

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского»

В.А. Павлючук

Методы измерения частоты.

Учебное пособие по курсу
«Измерение неэлектрических величин радиотехническими методами»
для студентов специальности 010801 «Радиофизика и электроника»

Саратов 2013

Содержание

	стр
Введение	3
Раздел 1. Основные понятия.	3
Раздел 2. Метод заряда и разряда конденсатора.	4
Раздел 3. Гетеродинный метод.	6
Раздел 4. Осциллографический метод.	7
Раздел 5. Резонансный метод	8
Раздел 6. Метод дискретного счета.	9
Заключение	15
Библиографический список	17

Введение

Частота является важнейшей характеристикой переменного тока, а измерение частоты – одной из основных задач, решаемых в радиотехнике [1,2]. Это объясняется рядом обстоятельств.

Во-первых, наличие большого количества различной радиоэлектронной аппаратуры, используемой в быту, во многих сферах народного хозяйства и работающей в широком диапазоне частот, приводит к необходимости иметь дело с частотными измерениями при разработке, производстве и эксплуатации этой аппаратуры.

Во-вторых, современное развитие науки и техники невозможно без прецизионного измерения интервалов времени, и только при помощи частотноизмерительной аппаратуры можно с необходимой точностью воспроизводить единицу физической величины – секунду.

В-третьих, поверка, аттестация и калибровка различного рода радиоизмерительных приборов (например, измерителей индуктивности или электрической ёмкости) производится, как правило, в строго определенных точках частотного диапазона, что также вызывает необходимость в ходе проведения указанных операций иметь дело с частотными измерениями.

Наконец, высокая точность частотноизмерительных приборов, недостижимая, как правило, для других средств измерений, позволяет использовать такие приборы для определения с высокой достоверностью значения других – как электрических, так и неэлектрических – величин (электрической ёмкости, оптической плотности, температуры, давления, угловых приращений, расхода жидкостей и т.д.).

Существует достаточно большое разнообразие способов определения частоты, отличающихся погрешностями измерений, применяемой аппаратурой, быстродействием и т.д. Однако, все эти способы базируются на относительно небольшом количестве основных методов измерений частоты.

На практике наибольшее распространение получили: метод сравнения измеряемой частоты с эталонной (образцовой), методы, основанные на физических явлениях, связанных с прохождением переменного тока через различные устройства (резонансный, зарядки-разрядки конденсатора, мостовой), а также метод дискретного счета.

В рамках данного пособия дан обзор и сравнительный анализ основных способов измерения частоты.

Раздел 1. Основные понятия

Рассмотрим кратко основные понятия, связанные с переменным током как одним из видов колебательного процесса [3,4].

Период T периодического сигнала $U(t)$ – это параметр, равный наименьшему интервалу времени, через который регулярно повторяется произвольно выбранное мгновенное значение сигнала, т.е. наименьший интервал времени, для которого

$$U(t) = U(t+T)$$

Частота f_0 периодического сигнала – величина, обратная периоду периодического сигнала

$$f_0 = \frac{1}{T}$$

Угловая частота – суммарное изменение фазы гармонического сигнала в единицу времени:

$$\omega = 2\pi f_0$$

Применяя термины «частота» и «угловая частота», мы обычно имеем в виду среднее за определённый промежуток времени значение частоты. Если же частота непостоянна, то ее характеризуют **мгновенным значением**, которое определяется как скорость изменения фазы колебания, т.е.

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}$$

В этом случае формула (3) приобретает вид

$$\omega(t) = 2\pi f(t)$$

где $f(t)$ представляет собой **мгновенное** значение линейной частоты (измеряемое в Герцах, т.е. в числе колебаний в секунду)

В случае синусоидального колебания фаза растёт пропорционально времени, производная фазы по времени является постоянной величиной, т.е.

$$\omega = 2\pi f_0.$$

Как уже отмечалось, изменение частоты составляет одну из наиболее важных задач измерительной техники. Для измерения частоты могут быть использованы как аналоговые, так и цифровые методы. В современной радиоэлектронике, автоматике и других близких к ним областях науки и техники используются сигналы самых разнообразных частот – от инфранизких до сверхвысоких. Наиболее известными методами является резонансный, гетеродинный, заряда и разряда конденсатора, сравнения при помощи осциллографа и др. Каждый из этих методов эффективен в определенном диапазоне частот.

