

Измеритель КБВ

Предлагаемый ниже измеритель КБВ (рис.4) представляет собой аналоговое вычислительное устройство. Но прежде чем приступить к описанию измерителя КБВ рассмотрим как аналоговый перемножитель сигналов преобразовать в делитель сигналов.

За основу возьмем аналоговый перемножитель AD534 [1] (ближайший функциональный аналог К525ПСЗ, но необходимо иметь в виду другую “разводку” выводов). На рисунке **рис.1 а** приведена функциональная схема микросхемы AD534, ее передаточная функция имеет вид:

$$W = K \cdot \left\{ \frac{(X1 - X2) \cdot (Y1 - Y2)}{10} - (Z1 - Z2) \right\}.$$

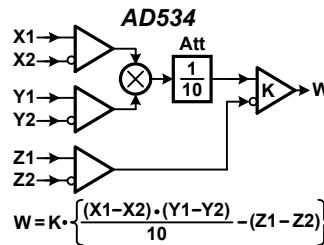


Рис.1 а

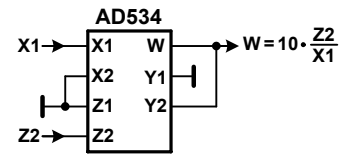


Рис.1 б

Коэффициент усиления **К** (рис.1 а) в идеальном случае должен равняться бесконечности, при этом частное от деления выходного сигнала **W** на коэффициент усиления **К** должно равняться нулю ($\frac{W}{K} = 0$). На практике **К** большое число, но все же конечное, поэтому отношение $\frac{W}{K}$ не равно абсолютному нулю, но очень близко к нему, обычно $\pm 0,5 \text{—} \pm 3 \text{ мВ}$, т. е. практически ноль. Исходя, из данного практического приближения получаем:

$$0 = \frac{(X1 - X2) \cdot (Y1 - Y2)}{10} - (Z1 - Z2), \quad \frac{(X1 - X2) \cdot (Y1 - Y2)}{10} = Z1 - Z2.$$

Приравняв нулю **X2=0**, **Y1=0**, **Z1=0** и подав выходной сигнал **W** на вход **Y2** получаем: $\frac{(X1 - 0) \cdot (0 - W)}{10} = 0 - Z2$, $\frac{X1 \cdot (-W)}{10} = -Z2$ “ликвидируя” знаки “минусы” в левой и правой части

уравнения и выразив **W** получаем делитель с масштабным коэффициентом 10: $W = 10 \cdot \frac{Z2}{X1}$ — **рис.1 б**.

Далее необходимо выяснить, что лучше измерять КСВ или КБВ? С теоретической точки зрения разницы никакой, так как КСВ и КБВ это взаимно обратно пропорциональные величины: $K_{БВ} = \frac{1}{K_{СВ}}$. Но обратим внимание на график **рис.2**, когда модуль коэффициента отражения $|r|$ увеличивается КСВ стремится к бесконечности, а КБВ к нулю. Прибор, который индицирует бесконечность нонсенс, а вот приборы, которые индицируют 1 (максимум шкалы) и 0 (“нуль” шкалы) имеются в большом количестве всегда “под рукой”. Более того, дело даже не в измерительном приборе. Любые электронные устройства, ОУ, перемножители сигналов и т. д., не способны на своем выходе развивать сколь угодно большие значения напряжения. Ограничение выходного сигнала начинается на уровне напряжения питания и даже ранее. И здесь напрашивается вывод, что на основе вычислительного устройства в принципе не возможно реализовать измеритель КСВ. На практике так и поступают, фактически используется измеритель КБВ, но при необходимости шкалу измерительного прибора можно отградуировать в значения КСВ.

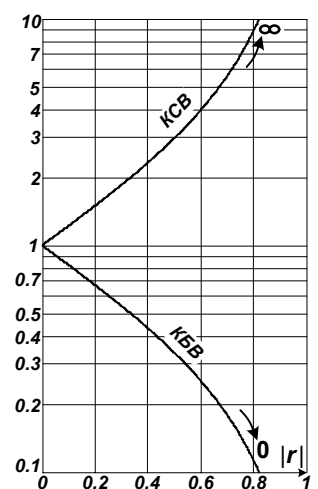


Рис.2

Здесь надо дать уточнение, что такое коэффициент отражение — **r**? (В отечественной литературе коэффициент отражения принято обозначать как заглавная греческая буква Γ).

Для падающих и отраженных волн примем следующие обозначения:

U_f — падающая волна (прямая волна – forward wave),

U_r — отраженная волна (обратная волна – reverse wave).

