Длительность ворот $T_{сч}$ формируют делением частоты $f_{кв} = 1/T_{кв}$ кварцевого генератора. В ЭСЧ используют термостатированные генераторы с кварцевой стабилизацией частоты. Работа термостата контролируется по индикатору на лицевой панели прибора. Установку $T_{сч}$ производят делением частоты $f_{кв}$ с помощью *декадного делителя частоты*.

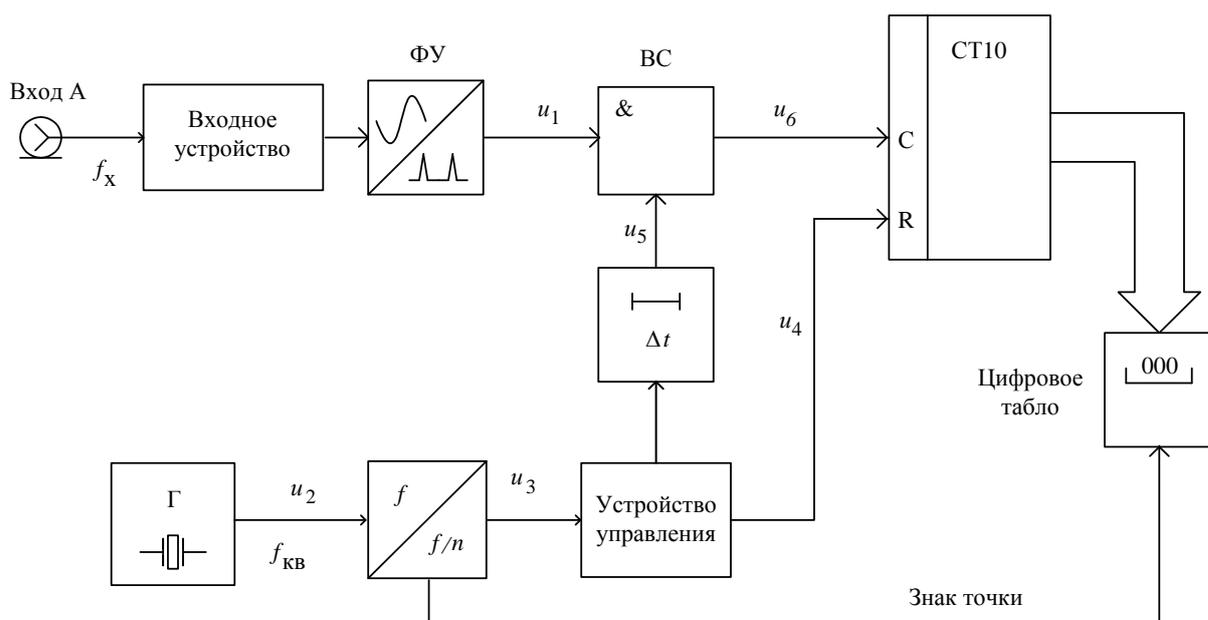


Рис. 5.1. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения частоты

Коэффициент деления выбирают из соотношения $n = 10^k$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. При этом время счета выбирают кратным 10:

$$T_{сч} = nT_{кв} = T_{кв} 10^k. \quad (5.2)$$

Устройство управления позволяет выбрать режим работы ЭСЧ. Типовым является режим *периодического запуска*, когда измерение повторяется через регулируемый интервал времени (иногда его называют *временем индикации*). Используют также *одиночный запуск* – измерение выполняется при поступлении на ЭСЧ импульса запуска. *Ручной запуск* осуществляют нажатием специальной кнопки.

В начале измерения на счетчик из устройства управления посылают импульс сброса u_4 . Одновременно триггером устройства управления форми-

руют прямоугольный строб-импульс длительностью $T_{сч}$. Этот импульс сдвигают во времени в *устройстве задержки* на небольшое время $t_{сб}$, необходимое для сброса счетчика. После задержки строб-импульс u_5 (его называют *временные ворота*) поступает на селектор. Число импульсов u_6 , проходящих через временной селектор на десятичный *счетчик*, равно $N = \text{int}[f_x T_{сч}] \pm 1$, где $\text{int}[\]$ означает целую часть числа. После дешифрации показаний счетчика его содержимое (количество импульсов N) выводят на *цифровое табло*.