Раздел 2. Метод заряда и разряда конденсатора.

Сущность данного метода заключается в измерении тока разряда конденсатора, попеременно переключаемого с заряда на разряд, с частотой, равной измеряемой [2,4,5].

Пусть конденсатор C заряжается до напряжения U_1 и разряжается до напряжения U_2 . Тогда за одно переключение переключателя Π на заряд и разряд количество электричества, подводимое к конденсатору и отдаваемое им микроамперметру, $q = CU$, где $U = U_1 - U_2$.

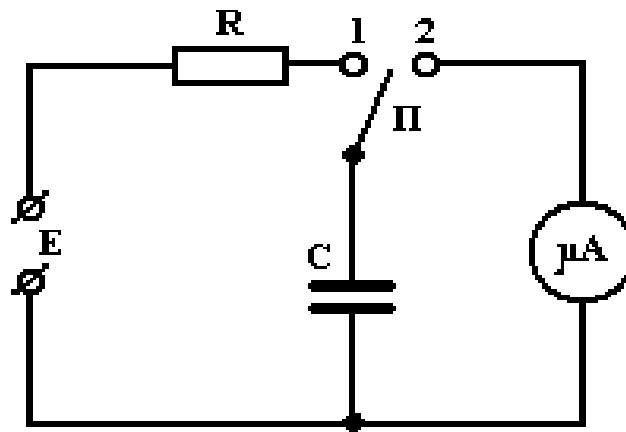


Рис. 2.1. Принцип действия конденсаторного частотомера.

При переключении f раз в секунду количество электричества, протекающее через прибор в 1 секунду, т.е. ток через микроамперметр, $I = qf = CUf$.

Следовательно, ток, протекающий через микроамперметр, связан линейной зависимостью с частотой переключений конденсатора. При условии, что частота переключений f равна измеряемой $f_{изм}$, показания прибора прямо пропорциональны $f_{изм}$, т.е. шкалу можно проградуировать в значениях частоты:

$$f = \frac{I}{CU}.$$

Структурную схему прибора можно представить в следующем виде:



Рис. 2.2. Структурная схема конденсаторного частотомера.

Прибор работает следующим образом. На вход подается напряжение исследуемой частоты. В усилителе – ограничителе с целью стабилизации условий зарядки конденсатора оно приобретает форму меандра. Меандр управляет зарядно-разрядным устройством, которое работает в режиме ключа: зарядный ток протекает через миллиамперметр, градуированный в единицах частоты, разрядный через открывающийся транзистор.

Прибор для измерения частоты, основанный на описанном методе, называют конденсаторным частотомером. В этом приборе переключателем служит электронный коммутатор, осуществляющий переключение с частотой $f_{изм}$ при подаче на его вход напряжения измеряемой частоты.

Для обеспечения линейной зависимости показаний прибора от частоты в схеме частотомера предусматривается ограничитель, поддерживающий постоянство верхнего U_1 и нижнего U_2 уровней напряжения на обкладках конденсатора во всем рабочем диапазоне частот.

Пределы измеряемых частот (поддиапазоны) регулируются изменением емкости C конденсатора и шунтированием микроамперметра.

Раздел 3. Гетеродинный метод.

Среди методов, позволяющих измерить частоту с высокой точностью, весьма распространен гетеродинный метод [5,6,7]. Он заключается в сравнении измеряемой частоты с частотой перестраиваемого гетеродина. Приборы, в которых используется этот метод, называют гетеродинными частотомерами или волномерами.



Рис. 2.3. Функциональная схема гетеродинного частотомера.

Работа гетеродинного частотомера и методика измерений сводится к следующему. В положении *И* переключателя *П* на смеситель поступают одновременно колебания двух частот: измеряемой $f_{изм}$ и гетеродина $f_г$. На выходе смесителя получаются напряжения комбинационных частот, и в том числе частоты биений. Гетеродин перестраивают по частоте до появления нулевых (низкочастотных) биений, фиксируемых по индикаторному прибору. Индикатор может быть тональным (телефоны) или визуальным (осциллограф, электронно-световая индикаторная лампа, стрелочный прибор). После получения нулевых биений по шкале гетеродина определяют частоту его колебаний и, следовательно, $f_{изм}$, так как при нулевых биениях $f_{изм} = f_г$.