Коэффициент отражения есть комплексная величина, и вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{r} = \frac{\bar{Z}_x - R_o}{\bar{Z}_x + R_o} = \frac{\bar{Z}_x - \rho_o}{\bar{Z}_x + \rho_o} = \frac{\bar{U}_r}{\bar{U}_f} \quad (1).$$

Где: \bar{Z}_x — комплексная величина, какой либо цепи (например, антенны) с которой необходимо произвести согласование радиочастотного тракта;

R_o или ρ_o — опорное сопротивление относительного, которого производится согласование, всегда является действительной величиной и имеет определенную величину (т. е. не изменяется – constants) для конкретного тракта, например: 50 Ом или 75 Ом.

Напряжения \bar{U}_f и \bar{U}_r тоже комплексные, так как могут иметь разные фазовые соотношения.

Комплексный вектор \bar{r} отображается в R-плоскости (R-плоскость — плоскость коэффициента отражения) **рис.3** [2]. R-плоскость для пассивных цепей представляет окружность с радиусом равный единице. R-плоскость имеет несколько особых точек:

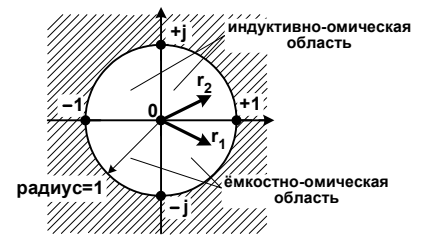


Рис.3

– точка согласования “0”: \bar{Z}_x действительное число и равно

$$R_o \quad (\bar{Z}_x = R_o = 50) \text{ получаем } \bar{r} = \frac{50 - 50}{50 + 50} = 0, \text{ согласно уравнению (1)}$$

отраженная волна отсутствует и равна нулю ($\bar{U}_r = 0$);

– точка короткого замыкания “-1”: при $\bar{Z}_x = 0$ получаем $\bar{r} = \frac{0 - 50}{0 + 50} = -1$, падающая и отраженная

волны равны по величине, но противоположны по фазе ($\bar{U}_f = -\bar{U}_r$);

– точка холостого хода “+1”: при $\bar{Z}_x = \infty$ получаем $\bar{r} = \frac{\infty - 50}{\infty + 50} = \frac{\infty}{\infty} = 1$, падающая и отраженная

волны равны по величине и синфазные ($\bar{U}_f = \bar{U}_r$);

– точка “+j”: $\bar{Z}_x = +j \cdot 50$ (идеальная индуктивность без потерь $L = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot f}$) получаем

$$\bar{r} = \frac{+j \cdot 50 - 50}{+j \cdot 50 + 50} = +j, \text{ падающая и отраженная волны равны, но отраженная волна опережает падающую волну на } 90^\circ;$$

– точка “-j”: $\bar{Z}_x = -j \cdot 50$ (идеальная емкость без потерь $C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 50}$) получаем

$$\bar{r} = \frac{-j \cdot 50 - 50}{-j \cdot 50 + 50} = -j, \text{ падающая и отраженная волны равны, но отраженная волна отстает от падающей волны на } 90^\circ.$$

В качестве примера, допустим $\bar{Z}_x = 100 - j \cdot 150$ и $R_o = 50$ тогда

$$\bar{r}_1 = \frac{(100 - j \cdot 150) - 50}{(100 - j \cdot 150) + 50} = 0,6666 - j \cdot 0,3333 \text{ (вектор } r_1 \text{ — рис.3).}$$

КСВ с коэффициентом отражения имеет следующую связь:

$$КСВ = s = \frac{1 + |\bar{r}|}{1 - |\bar{r}|} = \frac{1 + r}{1 - r} = \frac{U_f + U_r}{U_f - U_r} \quad (2)$$

Коэффициент отражение в выражение КСВ входит уже как модуль: $|\bar{r}| = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\bar{r} = a \pm j \cdot b$.

Напряжения U_f и U_r тоже стали действительными величинами, это говорит о том, что их величина

после детекторов (датчиков) направленного ответителя прямо пропорциональна их амплитудному или среднеквадратичному значению (зависит от вида детекторов) с точностью до коэффициента передачи детекторов направленного ответителя.

Продолжая пример, вычислим КСВ: $r_1 = |\bar{r}_1| = 0,745356$, $KCB = \frac{1+0,745356}{1-0,745356} = 6,8541$.

