

СМЕШИТЕЛИ ЧАСТОТ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЕМКОСТИ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО СХЕМЕ F-МЕТРА

Э.А.КАЛЬМ

Для контроля состава веществ, их молекулярного состояния, влажности различных материалов в измерительной технике широко используют зависимость величины диэлектрической проницаемости от названных параметров. При этом изменение диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего измерительный конденсатор, являющийся первичным измерительным преобразователем, приводит к изменению его начальной электрической емкости. Непрерывное измерение емкости позволяет строить график, отражающий характер изменения контролируемого параметра во времени.

Наряду с мостовыми схемами, широкое распространение для преобразования емкости в активную величину получили устройства, основанные на резонансных методах. Включение измерительного конденсатора в колебательную систему автогенератора позволяет достаточно просто реализовать преобразование емкости в частоту электрических колебаний. Достоинства этого метода хорошо известны [1, 2]. Чувствительность таких устройств весьма высока и сохраняется в широком диапазоне приращений величины емкости измерительного конденсатора. При необходимости чувствительность легко регулируется.

При измерении частоты электрических колебаний, используемой в качестве активной величины, применяют различные типы преобразователей в зависимости от способов дальнейшего отображения получаемой информации: частота - напряжение, частота - среднее значение тока, частота - цифра, частота - код. При необходимости измерения небольших приращений емкости первичного измерительного преобразователя, а следовательно, и регистрации малых приращений частоты, целесообразно использовать интерференционный метод измерения частоты. В этом случае полезным сигналом преобразования является только разностная частота

$$F = f_{\Gamma} - f_{\Pi} \quad , \quad (I)$$

где f_{Γ} , f_{Π} - частота вспомогательного (спорного) гетеродина и измерительного генератора соответственно.

Особенностью используемых смесителей в таком преобразователе частоты является широкополосность, поскольку средняя частота канала связи у них

$F_{\text{см.ср}}$ сопоставима с полосой пропускания канала связи ΔF , т.е.

$$\Delta F / F_{\text{см.ср}} \approx 0,5.$$

Для валаометрических высокочастотных систем, построенных на базе F -метра, ΔF обычно лежит в пределах интервала частот 0-30 кГц и определяется в основном электрофизическими свойствами контролируемого материала, типом и конструкцией первичного измерительного преобразователя и частотой, на которой производится измерение. Поскольку разностная частота F находится в этом же диапазоне, а значит $F \ll f_H, f_T$, то выбором соответствующей ΔF можно устранить проникновение в последующие узлы компонентов с частотами $|sf_T + hf_H|$, s и h имеют значения 0, 1, 2, 3, 4, 5, ...

Однако комбинационные компоненты выходного напряжения смесителя с частотами $|sf_T - hf_H|$ при $s = h = n = 2; 3; 4; 5$ оказываются в пределах частотного интервала канала связи и при больших амплитудах могут вызывать значительные искажения выходного сигнала. Таким образом, опасные комбинационные паразитные составляющие имеют частоту $f_{\text{пк}} = nF$, откуда следует, что наибольшие искажения проявляются на частотах $F \leq F_{\text{см.макс}}$.

Итак, основные требования к преобразователям частоты измерительных систем рассматриваемого назначения можно сформулировать следующим образом.

1. Количество паразитных компонентов преобразования на выходе смесителя должно быть наименьшим, а их амплитуды должны быть значительно ослаблены по сравнению с амплитудой разностной частоты.

2. На выходе смесителя колебания измерительного генератора и опорного гетеродина должны быть существенно подавлены, в противном случае при $f_H = f_T$ будет резко увеличиваться амплитуда выходного сигнала смесителя с указанной частотой, что является помехой.

3. Преобразователь частоты должен быть устойчив в широком смысле: параметры его не должны меняться при воздействии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, смеситель должен быть далек от самовозбуждения. Коэффициент передачи рассматриваемых смесителей мало зависит от частоты измерительного генератора, так как диапазон ее изменения невелик. Однако то обстоятельство, что разностная частота может в принципе изменяться от 0 до десятков килогерц, определяет еще два требования: коэффициент передачи смесителя должен как можно меньше зависеть от частоты измерительного генератора; избирательная система в выходной цепи смесителя вместе с усилителем разностной частоты должна формировать требуемую амплитудно-частотную характеристику устройства.