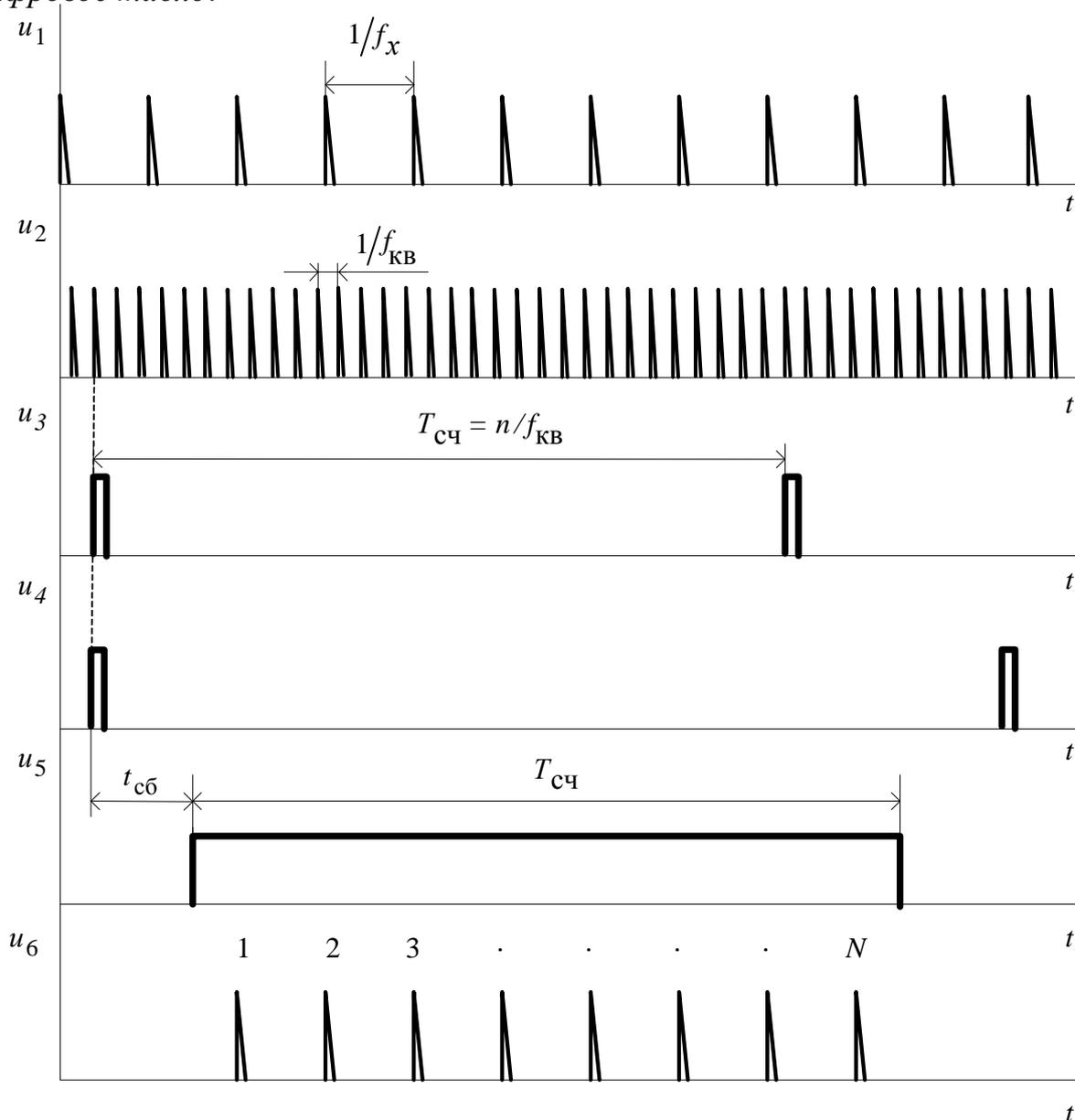


Рис. 5.2. Осциллограммы сигналов ЭСЧ в режиме измерения частоты

Если выбрать частоту кварцевого генератора в виде $f_{кв} = 10^p$ [Гц], где p – целое число, то с учетом коэффициента деления частоты генератора $n = 10^k$ (см. (4.2)) получим:

$$f_x \approx 10^{(p-k)} N \quad (5.3).$$

Число импульсов пропорционально измеряемой частоте с коэффициентом, кратным 10. Это позволяет масштабировать показания на индикаторе передвижением знака десятичной точки. Положение точки связано с коэффициентом деления частоты кварцевого генератора n . Кроме того, на индикатор выводят обозначения производных единиц (кГц, МГц). Таким образом, ЭСЧ дает прямые показания измеряемой частоты, выраженной в системных единицах, хотя фактически на индикаторе выводится число сосчитанных импульсов N .

Описанный 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 индикатор прибора.

Верхняя граница измеряемых частот ЭСЧ определяется быстродействием основных элементов схемы, и прежде всего – счетчика. Она составляет обычно несколько сотен МГц. Для расширения рабочего диапазона частот в область СВЧ применяют быстродействующие делители частоты входного сигнала, а также преобразователи и переносчики частоты. Нижняя граница рабочего диапазона определяется допустимой погрешностью дискретности, которая рассмотрена в 5.2.

Погрешность измерения частоты методом дискретного счета.

Измерение периода.

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

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

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 $0 \dots 50$ °С и долговременная нестабильность частоты (старение) в пределах $\pm (3 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8})$ за месяц. При использовании внешнего эталонного сигнала эта погрешность может быть еще меньше.

Погрешность дискретности возникает из-за того, что длительность временных ворот $T_{сч}$ в общем случае не совпадает с целым числом периодов измеряемого сигнала.

На рис. 5.3 для примера приведены крайние ситуации, когда во временные ворота, равные 8 периодам входного сигнала, попадают 9 импульсов (верхний график) или 7 импульсов (нижний график). Это может произойти из-за нестабильности срабатывания временного селектора. Ошибка при подсчете импульсов составляет ± 1 импульс. Из соотношения (5.1) ясно, что абсолютная максимальная погрешность дискретности равна $\pm 1/T_{сч}$. Она определяет *разрешающую способность ЭСЧ* (возможность различать близко расположенные значения измеряемой частоты). Так, для $T_{сч} = 1$ с разрешающая способность равна 1 Гц, она не зависит от частоты входного сигнала.