Из-за того, что в выражении КСВ (2) коэффициент отражения входит как модуль, КСВ-измеритель теряет информацию о фазе рассогласования, или КСВ-измеритель не “знает” какой характер индуктивный или емкостный привел радиотракт к рассогласованию. В этом легко убедиться, приняв $\bar{Z}_x = 100 + j \cdot 150$, получаем: $\bar{r}_2 = 0,6666 + j \cdot 0,3333$ (вектор r_2 — рис.3), $r_2 = |\bar{r}_2| = 0,745356$ соответственно значение КСВ останется прежним, хотя емкостный характер ($-j \cdot 150$) поменялся на индуктивный характер ($+j \cdot 150$). Для обеспечения полной информации о рассогласовании как по модулю (КСВ или КБВ) так и по характеру реактивности в согласующее устройство устанавливают датчик фазы. Датчик фазы совместно с измерителем КСВ (или КБВ) дают полную информацию об импедансе нагрузки, с которой необходимо произвести согласование.

Теперь перейдем к рассмотрению схемы измерителя КБВ. На рис.4 а приведена схема измерителя КБВ. Как видно из схемы на ОУ D1.1 выполнен инвертирующий сумматор напряжений падающей и отраженной волны (точнее их продетектированных значений), на ОУ D1.2 выполнен неинвертирующий вычитатель падающей и отраженной волны. ОУ на D1.3 устраняет инверсию созданную предыдущим ОУ (D1.1). Далее сумма напряжений $U_f + U_r$ и их разность $U_f - U_r$ поступает на делитель сигналов выполненного на микросхеме D2. На выходе микросхемы D2 получаем вычисленное значение КБВ. Падающая волна U_f характеризует выходную мощность передающего тракта. При полном согласовании, когда отраженная волна равна нулю, измеритель КБВ автоматически и независимо от уровня падающей волны имеет уровень напряжения в точке “а” (рис.4 а) 10 В, а стрелка измерительного прибора находится в максимальной точке своей шкалы, это наглядно показывает следующий, пример: $U_f = 4$, $10 \cdot \frac{4-0}{4+0} = 10$; $U_f = 5,5$, $10 \cdot \frac{5,5-0}{5,5+0} = 10$. То есть данный измеритель КБВ

не чувствителен к отклонению выходной мощности, например из-за неравномерности АЧХ усилителя мощности в рабочем диапазоне частот. Подстроечный резистор R11 (рис.4 а) необходим для коррекции положения стрелки прибора в максимальной точке шкалы, эту операцию проводят один раз на начальном этапе регулировки измерителя.

Термин КСВ в радиолюбительской практике более распространен, чем КБВ, но это не должно служить поводом для огорчения, не составит большого труда шкалу измерительного прибора сразу отградуировать в значениях КСВ — рис.4 б.

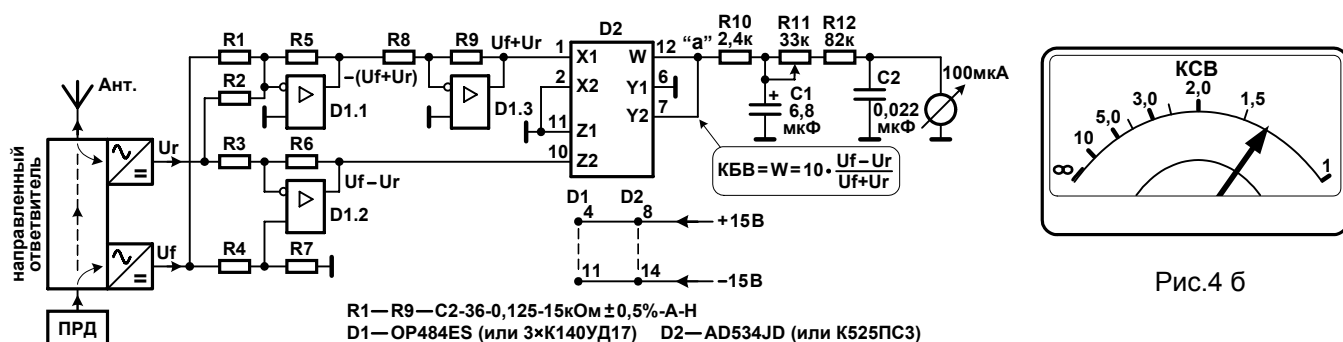


Рис.4 а

Резисторы R1 — R9 необходимо использовать прецизионного типа (C2-29В, C2-36 и т. д.) номиналы их могут находиться от 10 кОм до 30 кОм единственное требование все резисторы R1 — R9 должны иметь одинаковое значение. Остальные резисторы (R10, R12) обычного типа (ОМЛТ, C2-23, C2-33 и т. д.), R11 — СП3-19а. В качестве микросхемы D1 так же необходимо использовать прецизионные четырехканальные ОУ: ОР484, ОР4177, ОР497 или три одноканальных К140УД17. Для

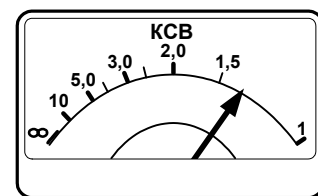


Рис.4 б

обеспечения демпфирования подвесной системы магнитоэлектрической рамки измерительного прибора время заряда-разряда цепи R10-C1 выбрана не менее 40 мс.