Точность измерений зависит от точности образцовой меры, т.е. от стабильности частоты и постоянства градуировки гетеродина, а также точности сравнения и фиксации нулевых биений.

Для уменьшения погрешности, связанной с градуировкой гетеродина, в схемах многих частотомеров предусмотрен кварцевый генератор. С его помощью проверяют и корректируют градуировку шкалы. Эту операцию производят до начала измерений неизвестной частоты. Для этого переключатель рода работы ставят в положение *К*. К смесителю, помимо гетеродина, оказывается подключенным кварцевый генератор, колебания которого содержат много гармоник. Отсчетный лимб гетеродина устанавливают в положение, соответствующее ближайшей к измеряемой частоте «кварцевой точке». Индикаторный прибор фиксирует наличие биений, которые при помощи «корректора» гетеродина доводят до нулевых. Если у гетеродина отсутствует «корректор», то шкалу проверяют в соседних по обе

стороны от $f_{изм}$ точках, производят линейную интерполяцию и вводят поправку, уточняющую градуировку. После корректировки кварцевый генератор отключают и на смеситель подают сигнал измеряемой частоты. Гетеродин настраивают на частоту, при которой получаются нулевые биения, и делают окончательный отсчет по его шкале. При очень высоких частотах получение низкочастотных биений затруднительно. В подобных случаях вместо индикаторного прибора можно включить низкочастотный частотомер (например, конденсаторный) и по нему определить разностную частоту F_0 . Тогда $f_{изм} = f_2 \pm F_0$ (знак поправки F_0 зависит от того, с какой стороны подходит $f_{изм}$ при настройке гетеродина).

В диапазоне СВЧ нередко применяют гетеродины, основная частота колебаний которых во много раз ниже измеряемой. При этом используются высшие гармоники гетеродина. Измеряемая частота сравнивается с n -й гармоникой гетеродина при нулевых биениях: $f_{изм} = n f_2$.

При смещении колебаний гетеродина и источника измеряемой частоты (калибратора) возможны биения между различными гармониками, например между второй гармоникой источника и пятой гетеродина. В ряде случаев эти явления используют для расширения диапазона гетеродинного частотомера. Иногда же они играют нежелательную роль, так как вносят осложнения в процесс измерений.

Раздел 4. Осциллографический метод.

Определение частоты с помощью осциллографа возможно несколькими способами [5,6,7].

При линейной развертке сигнал измеряемой частоты f_x сравнивается с частотой меток времени калибратора f_H . Напряжение f_x подается на вход X , а f_H — на вход Z (на модулятор). Устанавливают на экране несколько периодов измеряемой частоты и регулируют частоту меток так, чтобы в каждом периоде укладывалось целое число $U X(n)$. Тогда

$$f_x = n^{-1} f_m = \frac{f_m}{n}.$$

При синусоидальной развертке $f_{ОБР}$ подается на вход X , при этом генератор развертки выключен, а f_x — на вход Y . Изменяя $f_{ОБР}$, добиваются неподвижных фигур Лиссажу (Если фигура медленно вращается, то $\Delta f = f_{ОБР} - f_x = \frac{n}{T_H}$, где T_H — время наблюдения, n — число вращений). Кратность частот определяется по отношению числа точек пересечения осциллограммы вертикальными и горизонтальными линиями n_Γ и n_B .

$$f_x = \frac{n_\Gamma}{n_B} f_{ОБР} \quad f_x = 3 f_{ОБР}$$

При круговой развертке на оба входа (X и Y) осциллографа подается напряжение образцовой частоты (со сдвигом фаз на 90°), а на вход Z — сигнал исследуемой частоты f_x (или наоборот). В первом случае $f_x = n f_{ОБР}$, во втором

$f_x = \frac{f_{ОБР}}{n}$. Этот метод работает до $n = 15 \div 25$.

Раздел 5. Резонансный метод.