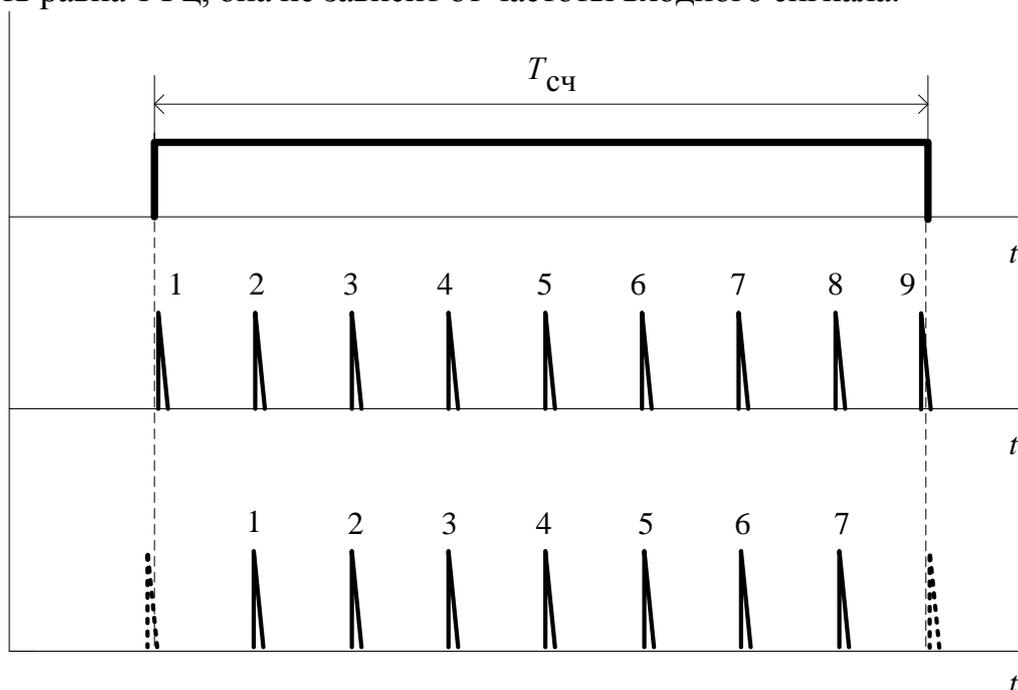


Рис. 5.3. Образование погрешности дискретности

Относительная погрешность дискретности обратно пропорциональна измеряемой частоте и равна

$$\delta_{д} = \pm 1/(f_x T_{сч}) = \pm 1/N. \quad (5.4)$$

На низких частотах $\delta_{д}$ 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, например,

умножителей частоты). Наиболее часто используют переход от измерения частоты к измерению периода. Упрощенная структурная схема ЭСЧ в режиме измерения периода представлена на рис. 5.4.

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. 5.5).

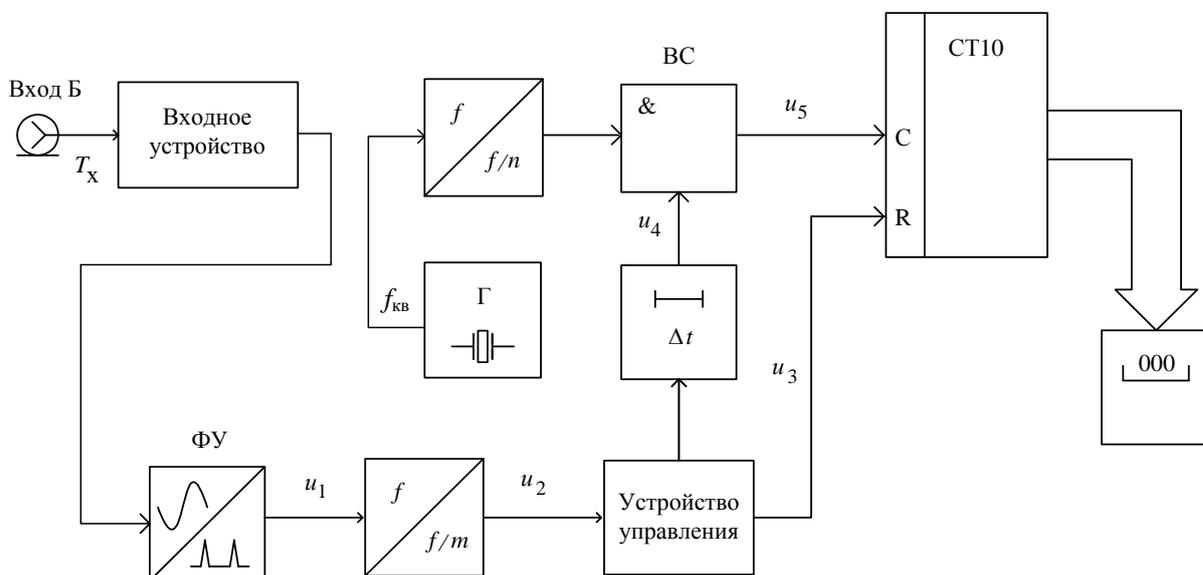


Рис. 5.4. Структурная схема ЭСЧ в режиме измерения периода

Длительность временных ворот $T_{сч}$ образуют делением частоты импульсов u_1 , что эквивалентно увеличению периода $T_{сч} = mT_x$. Коэффициент деления делают кратным 10 ($m = 10^r$, $r = 0, 1, 2, 3, \dots$). Счетные импульсы формируют делением частоты образцового кварцевого генератора $f_{кв}$ в n раз. Их период T_M является мерой временного интервала. Поэтому длительность T_M называют *меткой времени*:

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

где $s = 7, 6, 5, \dots$. Минимальную метку времени выбирают, учитывая быстродействие счетчика. Она обычно составляет 10...100 нс. На счетчик поступают импульсы u_6 , 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.