Схемотехнику и конструкцию направленного ответвителя и его датчиков (детекторов) рассматривать нет необходимости, так как имеется множество публикаций на эту тему. Но, тем не менее, необходимо подчеркнуть некоторые особенности. Первое. Направленный ответвитель должен тщательно сбалансирован, при полном согласовании ($\bar{Z}_x = R = 50, KCB = KBB = 1$) напряжение датчика отраженной волны должно быть равно нулю во всем диапазоне частот 1,5 — 30 МГц. При калибровке и балансировки направленного ответвителя необходимо использовать специальные 50 Омные (или 75 Омные) эквиваленты с подавленной реактивностью. Второе. При небольшом рассогласовании, амплитуда отраженной волны мала. У обычных кремневых диодов порог открывания 0,55 — 0,6 В, соответственно обычные диоды плохо детектируют сигналы с малой амплитудой. Из-за этого при малых амплитудах отраженной волны образуется зона нечувствительности. Полностью избавиться от зоны нечувствительности не возможно, но ее можно уменьшить, используя специальные детекторные диоды Шотки, например 2Д419А (КД419А) у которых порог открывания 0,15 — 0,2 В, можно использовать германиевые диоды ГД507А, ГД508А (порог открывания 0,2 — 0,3 В).

Микросхема AD534 относится к классу прецизионных аналоговых перемножителей, абсолютная погрешность не более $\pm 0,25\%$. Имеется микросхема по проще более низкого класса точности AD633 [1], абсолютная погрешность не более $\pm 2,0\%$. Микросхема AD633 выпускается в малогабаритном 8-выводном корпусе (SOIC-8) под поверхностный монтаж. Функциональная схема микросхемы AD633 приведена на **рис.5 а**. Из функциональной схемы видно, что в AD633 отсутствует выходной усилитель с коэффициентом K , а установлен повторитель с единичным усилением.

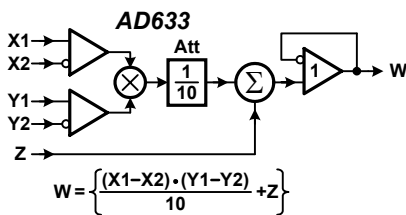


Рис.5 а

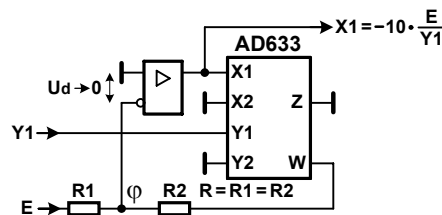


Рис.5 б

Реализация аналогового делителя на AD633 требует применение внешнего операционного усилителя. Передаточная функция AD633 имеет вид: $W = \left\{ \frac{(X1 - X2) \cdot (Y1 - Y2)}{10} + Z \right\}$.

Приравняв $X2=0$, $Y2=0$ и $Z=0$ получаем: $W = \frac{X1 \cdot Y1}{10}$ (3).

Согласно закону Кирхгофа, потенциал на инверсном входе ОУ в точке ϕ (**рис.5 б**) определяется следующим выражением: $\phi = \frac{E}{R1} + \frac{W}{R2}$. При наличии отрицательной обратной связи с выхода ОУ на его инвертирующий вход и “заземленным” неинвертирующим входе дифференциальное напряжение U_d стремится к нулю, это явление получило наименование “виртуального нуля” [3], в таком случае потенциал в точке ϕ тоже стремится к нулю, следовательно: $0 = \frac{E}{R1} + \frac{W}{R2}$, или $\frac{E}{R1} = -\frac{W}{R2}$, при равенстве резисторов $R = R1 = R2$: $E = -W$, используя уравнение (3), получаем: $E = -\frac{X1 \cdot Y1}{10}$ (4).

Выразим $X1$ из (4): $X1 = -10 \cdot \frac{E}{Y1}$ — **рис.5 б**.