Метод заключается в сравнении измеряемой частоты с соответствующей резонансной частотой эталонного колебательного контура (резонатора) [2,3,4,5,7,8]. Структурную схему реализующего данный метод устройства можно представить в виде:

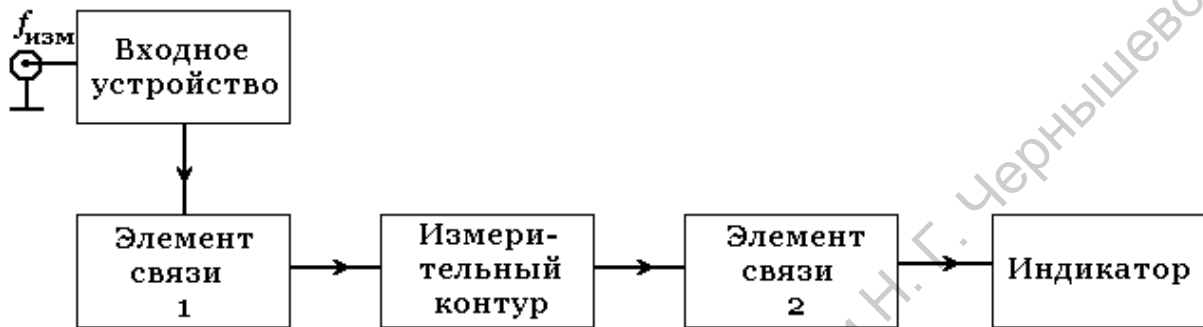


Рис. 2.4. Функциональная схема резонансного частотомера.

Источник измеряемой частоты $f_{изм}$ с помощью элемента связи, соединенный с прецизионным измерительным контуром (волномером – резонатором), который через второй элемент связи соединен с индикатором.

Контур и индикатор объединены в одно устройство, называемое, в зависимости от градуировки шкалы, резонансным волномером или резонансным частотомером.

Основные источники погрешности данного метода:

- 1) Нестабильность резонансной частоты за счет ухода геометрических размеров с изменением температуры

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\alpha k \Delta T, \text{ где}$$

α - линейный температурный коэффициент, k - конструктивный коэффициент.

- 2) Нестабильность за счет внесения реактивного сопротивления.
- 3) Неточности фиксации резонанса.

Типичная резонансная кривая измерительного контура изображена на рис. 2.5.

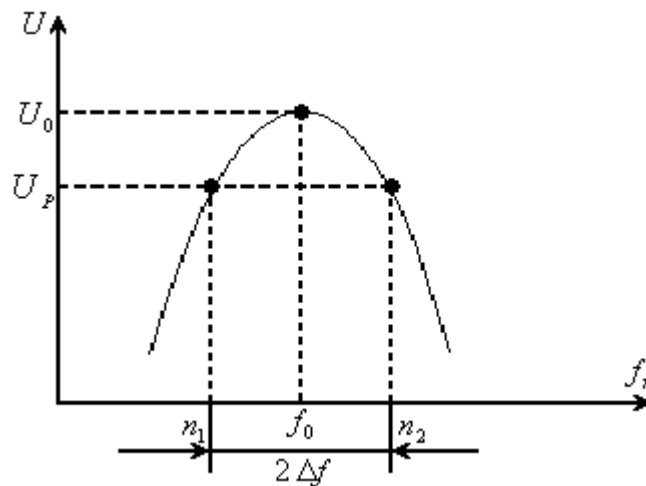


Рис. 2.5.

Из уравнения резонансной кривой можно получить формулу:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{\sqrt{\left(\frac{U_0}{U_p}\right)^2 - 1}}{2Q}, \text{ где}$$

U_0 - показания на резонансе, U_p - показания при расстройке на Δf .

Для измерения на СВЧ колебательный контур выполняется в виде отрезка коаксиальной линии, либо в виде объемного резонатора. На входе имеется элемент связи (петля, зонд, щель, круглое отверстие) или антенна. Может быть также включен аттенюатор.

Для разомкнутой линии: $l \approx (2n+1)\frac{\lambda}{4}$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. $l_1 = \frac{\lambda}{4}$ и $l_2 = \frac{3\lambda}{4}$, т.е. их разность равна $\frac{\lambda}{2}$. В общем случае:

$$l_1 - l_2 = [2(n+1) + 1]\frac{\lambda}{4} - (2n+1)\frac{\lambda}{4} = 2n\frac{\lambda}{4} + 2\frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} - \frac{2n\lambda}{4} - \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}.$$

Для системы с нагруженной линией меняется одновременно и длина линии и емкость нагрузки, за счет чего увеличивается коэффициент перекрытия. Резонанс возникает при условии:

$$\frac{1}{\omega C} = \rho \operatorname{tg} \beta l = 138 \operatorname{tg} \frac{D}{d} \operatorname{tg} 2\pi \frac{l}{\lambda}, \text{ где}$$

D - диаметр внешнего проводника (внутри), d - внешний диаметр внутри проводника, ρ - волновое сопротивление линии.