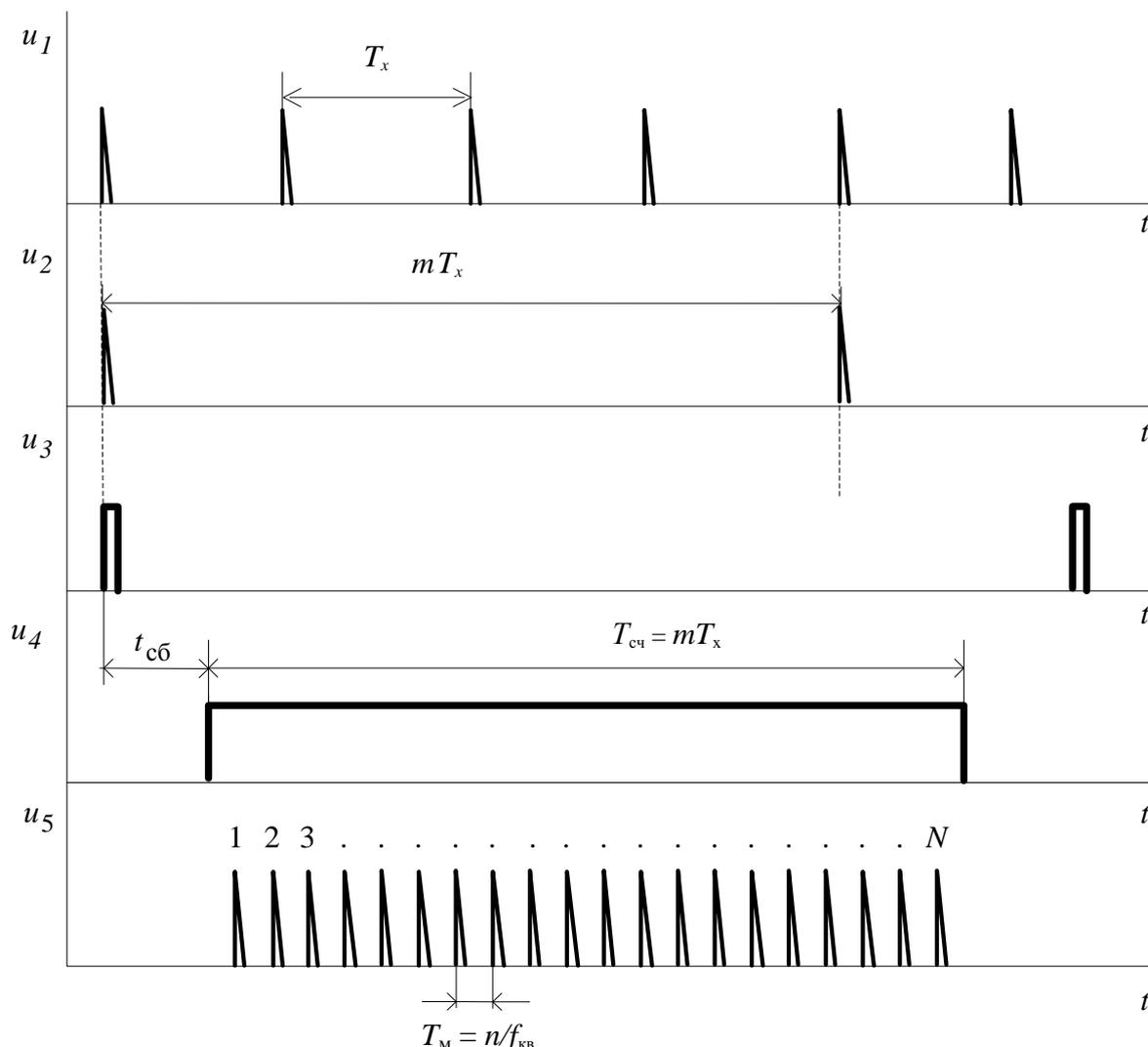


Рис. 5.5. Осциллограммы сигналов ЭСЧ в режиме измерения периода

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

$$\delta_d = \pm T_M / T_x = \pm 1 / N, \quad (5.5)$$

что совпадает с погрешностью измерения частоты. С ростом измеряемого периода T_x число импульсов N растет и относительная погрешность снижается. 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, с наложением на сигнал внешних шумов. Это требует 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 (5.5) определяет ее максимальное значение. Для оценки среднеквадратической погрешности необходимо знать закон распределения плотности вероятности погрешности. Это позволяет произвести интервальную оценку погрешности метода дискретного счета.

Рассмотрим закон распределения погрешности дискретности при измерении периода T_x . Как следует из рис. 5.6, начало измеряемого интервала T_x (временные ворота) в общем случае не синхронизировано с метками времени.

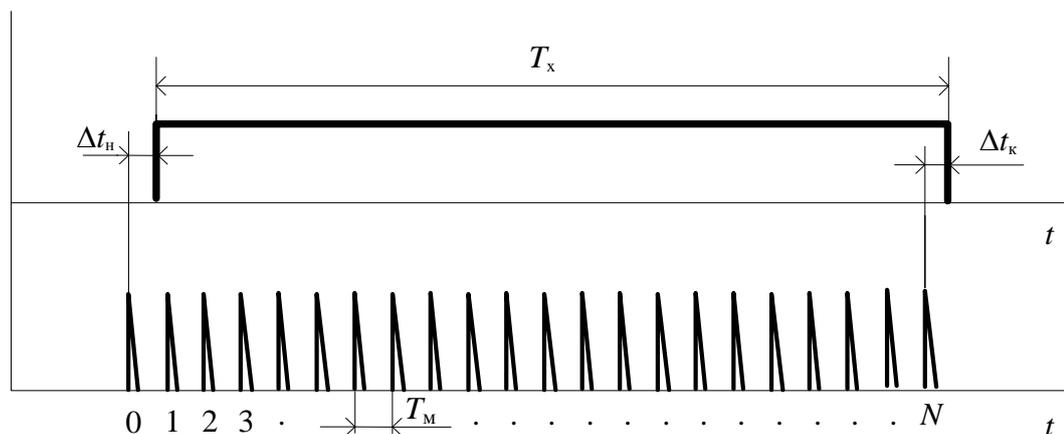


Рис. 5.6. Погрешность дискретности при измерении периода

Измеряемый период отличается от результата измерения NT_M двумя временными интервалами Δt_H и Δt_K :

$$T_x = NT_M - \Delta t_H + \Delta t_K = NT_M + \Delta t_D,$$

где Δt_D – общая абсолютная погрешность дискретности 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 величинами с равномерными законами распределения $p(\Delta t_H)$ и $p(\Delta t_K)$ (рис. 5.7).