В большинстве случаев частота преобразуется на основной гармонике опорного гетеродина. Для повышения стабильности частоты его и для уменьшения взаимного влияния настроек измерительного и гетеродинного контуров частоту гетеродина можно выбрать в K раз ниже базисной частоты измерительного генератора. Тогда разностная частота

$$F = Kf_T - f_H, \quad (2)$$

где $K = 2, 3 \dots$, т.е. в этом случае используется K -ая гармоника гетеродина.

Вероятность появления комбинационных частот на гармониках гетеродина резко уменьшается. Действительно, при $f_H = 495$ кГц и $f_T = 250$ кГц ($K = 2$) и $\Delta F = 25$ кГц основная разностная частота (полезный сигнал) будет равна $2 \cdot 250 - 495 = 5$ кГц. Даже наиболее низкая комбинационная частота, возникающая только на четвертой гармонике гетеродина и второй гармонике измерительного генератора, равна $4 \cdot 250 - 2 \cdot 495 = 10$ кГц, будет значительно ослаблена, так как амплитуда четвертой гармоники гетеродина мала. Крутизна преобразования при этом, естественно, снижается и становится равной половине амплитуды используемой гармоники, возрастает коэффициент шумов смесителя, однако подбором амплитуды опорного гетеродина эти отрицательные моменты можно устранить.

Для уменьшения коэффициента передачи по паразитным каналам следует повышать избирательность выходного контура опорного гетеродина, настроенного на K -ую гармонику f_T .

При выполнении указанных требований, если частоту опорного гетеродина заставить кварцем, а измерительный генератор поместить в активный термостат, в котором температура автоматически устанавливается и поддерживается в интервале $(40-50)^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, то оказывается возможным контролировать изменение емкости первичного измерительного преобразователя с очень высокой степенью точности.

Принципиально возможно использование аддитивных смесителей, когда сумма напряжений сигнала и гетеродина детектируется на нелинейном элементе, и мультипликативных, у которых эффект преобразования достигается благодаря непосредственному перемножению указанных напряжений. В современных схемах смесителей частот наиболее широко используются германиевые и кремниевые высокочастотные диоды, биполярные и полевые транзисторы, в последнее время стали применяться интегральные микросхемы.

В транзисторных смесителях применяют маломощные транзисторы, предельная частота усиления которых должна превышать максимальную частоту высокочастотного сигнала по крайней мере в 2 раза. Включаются транзисторы по схеме с общим эмиттером (истокom). Приблизительно параметры биполярного транзистора в режиме преобразования частоты следующие:

Входная проводимость $g_{вх.п}$	$0,7 g_{вх}$
Входная емкость $c_{вх.п}$	$0,7 c_{вх}$
Крутизна преобразования $s_{оп}$	$0,4 s_0$
Выходная проводимость $g_{вых.п}$	$0,7 g_{вых}$
Выходная емкость $c_{вых.п}$	$0,7 c_{вых}$

Параметры $g_{вх}$, s_0 , $c_{вх}$ определяются в усилительном режиме на базисной частоте измерительного генератора, а $g_{вых}$, $c_{вых}$ — в усилительном режиме на максимальной разностной частоте. Расчет преобразователя частоты на биполярном транзисторе аналогичен расчету усилителя, причем режим выбирается таким, чтобы рабочая точка транзистора находилась в области наиболее нелинейного участка входной характеристики. Ток эмиттера обычно составляет доли миллиампера, амплитуда напряжения гетеродина, включен-

ного в цепь эмиттера, подбирается экспериментально и составляет скол. I В.

Полевой транзистор может использоваться как в режиме класса А, так и в режиме, при котором ток стока существует лишь в течение части периода напряжения генератора или гетеродина. Однако в режиме А сток-затворная характеристика квадратична, и ток стока содержит весьма малое число паразитных компонентов.