Частота определяется по градуировочным таблицам.

Раздел 6. Метод дискретного счета.

Суть данного метода состоит в том, что переменное напряжение f_x , частоту которого нужно измерить, преобразуют в последовательность односторонних импульсов с той же частотой следования (f_x) [4,5,6,7]. Если сосчитать число импульсов N за известный интервал времени ΔT , то легко

определить частоту $f_x = N / \Delta T$. Если выбрать $\Delta T = 1$ сек., то N будет численно равно значению частоты f_x .

Принцип измерения методом дискретного счёта иллюстрируется рис. 2.6.

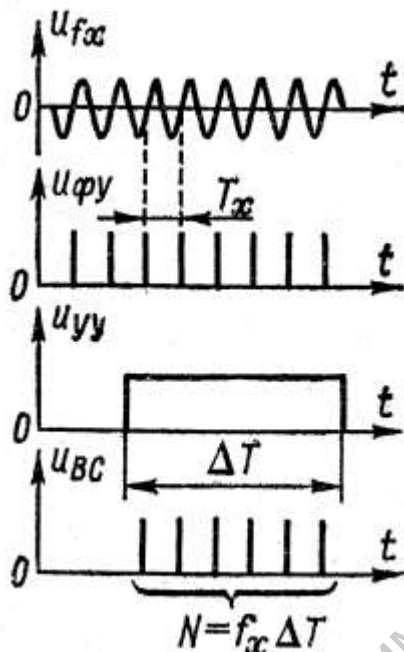


Рис. 2.6.

Приборы, созданные на основе этого метода, называются электронно-счетными частотомерами.

Рассмотрим упрощенную структурную схему электронно-счетного частотомера (цифрового частотомера).

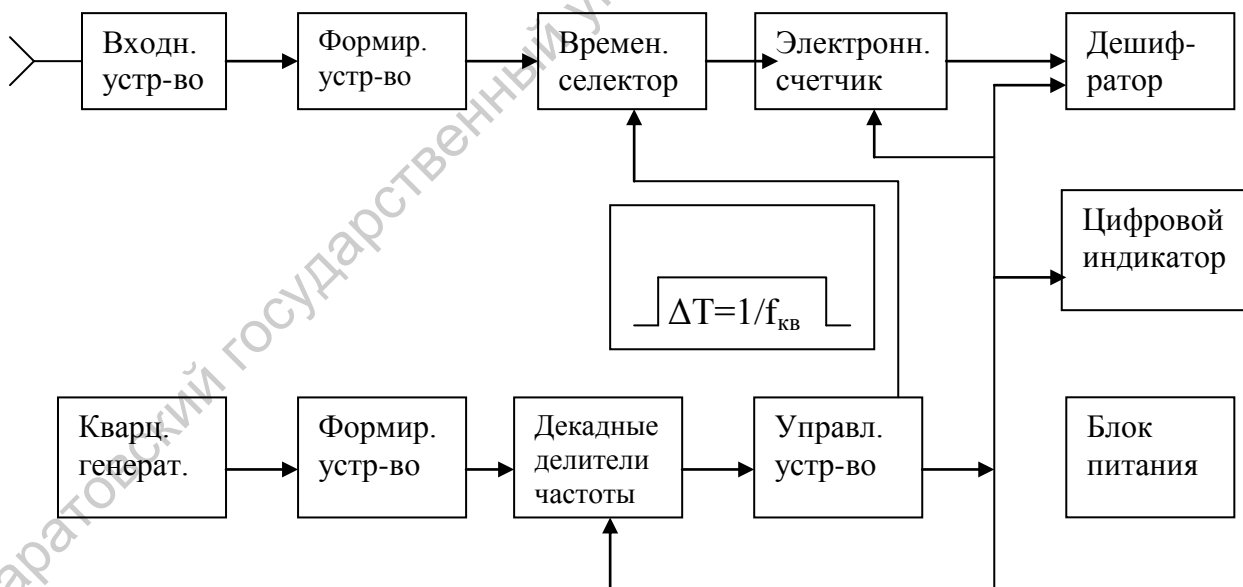


Рис. 2.7. Типовая структурная схема цифрового частотомера.