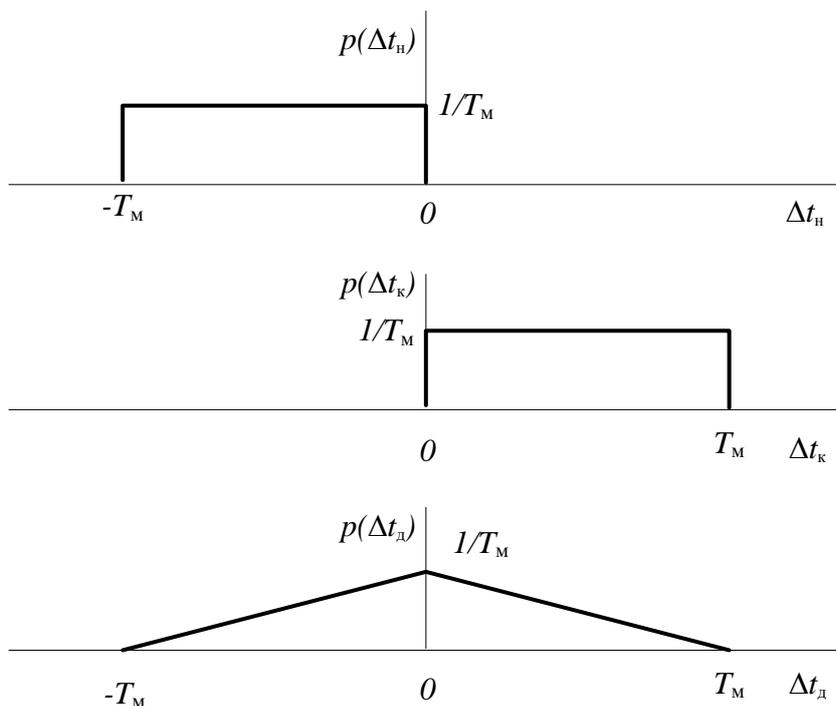


Рис. 5.7. Закон распределения погрешности дискретности

Эти случайные погрешности независимы, и, как следует из теории вероятности, закон распределения общей погрешности $p(\Delta t_D)$ 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. 5.7):

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

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

$$\delta_d = \frac{CKO}{NT_m} = \frac{1}{\sqrt{6N}}.$$

Электронно-счетный вычислительный частотомер с комбинированным методом измерения

В современных вычислительных частотомерах для определения частоты используют оба описанных выше метода:

1. прямой метод – путем подсчета входных импульсов в течение выбранного временного окна;
2. измерение периода путем подсчета тактовых импульсов кварцевого генератора и дальнейшее вычисление частоты.

Как было показано ранее, первый метод дает хорошую точность для относительно высоких частот. Вторым методом применяют на низких частотах f_x (то есть для больших T_x). В первом случае для увеличения точности необходимо увеличивать длительность временного окна, во втором – опорную частоту (использовать минимальную метку времени). Время измерения по первому методу постоянно и равно выбранной длительности временного окна. Для второго метода оно составляет один или несколько периодов T_x и зависит от частоты входного сигнала.

Комбинированный способ косвенного измерения частоты (reciprocal counting), применяемый в вычислительных частотомерах, позволяет сочетать достоинства обоих способов. Суть метода – измерение периода входного сигнала, увеличенного в M раз (рис. 5.8). Импульсы меток времени подсчитываются в течение M полных периодов входного сигнала. Однако, в отличие от измерения периода, величина M не устанавливается входным делителем частоты, а измеряется отдельно. В начале измерений задают требуемое время измерения $T_{\text{изм}}$ и подсчитывают количество периодов входного сигнала M , укладывающееся в этот интервал. Затем формируют строб-импульс временных ворот, длительность которого равна целому количеству периодов входного сигнала $M T_x$. Пропуская через временной селектор импульсы меток времени, подсчитывают количество импульсов N , укладывающихся во временные ворота $M T_x$. Значение частоты входного сигнала вычисляется по формуле

$$f_{\text{вх}} = \frac{1}{T_x} \approx \frac{M}{N T_M} \quad (5.6)$$

При этом общее количество сосчитанных импульсов N определяет точность измерения. Абсолютная погрешность измерения длительности интер-

вала $M T_x$ равна длительности метки времени (периоду тактовых импульсов). Относительная погрешность измерения частоты тогда равна

$$\delta_{\text{д}} = \frac{T_{\text{М}}}{M T_x} = \frac{T_{\text{М}}}{T_{\text{сч}}} \approx \frac{T_{\text{М}}}{T_{\text{изм}}}. \quad (5.7)$$