В простых однотранзисторных смесителях частоты выгоднее применять полевые транзисторы, так как паразитных компонентов у таких устройств содержится меньше, чем у смесителей на биполярных транзисторах.

Особенностью смесителей на сложных преобразовательных элементах (ПЭ) является то, что они обеспечивают значительное подавление паразитных компонентов. Сложные смесители могут быть трансформаторными и бестрансформаторными. Трансформаторы со средней точкой выполняют роль фазовращающих элементов, и на частотах выше 1 МГц требуют специального исполнения для уменьшения проходной емкости между обмотками. Бестрансформаторные смесители предпочтительнее, так как позволяют использовать интегральные микросхемы. На практике получили распространение балансные смесители и мультипликативные смесители на основе дифференциального усилителя.

Балансные смесители можно представить как соединение специальным образом нескольких простых пассивных или однотранзисторных ПЭ, выбор основных характеристик последних изложен выше. М.Е.Мовшиновичем [3] описан общий подход к расчету характеристик сложных смесителей с использованием известных характеристик простого преобразователя. Сложные смесители целесообразно использовать в F -мет-

рахах, у которых велик диапазон разностной частоты.

Недостатком балансного смесителя является трудность его точной балансировки в диапазоне частот из-за влияния многих факторов, часто даже не поддающихся учету. Аналогичные балансные смесители достоянием можно получить у смесителя, использующего нелинейные элементы с вольт-амперной характеристикой, описываемой уравнением кубической параболы

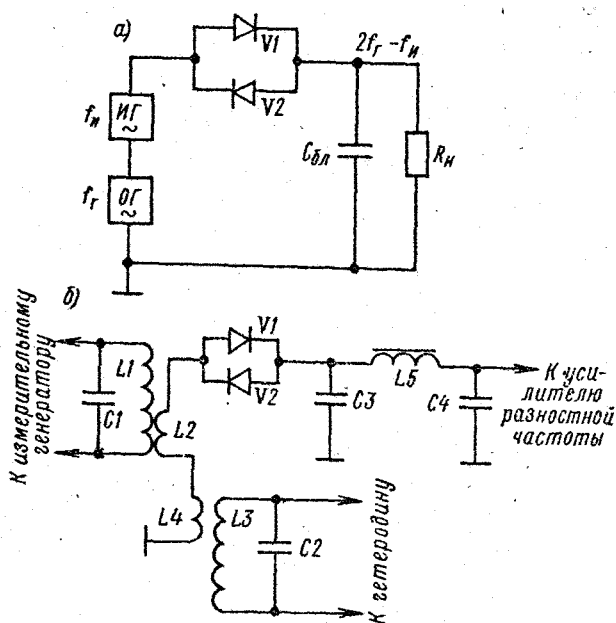


Рис. 1. Смеситель на нелинейном элементе с кубической вольт-амперной характеристикой

$$I = AU + BU^3, \quad (3)$$

где A и B — постоянные коэффициенты.

Характеристикой, близкой к требуемой, обладает цепь из двух встречно-параллельно соединенных односторонних специально подобранных кремниевых диодов, параметры которых практически одинаковы. Упрощенная схема такого смесителя показана на рис.1,а. На нелинейный элемент, выполненный на диодах $V1$ и $V2$ подана сумма напряжений U измерительного генератора ИГ $U_{\text{И}}$ и гетеродина ОГ $U_{\text{Г}}$.

$$U = U_{\text{И}} \cos 2\pi f_{\text{И}} t + U_{\text{Г}} \cos 2\pi f_{\text{Г}} t. \quad (4)$$

Нелинейный элемент нагружен резистором $R_{\text{Н}}$, замунтированным блокировочным конденсатором $C_{\text{Б}}$.

Подставляя выражение (4) в уравнение (3) убеждаемся, что в цепи нелинейного элемента протекают токи частот $f_{\text{И}}$, $f_{\text{Г}}$ и продуктов преобразования с частотами $2f_{\text{Г}} \pm f_{\text{И}}$.