С помощью входного устройства устанавливается напряжение, необходимое для нормальной работы формирующего устройства, в котором из входного сигнала формируются прямоугольные импульсы $U_{\phi y}$, форма которых не изменяется при изменении частоты и амплитуды (в установленных для данного

прибора пределах) сигнала. Для формирования импульсов применяют, например, триггер Шмитта или схемы на туннельных диодах. Временной селектор пропускает импульсы на электронный счетчик в течение строго постоянного времени ΔT , формируемого из частоты генератора с кварцевой стабилизацией частоты: $\Delta T = 1/f_{кв}$. В управляющем устройстве УУ вырабатывается импульс напряжения $U_{уу}$ длительностью ΔT , который открывает временной селектор так, что на электрический счетчик приходит группа импульсов $N = f_x \Delta T$, которые и фиксируются счетчиком. Через дешифратор эта информация поступает на цифровой индикатор, на экране которого высвечиваются показания в единицах частоты.

Частота опорного генератора обычно выбирается равной 1 или 5 МГц., что соответствует длительности времени счета ΔT равной 1,0 или 0,2 мксек. Очевидно, поэтому, что для частот, соизмеримых с $f_{кв}$ и меньших ее, частотомер работать не будет.

Чтобы получить возможность измерять частоты до долей Гц, в схему вводят декадные делители частоты, которые уменьшая значения $f_{кв}$ в 10^n раз, во столько же раз увеличивая ΔT . Так, если $1 < n < 7$, то после делителей частоты становятся равными 100, 10 и 1 кГц, 100, 10 и 1 Гц, 0,1 Гц. Время счета соответственно меняется декадными ступенями от 10^{-5} до 10 сек. В этом случае (с применением декадного делителя)

$$f_x = \frac{N}{10^n T_{кв}} = N \cdot f_{кв} \cdot 10^{-n}$$

Управляющее устройство, вместе с воздействием на временной селектор, выдает импульсы для автоматического сброса показания с табло и обнуления счетчика, дешифратора и делителей после каждого цикла счета. Однако, в управляющем устройстве предусмотрена блокировка временного селектора на некоторое время, в течение которого сохраняются показания на табло. Этот интервал называется временем индикации и устанавливается (вручную) в пределах нескольких секунд. Возможен и ручной режим: однократный счет при нажатии на кнопку.

Остановимся теперь на погрешностях, присущих частотомерам.

Случайные погрешности измерения частоты складываются, в основном, из погрешности дискретности, то есть из погрешности счета импульсов ΔN и кратковременной нестабильности частоты $\Delta f_{кв}$.

По правилам погрешности косвенных измерений абсолютная погрешность измерения частоты может быть представлена в виде:

$$\Delta f_x = \sqrt{N^2 (\Delta f_{кв})^2 + f_{кв}^2 (\Delta N)^2}$$

Относительная погрешность может быть представлена в виде:

$$\delta_{f_x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \delta_{кв}^2},$$

где $\Delta N / N$ – относительная погрешность дискретности

$$\delta_{кв} = \frac{\Delta f_{кв}}{f_{кв}} - \text{кратковременная нестабильность}$$

генератора.

Абсолютная погрешность дискретного счета ΔN возникает за счет несинхронности входного напряжения с напряжением кварцевого генератора (рис 2.8),

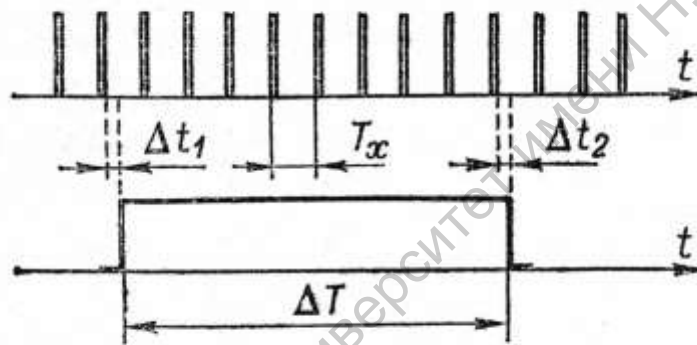


Рис. 2.8.