Здесь учтено, что

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

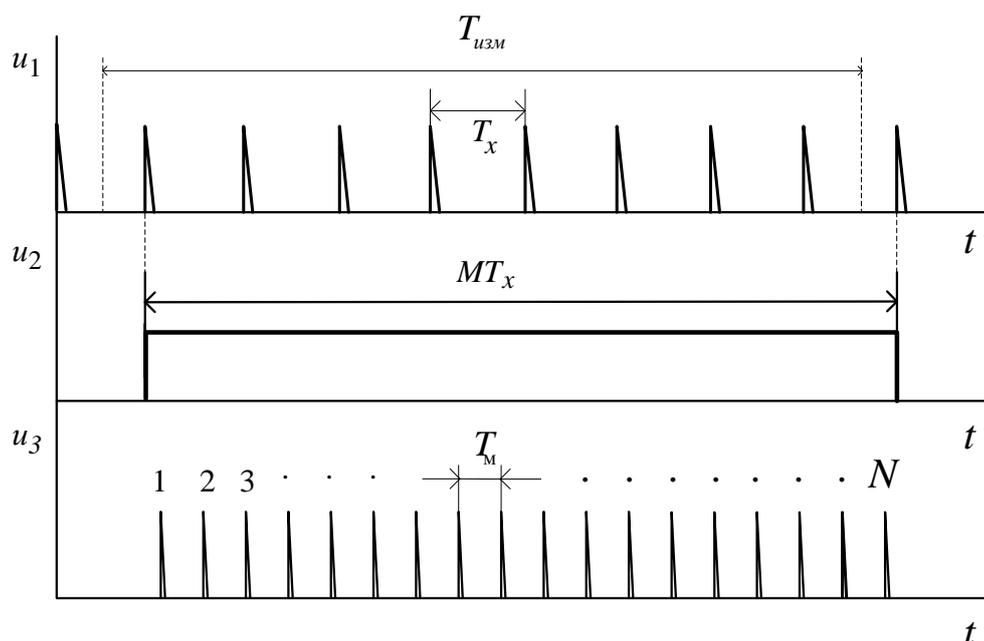


Рис. 5.8. Комбинированный метод измерения частоты

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 с (размерность [знак/с]). Так, для тактовой частоты 100 МГц погрешность измерения будет составлять 10^{-8} , а число знаков в результате – 8 знаков/с. Улучшение разрешающей способности требует применения опорного генератора высокой частоты и повышения быстродействия счетчика. Кроме того, емкость счетчика (разрядность) должна быть увеличена, чтобы избежать его переполнения.

Достоинством комбинированного метода является свободный выбор времени измерения (не обязательно кратный 10) и постоянная относительная погрешность измерения, не зависящая от входной частоты.

Технические характеристики частотомера Agilent 53181A

Универсальный частотомер Agilent 53181A использует комбинированный метод измерения частоты. Прибор работает в диапазоне частот от 0 Гц до 225 МГц при уровне входного сигнала от 0.04 до 5 В; измеряет период сигнала от 4.44 нс до 10 с. Прибор обеспечивает разрешение по частоте 10 знаков/с. Долговременная нестабильность внутреннего кварцевого генератора прибора $\delta_{\text{кв}} = \pm 3 \cdot 10^{-7}$ за 30 сут. Температурная нестабильность генератора менее $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Время счета можно установить от 1 мс до 1000 с, предусмотрен режим автоматического выбора. Входное устройство обеспечивает два значения входного сопротивления (50 Ом или 1 МОм), переключение открытый/закрытый вход (DC/AC), включение ФНЧ с частотой среза 100 кГц, аттенюатор для уменьшения входного сигнала в 10 раз, переключение чувствительности (низкая, средняя или высокая – LOW/MED/HI).

Прибор выполняет следующие функции: автоматический, ручной и внешний запуск, установку и измерение уровней срабатывания формирующих устройств (что важно для импульсов не 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.

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

масштабирование результата (домножение на константу);

сдвиг результата (добавление константы);

проведение многократных измерений (количество опытов от 2 до 10^6) и обработку данных – расчет среднего отклонения, среднего значения, максимального и минимального результатов;

фильтрацию потока измеряемых данных по предварительно введенным пределам.

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 с).

Упрощенная структурная схема прибора представлена на рис. 5.9.