При условии $U_{\text{Г}} \gg U_{\text{И}}$ амплитуды остальных продуктов преобразования оказываются пренебрежимо малыми. Высоочастотные токи замыкаются на блокировочный конденсатор $C_{\text{Б}}$, в нагрузке протекает лишь ток разностной частоты.

$$I = \frac{3}{4} B U_{\text{И}} U_{\text{Г}}^2 \cos 2\pi (2f_{\text{Г}} - f_{\text{И}}) t. \quad (5)$$

Смеситель работает как ключ, замыкающий цепь с частотой, равной удвоенной частоте гетеродина. Когда частота замыканий ключа близка к частоте $f_{\text{И}}$, в нагрузке выделяются биения с разностной частотой $2f_{\text{Г}} - f_{\text{И}}$, если частота $f_{\text{И}}$ ниже удвоенной частоты гетеродина. При включении неидентичных диодов симметрия ВАХ относительно начала координат нарушается, в выражении (3) появляется квадратичный член, обуславливающий появление на выходе смесителя напряжений с частотами $f_{\text{И}}$ и $3f_{\text{Г}}$. Однако на практике проще подобрать одинаковые диоды, нежели отрегулировать балансный смеситель.

Принципиальная схема простого аддитивного смесителя, построенного на рассмотренном принципе, приведена на рис.1,б. Контур $L1C1$ настроен на базисную частоту измерительного генератора, контур гетеродина $L3C2$ должен быть настроен на частоту $\frac{f_{\text{Б}}}{2}$. Связь контуров со смесителем индуктивная, $L2$ и $L4$ - катушки связи, число их витков подбирается экспериментально по максимуму выходного сигнала смесителя. Нагрузкой служит

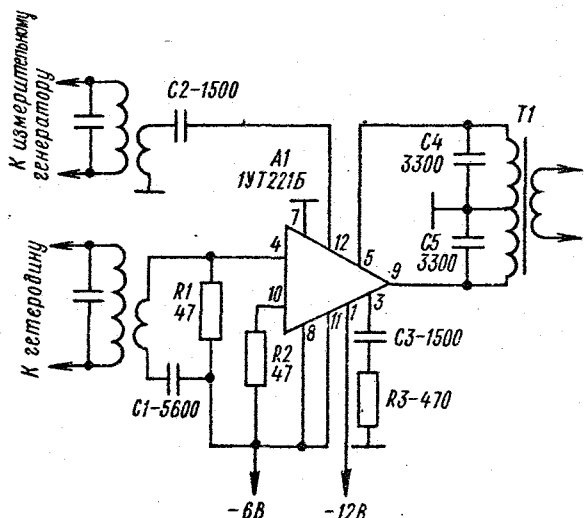


Рис.2. Принципиальная электрическая схема смесителя частот на базе операционного усилителя

фильтр нижних частот $СЗЛ5С4$, частота среза которого задается техническими условиями на прибор. Для использования в смесителе лучшими из широко распространенных диодов являются КД503А, вполне пригодны диоды Д104, Д105.

На базе подобной схемы можно простроить и балансную, тогда перестройка контура измерительного генератора совершенно не будет влиять на частоту гетеродина.

В качестве примера мультипликативного смесителя, выполненного на базе операционного усилителя IUT221В, показана схема на рис.2. Нагрузкой служит низкочастотный трансформатор, первичная обмотка которого имеет вывод от середины. В данном случае можно обойтись без дополнительного фильтра низкой частоты, так как его образует первичная обмотка трансформатора $T1$ и конденсаторы $С4$ и $С5$. Ток коллектора смесительного транзистора устанавливается в пределах 0,3–0,7 мА, одновременно проверяется отсутствие паразитной генерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кричевский Е.С. Теоретические основы и анализ систем высокочастотного контроля влажности при обогащении полезных ископаемых. Автореферат докторской диссертации. Л., изд. ЛГИ, 1968.
2. Кричевский Е.С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых. М., Недра, 1972.
3. Мовшович М.Е. Полупроводниковые преобразователи частоты. Л., Энергия, 1974.