Очевидно, что в общем случае начало и конец калиброванного импульса ΔT не совпадают с началом периода повторения импульсов сигнала. Можно показать, что среднеквадратичное значение погрешности в этом случае равно

$$\sigma = \frac{T_x}{\sqrt{6}}$$

Если синхронизировать начало времени счета, то $\sigma = \frac{T_x}{\sqrt{3}}$.

Максимальная погрешность может быть при $\Delta N = 1$. Тогда

$$\delta_{f_{\max}} = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)^2 + \delta_{кв}^2}.$$

Поскольку кратковременная нестабильность частоты очень мала, можно считать, что

$$\delta_{f_{\max}} \approx \frac{1}{N} = \frac{f_{\text{кв}}}{f_x \cdot 10^n}; \quad \text{так как } N = \frac{f_x}{f_{\text{кв}}} \cdot 10^n$$

Отсюда видно, что если N мало, погрешность может быть весьма велика. Для её уменьшения надо увеличивать время счета. Так, для достижения $\delta_{f_{\max}} = 10^{-5}$ оно должно быть 100 сек. Поэтому для низких частот для достижения приемлемой погрешности удобнее измерять не частоту, а период.

Принцип действия такого прибора иллюстрируется рис. 2.9.

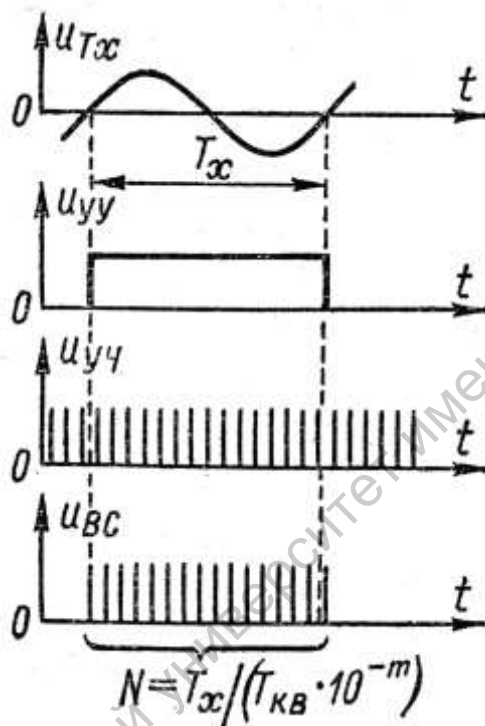


Рис. 2.9.

Структурная схема прибора для измерения периода колебаний изображена на рис.2.10

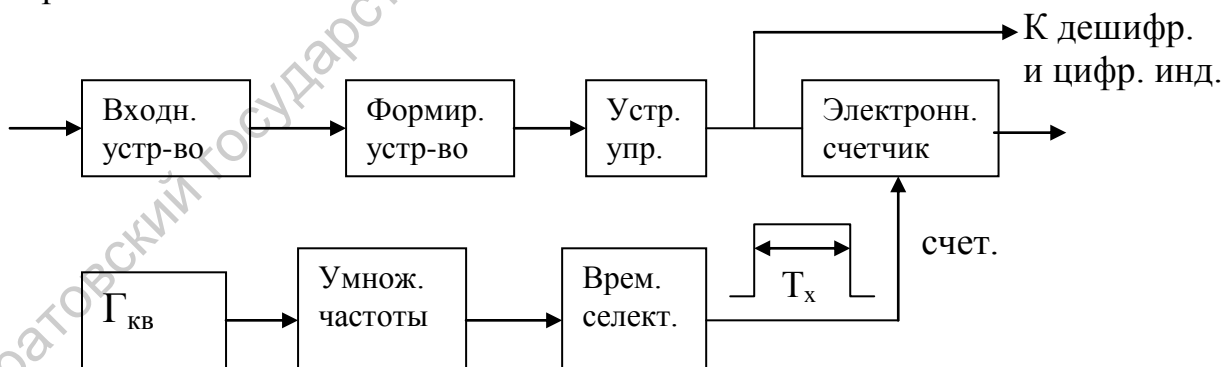


Рис. 2.10

Процесс измерения периода колебаний аналогичен рассмотренному выше для измерения частоты. Отличие состоит в том что временной селектор открывается импульсом, формируемым из напряжения измер. сигнала, а считаются так называемые метки времени, т.е. импульсы, полученные из сигнала.