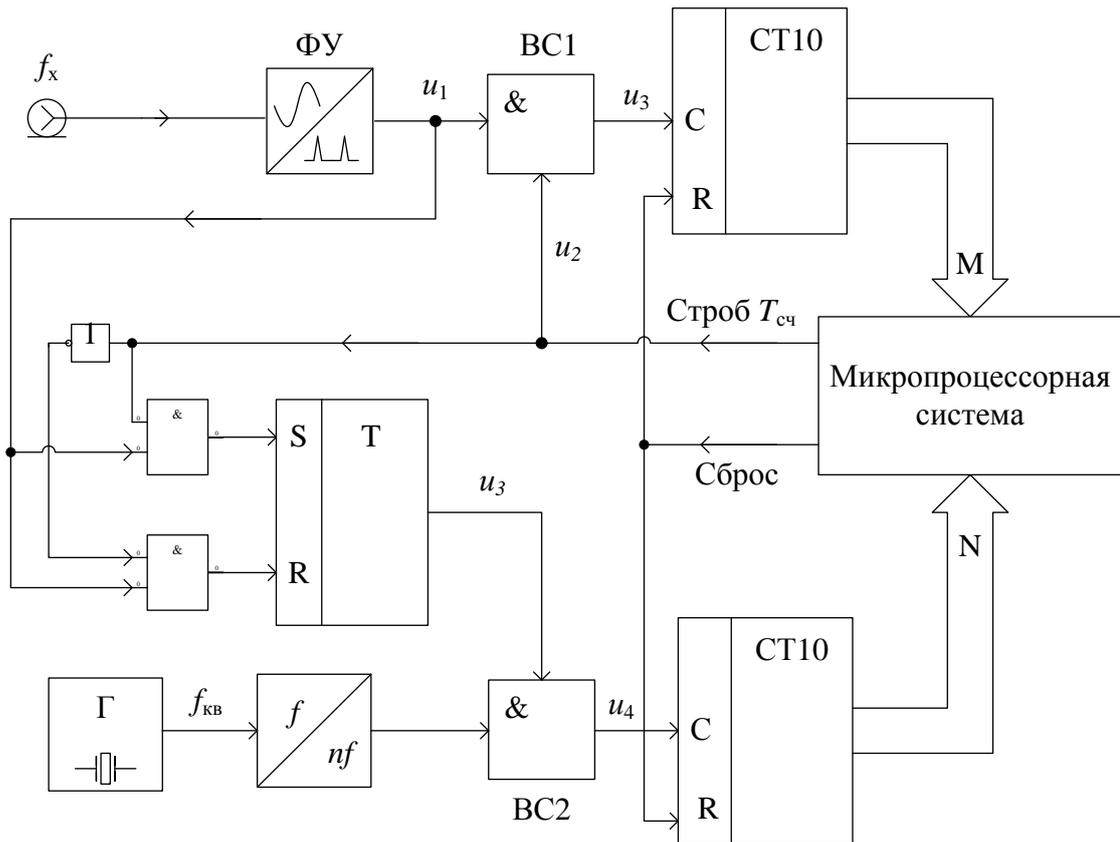


Рис.5.9. Упрощенная схема вычислительного частотомера

Входной сигнал с частотой f_x поступает на формирующее устройство ФУ, где преобразуется в последовательность импульсов u_1 (см. рис. 5.9). Эти импульсы выделяются временным селектором BC1, для чего с микропроцессора на него подается строб-импульс u_2 . Длительность строб-импульса $T_{сч}$ устанавливается вручную или автоматически, исходя из требуемого времени измерения. Прошедшие через BC1 импульсы подсчитываются первым счетчиком. С помощью двух схем И (&), инвертора и RS-триггера формируется строб-импульс u_4 второго временного селектора BC2 длительностью MT_x . Он выделяет N счетных импульсов u_5 , вырабатываемых генератором меток времени T_M .

Количество периодов входного сигнала M за время $T_{сч}$, а также количество импульсов N за время MT_x поступают в микропроцессор, который рассчитывает измеряемую частоту по формуле (5.6).

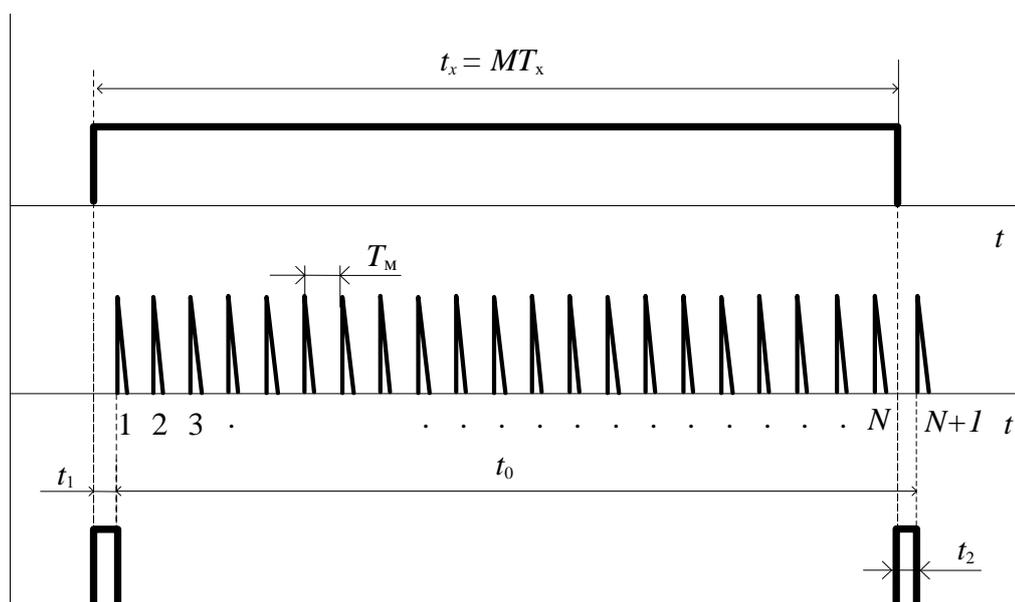


Рис. 5.10. Интерполяционный метод измерения временного интервала

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

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

Увеличение точности в частотомере Agilent 53181A достигнуто интерполяционным способом. На рис. 5.10 показаны временные диаграммы частотомера, где измеряемый интервал $t_x = MT_x$ заполняется метками времени T_M . Счетчик фиксирует число импульсов N , попавших в этот интервал. Видно, что

$$t_x = t_0 + t_1 - t_2, \quad (5.8)$$

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.

Интервалы t_1 и t_2 определяют погрешность дискретности при измерении длительности всего t_x . Для их измерения используют расширители импульсов, построенные 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 , что и интервал t_0 .

Количество импульсов N_1 и N_2 фиксируется счетчиками, соответственно:

$$t_1 \approx N_1 T_M, t_2 \approx N_2 T_M. \quad (5.9)$$

Результат измерения вычисляется микропроцессором на основании данных счетчиков M , N , N_1 и N_2 по формуле, вытекающей из соотношений (5.8), (5.9):

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

Максимальная погрешность при таком методе измерения соответствует погрешности дискретности для интервалов t_1 , t_2 и равна $\pm T_M / (1000 T_{\text{сч}})$. 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.

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). Частотомер включен в измерительную систему, в которую входит персональный компьютер с интерфейсным USB-блоком. Для связи частотомера и компьютера использован приборный интерфейс GPIB (КОП). Реализация протокола обмена данными по интерфейсу осуществляется на программном уровне. Интерфейс обеспечивает полное управление прибором и передачу данных измерений в компьютер. Органы управления, находящиеся на лицевой панели частотомера, в процессе работы не используются.

Для выполнения лабораторной работы используется программа FreqUSB, разработанная в среде Borland C++ Builder. В программе предусмотрен режим непрерывного протоколирования данных в текстовый файл. Для просмотра данных и сохранения результатов работы в пользовательском файле есть пункт меню «Сохранение данных».

При отключенном частотомере программа FreqUSB переходит в демонстрационный режим работы. Для перехода в рабочий режим необходимо выйти из программы, включить частотомер и повторно запустить программу.