Если на вход E подать $U_f - U_r$, а на вход $Y1$ подать $-(U_f + U_r)$ то знаки “минусы” взаимно сократятся: $X1 = -10 \cdot \frac{U_f - U_r}{-(U_f + U_r)} = 10 \cdot \frac{U_f - U_r}{U_f + U_r}$. Схема измерителя КБВ на микросхеме AD633 приведена на **рис.6**.

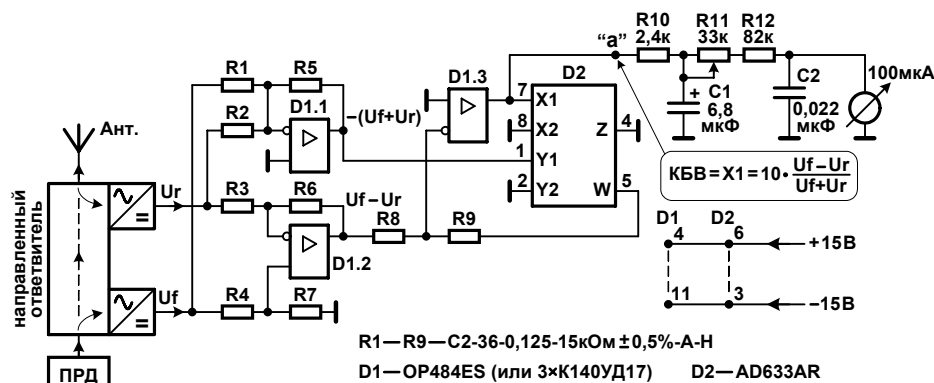


Рис.6

Если необходимо, как в импортных трансиверах, что бы в начале шкалы измерительного прибора было значение $KCB = 1$, а в конце шкалы $KCB \rightarrow \infty$ (рис.7 а), то можно использовать схему — рис.7 б.

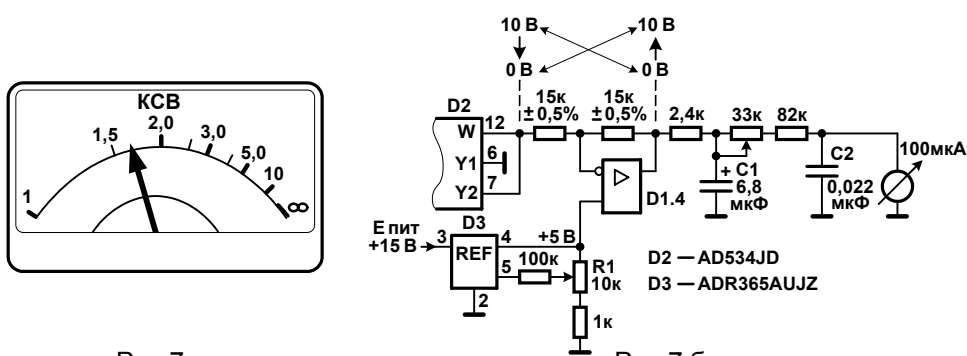


Рис.7 а

Рис.7 б

Операционный усилитель D1.4 обеспечивает инверсию сигнала, если на входе ОУ напряжение с +10В уменьшается до 0В, то на выходе ОУ увеличивается с 0В до +10В (рис.7 б). Напряжение смещения (+5В) на неинвертирующем входе ОУ обеспечивает ИОН (источник опорного напряжения ADR365AUJZ) с параметрами: температурный коэффициент напряжения не более $25 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ и с начальной погрешностью $\pm 8\text{мВ}$. Резистор R1 (рис.7 б) необходим для точной коррекции “нуля” на выходе ОУ при входном напряжении +10В. Для обеспечения смещения (+5В) можно использовать и резистивный делитель, но при этом следует ожидать уход напряжения смещения от изменения напряжения питания (т. к. у обычных стабилизаторов питания имеется погрешность выходного напряжения) и температурный уход “нуля” из-за ТКС резисторов.

После балансировки измерителя на согласованную нагрузку 50 Ом (или 75 Ом) приступают к его калибровке. Калибровку измерителя проводят обычным способом, например: для обеспечения $KCB = 2$ ($KBB = 0,5$) для 50 Омного тракта подключают резистор 25 Ом (или 100 Ом) с подавленной реактивностью при этом на шкале прибора отмечают точку, которая соответствует значению $KCB = 2$ и так далее.

Литература

1. <http://www.analog.com/ad534>, <http://www.analog.com/ad633>
2. Meinke H., Gundlach F. W. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik 1951 у.
3. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС. /Пер. с англ. — М.: Мир, 1985г.