

# УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ С КОМПАРИРОВАНИЕМ

*В. И. Осокин*

Рязань

В настоящее время известно множество измерителей СВЧ мощности с использованием автобалансных термисторных мостов (АБМ) постоянного или переменного тока. Измерение мощности в них производится методом сравнения на термисторе измеряемой величины с мощностью постоянного тока и основано на эквивалентности воздействия СВЧ на термистор сигналов СВЧ и постоянного тока.

Как правило, автобалансные мосты используются в сочетании с дополнительными компенсационными мостами, которые помимо температурной компенсации обеспечивают выделение из выходного сигнала АБМ лишь его изменения под действием преобразуемой мощности. Объясняется это тем, что при измерении малых уровней мощности изменение напряжения на выходе АБМ по отношению к его абсолютному значению составляет незначительную величину и зафиксировать ее с большой точностью обычным вольтметром очень сложно.

Однако использование дополнительного компенсационного моста в процессе измерения требует периодической балансировки последнего, и измеритель в этом случае имеет малое быстродействие. Это обусловлено большой тепловой постоянной времени термистора, стоящего в одном из плеч компенсационного моста. Поэтому построение автоматического быстродействующего измерителя на базе АБМ в сочетании с компенсационным мостом весьма затруднительно.

Ранее были разработаны автоматические быстродействующие измерители СВЧ мощности, построенные по принципу компарирования на основе АБМ\*. Реализация данных устройств стала возможна благодаря автоматической балансировке термисторного АБМ и его малой эквивалентной постоянной времени.

В данной работе рассматривается автоматический измеритель СВЧ мощности, также построенный по принципу компарирования с использованием АБМ переменного тока. Однако в отличие от устройств\* он имеет более высокую чувствительность, которая не зависит от температуры среды, окружающей термистор, и, как следствие, более широкий рабочий температурный диапазон. Повышение чувствительности измерителя

\* Н. Д. Дубовой. Автоматический прибор для измерения мощности в диапазоне СВЧ. «Обмен опытом в радиопромышленности», 1970, вып. 1.

осуществляется за счет повышения чувствительности АБМ. Действительно, если, например, при отсутствии измеряемой мощности  $P_{\text{СВЧ}}$  на выходе АБМ установится напряжение  $U_{0.c}$ , то после подведения к термистору  $P_{\text{СВЧ}}$  величина напряжения уменьшится до значения  $U_{0.c_1}$ . Изменение напряжения может быть определено выражением

$$\Delta U = U_{0.c} - U_{0.c_1} = 2\sqrt{R_T} (\sqrt{P_{0.c}} - \sqrt{P_{\text{СВЧ}}}), \quad (1)$$

где  $P_{0.c}$  — мощность, рассеиваемая на термисторе за счет напряжения с выхода АБМ;

$R_T$  — сопротивление термистора в рабочей точке, выбранное из условия согласования высокочастотного тракта по характеристике  $R_T = f(P)$ .

Величина  $P_{0.c}$  определится из соотношения

$$P_{0.c} = \frac{U_{0.c}^2}{4R_T}. \quad (2)$$

Относительное изменение выходного напряжения АБМ найдется как

$$\frac{\Delta U}{U_{0.c}} = \frac{\sqrt{P_{0.c}} - \sqrt{P_{0.c} - P_{\text{СВЧ}}}}{\sqrt{P_{0.c}}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{P_{\text{СВЧ}}}{P_{0.c}}}. \quad (3)$$

Учитывая неравенство  $P_{\text{СВЧ}} \ll P_{0.c}$ , можно записать

$$\frac{\Delta U}{U_{0.c}} \approx 0,5 \frac{P_{\text{СВЧ}}}{P_{0.c}}. \quad (4)$$

Из анализа этого выражения можно сделать вывод, что увеличение относительного изменения выходного напряжения АБМ возможно путем уменьшения величины  $P_{0.c}$ . В соответствии с уменьшением  $P_{0.c}$  в определенное число раз примерно во столько же раз увеличится и отношение  $\frac{\Delta U}{U_{0.c}}$  при действии на термистор одного и того же уровня  $P_{\text{СВЧ}}$ . Таким образом, возможно повышение чувствительности измерителей с использованием АБМ.

Практическая реализация этого вывода известна и заключается в дополнительном нагреве термистора какими-либо посторонним источником энергии. Обычно для этой цели используют вспомогательные регулируемые источники постоянного тока, с помощью которых устанавливается начальный уровень выходного напряжения АБМ. Однако такой способ исключает возможность калибровки измерителя постоянным током, а следовательно, и построение его по принципу компарирования. Объясняется это следующим. Мощность постоянного тока от



ра; выпрямитель с фильтром В; вычитающий каскад ВУ, собранный по дифференциальной схеме с общим выходом; аналоговый компаратор К; источник опорного напряжения ИОН; генератор пилообразного напряжения ГПН, используемый как источник замещающего напряжения; отсчетно-регистрирующее устройство ОРУ; интегратор И. Кроме этого, в состав измерителя входит выключатель измеряемой СВЧ мощности ВМ, реле Р1 и Р2 для осуществления необходимой коммутации в процессе измерения. Частота, на которую настроен избирательный усилитель ИУ, и частота работы генератора УГ выбраны резко различными. Таким образом, исключается прохождение напряжения с УГ через АБМ. С целью лучшей развязки в схеме применены также два LC фильтра  $L_1C_1$  и  $L_2C_2$ .