Задание и указания к выполнению работы

Включите питание частотомера. Прибор автоматически переходит в режим самоконтроля. На индикаторе высвечиваются все символы индикатора, затем частотомер переходит в режим измерения.

Включите питание компьютера и запустите программу лабораторной работы FreqUSB. В дальнейшем при работе с программой следуйте инструкциям, выводимым на экран.

Измерение погрешности установки частоты генераторов ВЧ и НЧ

В данном пункте 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.

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

Каждое измерение частоты генератора производится после нажатия клавиши «пробел» или кнопки «Запуск частотомера». После каждого измерения по интерфейсу в программу передается строка результата, которая выводится в статусной полосе программы. Перед проведением каждого последующего измерения необходимо сбить настройку генератора (слегка сместить указатель) и заново вручную установить измеряемую частоту f_{Γ} . 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_{Γ} . В окне программы выводятся следующие результаты: текущая измеренная частота f_i , текущая средняя частота

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

средняя погрешность установки частоты

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

и оценка среднеквадратического отклонения:

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

После проведения всех M измерений занесите полученные итоговые значения $f_{\text{ср}}$, $\Delta f_{\text{ср}}$ и СКО в таблицу по форме табл. 5.1. Аналогичным образом проведите поверку генератора в двух других точках шкалы $f_{\Gamma} = 1.2$ МГц и $f_{\Gamma} = 1.6$ МГц.

Таблица 5.1

Измеренные погрешности установки частоты генератора

Генератор _____							
$f_{\text{ген}},$ МГц	$f_{\text{ср}}$ МГц	$\Delta f_{\text{ср}},$ МГц	СКО, МГц	M	t_m	$\Delta f_{\text{ср}1},$ МГц	$\Delta f_{\text{ср}2},$ МГц

Отключите Г4-102 от частотомера. Соедините выход генератора ГЗ-112/1 с входом CHANNEL1 частотомера. По аналогичной методике проведите измерение погрешности установки для частот 20, 100 и 200 кГц (в программу значения частот надо вводить в мегагерцах).

Поскольку количество измерений в каждой отметке шкалы ограничено, полученная средняя погрешность установки частоты $\Delta f_{\text{ср}}$ сама содержит погрешность, зависящую от M . Поэтому в качестве конечного результата измерений следует принять доверительный интервал, в который попадает погрешность установки частоты с заданной вероятностью.

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

$$\Delta f_{\text{ср}1} < \Delta f_{\text{ср}} < \Delta f_{\text{ср}2},$$

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 табл. 5.2 для заранее выбранного значения P_Δ .

Таблица 5.2

Коэффициенты Стьюдента

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

Выберите доверительную вероятность. Для простых измерений можно использовать $P_\Delta = 0.8$; в более ответственных случаях выберите $P_\Delta = 0.9 \dots 0.95$; $P_\Delta = 0.9; 0.95$. Затем по табл. 5.2 для проведенного числа опытов M найдите коэффициент Стьюдента t_M . Границы доверительного интервала рассчитайте затем по формулам

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

Результаты расчетов сведите в таблицу по форме табл. 5.1.

Измерение закона распределения погрешности дискретности

При экспериментальном определении закона на основе многократных измерений строят гистограмму – графическое изображение распределения погрешностей. Она представляет собой ряд смежных прямоугольников – карманов гистограммы. 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.

Проведите измерение закона распределения погрешности дискретности, построив гистограмму разброса погрешности измерения частоты генератора Г4-102 в первом поддиапазоне (0.1...0.18 МГц) и во втором поддиапазоне (0.18...0.35 МГц).

Соедините выход 1V генератора Г4-102 с входом CHANNEL1 частотомера. Выберите пункт 2 программы и введите число опытов (число точек измерения) порядка 100–200. Чем больше точек измерения, тем более точной яв-

ляется 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 $10^{-5} \dots 10^{-7}$.

Произведите построение гистограммы 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 – точное и грубое. Разность показаний дает погрешность дискретности, которая 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. Значения, полученные в момент перестройки генератора, в пределы гистограммы не попадают и не влияют на окончательные результаты. В середине цикла измерений перейдите на частоты 2-ого поддиапазона генератора.

Таблица 5.3

Гистограмма

Номер кармана гистограммы	Значение

По завершении измерений гистограмма нормируется. Ее данные – вероятности попадания погрешности в каждый карман – выводятся в таблицу по максимальному значению. Запишите эти данные в таблицу по форме табл. 5.3 и постройте по ним гистограмму. Аппроксимируйте полученную гистограмму треугольным законом распределения погрешности дискретности.

Измерение нестабильности частоты генераторов ВЧ и НЧ

На данном этапе 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. Перейдите к пункту 3 программы и введите время, за которое производится измерение нестабильности (1...10 мин), число частотных точек (по умолчанию 100) и значение установленной по шкале генератора частоты. Введите оценку допустимого отклонения частоты для исключения грубых погрешностей (0.01...1 %).

Произведите измерение временной зависимости частоты генератора Г4-102. В процессе измерения трогать настройку генератора нельзя. Занесите

полученные данные в таблицу по форме табл. 5.4, используя пункт меню «Сохранение данных». Зарисуйте вид графика зависимости частоты от времени. Запишите полученные данные абсолютной и относительной нестабильности частоты за время измерения и общее время измерения.

Таблица 5.4

Измерение нестабильности частоты генератора

Генератор_____			
Номер точки	f_i , МГц	$f_i - f_r$, МГц	$\Delta f / f_r$

Повторите измерения для генератора ГЗ-112/1 на той же частоте 100 кГц. 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-контуром, поэтому оценку нестабильности перед измерениями надо установить больше.

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