$f_{\text{кв}}$. Если на счетчик пришло N меток при частоте генератора $f_{\text{кв}}$, то есть $T_x = \frac{N}{f_{\text{кв}}}$,

а соответственно, $f_x = \frac{f_{\text{кв}}}{N}$

Погрешность измерения определяется аналогично тому, как это делалось при измерении частоты

$$\delta_T = \sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \delta_{\text{кв}}^2}, \quad N = \frac{T_x}{T_{\text{кв}} \cdot 10^{-m}}$$

$$\delta_{T_{\text{max}}} = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)^2 + \delta_{\text{кв}}^2}, \quad \text{или} \quad \delta_{T_{\text{max}}} \approx \frac{1}{N} = \frac{f_x}{f_{\text{кв}}}$$

Очевидно, что чем выше $f_{\text{кв}}$, тем меньше погрешность. Поэтому частоту $f_{\text{кв}}$ умножают на 10^m . Тогда

$$f_x = \frac{10^m f_{\text{кв}}}{N}, \quad \text{а} \quad \delta_{T_{\text{max}}} = \delta_{f_{\text{max}}} = \frac{f_x}{10^m f_{\text{кв}}}$$

Следует отметить, что для некоторой граничной частоты $f_{\text{гр}}$ погрешность измерения частоты и периода одинаковы.

$$\frac{f_{\text{кв}}}{f_{\text{гр}} \cdot 10^{n_{\text{max}}}} = \frac{f_{\text{гр}}}{f_{\text{кв}} \cdot 10^{m_{\text{max}}}}, \quad \text{то есть} \quad f_{\text{кв}}^2 \cdot 10^{m_{\text{max}}} = f_{\text{гр}}^2 \cdot 10^{n_{\text{max}}}, \quad \text{откуда:}$$

$$f_{\text{гр}}^2 = f_{\text{кв}}^2 \cdot \frac{10^{m_{\text{max}}}}{10^{n_{\text{max}}}} = f_{\text{кв}}^2 \cdot 10^{m_{\text{max}} - n_{\text{max}}}, \quad \text{т.е.}$$

$$f_{\text{гр}} = f_{\text{кв}} \cdot 10^{\frac{m_{\text{max}} - n_{\text{max}}}{2}}$$

Если $f_x > f_{\text{гр}}$, то следует измерять частоту, если $f_x < f_{\text{гр}}$ – период.

Пример

$$f_{\text{кв}} = 1 \text{ МГц}$$

$$m_{\text{max}} = 2$$

$$n_{\text{max}} = 7$$

$$f_{\text{гр}} = 10^6 \cdot 10^{-2,5} = 3160 \text{ Гц}$$

Электронные частотомеры можно использовать также для подсчета числа

импульсов в заданный интервал времени, для измерения временного интервала, отношение двух частот, а также любых физических величин, преобразованных в частоту или временные интервалы.

Заключение

В данном пособии кратко рассмотрены основные, наиболее часто встречающиеся в электро– и радиотехнике методы измерения частоты электрических сигналов. Несмотря на то, что пособие рассчитано на студентов специальности 010801 «Радиофизика и электроника», изучающих курс «Измерение неэлектрических величин радиотехническими методами», оно может быть полезным для студентов всех факультетов и специальностей, проходящих лабораторные занятия по курсам «Радиотехника», «Радиоэлектроника» и аналогичным, которые выполняются в учебных лабораториях кафедры радиотехники и электродинамики физического факультета.

Библиографический список

1. Метрология и радиоизмерения. Учебник для вузов. «Академия», 2006 г.
2. Измерения в электронике. Справочник. Под ред. В.А. Кузнецова. М., Энергоатомиздат, 1987 г.
3. Сигов А.С. Электрорадиоизмерения. «Форум», 2005 г.
4. Ф.В. Кушнир. Электрорадиоизмерения. Л., «Энергоатомиздат», 1983 г.
5. Г.Я. Мирский. Радиоэлектронные измерения. М., «Энергия», 1975 г.
6. Б.В. Дворяшин. Основы метрологии и радиоизмерения. «Академия», 2005 г.
7. Б.Н. Лозицкий, И.И. Мельниченко. Электроизмерения. М., «Энергия», 1976 г.
8. Р.Г. Карпов, Н.Р. Карпов. Электрорадиоизмерения. М., «Высшая школа», 1978 г.