В основе работы всего измерителя лежит использование замкнутого контура, содержащего узлы АБМ, В, ВУ, И, УГ, ИОН и представляющего собой систему автоматического регулирования с астатизмом первого порядка. Рассмотрим принцип работы этого контура. Выходное напряжение АБМ после прохождения через выпрямитель В сравнивается с опорным напряжением  $U_0$  на вычитающем устройстве, образуемая разность  $\Delta U$  подается на вход интегратора. Изменяющееся выходное напряжение интегратора воздействует на УГ, меняя величину его выходного сигнала и тем самым меняя дополнительную мощность разогрева термистора, который поступает на него с УГ. Это приводит к изменению выходного сигнала АБМ, а следовательно, и выходного напряжения  $U_B$  выпрямителя В.

Этот процесс происходит до тех пор, пока напряжение  $U_B$  не станет равным выбранному значению опорного напряжения  $U_0$ . При этом величина  $\Delta U$  приближается к нулю и определяется рабочей точкой интегратора и значением его приведенного дрейфа. Конденсатор С3, подключенный ко входу интегратора и к одному из входов (Вх2) компаратора, заряжен до значения напряжения  $\Delta U$ . При подаче измеряемой мощности  $P_{свч}$  напряжение колебаний на выходе АБМ уменьшается, напряжение  $\Delta U$  возрастает и в результате этого выходное напряжение генератора УГ изменяется до тех пор, пока величина  $\Delta U$  вновь не будет равна прежнему значению.

По команде «измерение» замыкается тумблер П1 и напряжение Е подается на реле Р1, которое срабатывает, и контакты Р12 снимают напряжение с выключателя мощности ВМ, прекращая подачу  $P_{свч}$  на термистор. Одновременно с помощью контактов Р11 размыкается система регулирования, и напряжение  $\Delta U$ , величина которого резко изменилась в результате снятия СВЧ мощности, подается на Вх1 компаратора. Поскольку напряжение на Вх1 компаратора больше напряже-

ния, поступающего на Вх2 компаратора с конденсатором «памяти» СЗ, компаратор не срабатывает.

Одновременно с отключением СВЧ мощности контактами Р<sub>12</sub> происходит запуск генератора пилообразного напряжения. При этом под действием возрастающего пилообразного напряжения, поступающего с ГПН на термистор через резистор R<sub>4</sub>, напряжение ΔU на Вх1 компаратора начинает уменьшаться. Когда величина его уменьшится до значения, которое было на выходе ВУ (и до которого заряжен конденсатор СЗ) при поданной на термистор измеряемой мощности, компаратор срабатывает и переключает реле Р2. В результате прекращается изменение напряжения на выходе ГПН и подается команда на ОРУ, фиксирующее уровень выходного напряжения U<sub>вых</sub> ГПН, величина которого связана с измеряемой мощностью соотношением

$$P_{\text{СВЧ}} = \left( \frac{U_{\text{вых}}}{R_4 + R_T} \right)^2 R_T. \quad (6)$$

Таким образом, показания ОРУ являются мерой измеряемой мощности. Как видно из описания работы устройства, независимо от вариации температуры окружающей среды, воздействующей на термистор, и уровня измеряемой мощности на выходе АБМ с помощью системы регулирования устанавливается исходный уровень сигнала, определяемый величиной опорного напряжения U<sub>0</sub>. Следовательно, чувствительность АБМ при любых условиях постоянна и определяется величиной напряжения U<sub>0</sub>.

Действительно, с учетом коэффициента передачи k<sub>1</sub> выпрямителя можно записать для установившегося состояния замкнутой системы равенство

$$K_1 U_{0.c} = U_0. \quad (7)$$

С учетом выражений (2), (4), (7) получаем

$$\frac{\Delta U}{U_{0.c}} \cong 0,5 \frac{P_{\text{СВЧ}} 4R_T k_1}{U_0^2} \cong k_2 \frac{P_{\text{СВЧ}}}{U_0^2}. \quad (8)$$

Это выражение показывает, что выбором соответствующей величины опорного напряжения U<sub>0</sub> можно получить требуемую чувствительность АБМ, увеличив ее во много раз. Предельно допустимая чувствительность определяется максимальным уровнем измеряемой СВЧ мощности P<sub>СВЧmax</sub>, поскольку должно соблюдаться равенство

$$P_{\text{СВЧ max}} + P'_{0.c} = P_{0.c}, \quad (9)$$

где P'\_{0.c} — мощность, рассеиваемая на термисторе за счет напряжения с выхода АБМ и обеспечивающая устойчивую генерацию в автобалансной схеме.

Следовательно, чем меньше максимальный уровень измеряемой СВЧ мощности, тем большую предельную чувствительность АБМ можно обеспечить.

Построенный по рассмотренной блок-схеме измеритель обеспечивает высокие метрологические характеристики без термостатирования термисторной головки при работе в весьма широком диапазоне температуры окружающей среды ( $-50^{\circ}\text{C}$  —  $+60^{\circ}\text{C}$ ).