

УДК 621.317

О ВЫБОРЕ МОДУЛИРУЮЩИХ ЧАСТОТ В ИЗМЕРИТЕЛЯХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Трушкин А.Н.

Приводится методика определения модулирующих частот и оценивается погрешность измерения информационной составляющей спектра продетектированного СВЧ сигнала, обусловленная неидеальностью избирательной системы.

Модуляционный метод измерения комплексных параметров СВЧ двухполусников основан на формировании и обработке составляющих спектра с частотами [1,2]

$$\Omega_3 = \Omega_1 + \Omega_2, \quad (1)$$

$$\Omega_4 = \Omega_2 + \Omega_1, \quad (2)$$

где Ω_1 , Ω_2 – модулирующие частоты опорного и измерительного каналов соответственно; Ω_3 , Ω_4 – частоты измерительного сигнала на выходе фильтра.

На рисунке 1 изображена структурная схема измерителя параметров двухполусников.

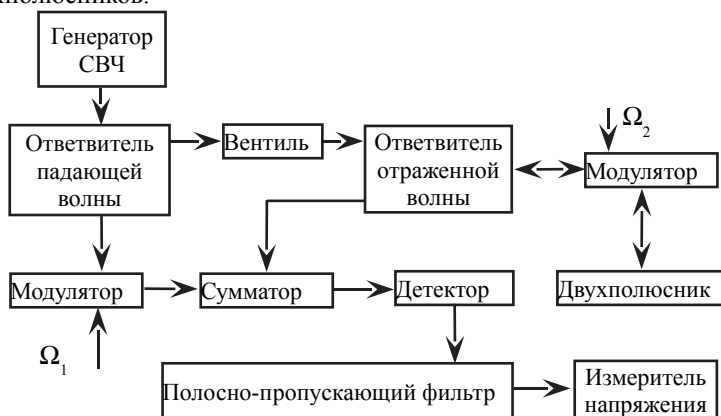


Рисунок 1 – Структурная схема измерителя параметров двухполусников

Генератор СВЧ вырабатывает сверхвысокочастотные колебания. В опорном канале сигнал падающей волны подвергается амплитудной модуляции с частотой Ω_1 . В измерительном канале сигнал, отраженной от исследуемого двухполусника волны, модулируется с частотой Ω_2 . Суммарный СВЧ сигнал детектируется. Подключенный к выходу детектора фильтр выделяет информационную составляющую спектра с частотой (1), либо сигнал с частотой (2).

Выражение, описывающее коэффициент передачи полосно-пропускающего фильтра для напряжения гармонической составляющей спектра, можно в соответствии с [3] представить в виде

$$K_i = 1 / \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{n \cdot \Omega_1}{\Omega_3} - \frac{\Omega_3}{n \cdot \Omega_1} \right)^2},$$

где K_i – АЧХ коэффициента передачи фильтра для напряжения гармонической составляющей; Q – добротность фильтра; n – номер гармонической составляющей.

Введем обозначение $\beta = \Omega_1 / \Omega_2$. При этом

$$\Omega_1 = \beta \times \Omega_2, \quad \Omega_3 = \Omega_2 \times (1 + \beta). \quad (3)$$

Значения β , при которых гармоники частот Ω_1 , Ω_2 проходят через фильтр с минимальным ослаблением, можно определить из соотношений

$$\Omega_1 + \Omega_2 = n \cdot \Omega_1,$$

$$\Omega_1 + \Omega_2 = n \cdot \Omega_2.$$

При этом получаем

$$\beta_1 = 1 / (n - 1), \quad (4)$$

$$\beta_2 = (n - 1). \quad (5)$$

Погрешность измерения напряжения с частотой Ω_3 на выходе фильтра в зависимости от β можно оценить с точностью до пятых гармоник в соответствии с [4]

$$\delta = \sqrt{K_1^2 + \dots + K_5^2}, \quad (6)$$

где K_i – нормированные коэффициенты передачи для напряжений гармоник.

Зависимость погрешности измерения напряжения с частотой Ω_3 от β , рассчитанная по выражению (6), показана на рисунке 2.

Анализ выражений (4)-(6) и графика, показанного на рисунке 2, показывает, что при $\beta_1 = 1$ через фильтр с минимальным ослаблением проходят вторые гармоники модулирующих сигналов. Сигнал с частотой $3\Omega_1$ попадает в полосу пропускания фильтра при $\beta_1 = 0,5$. Сигнал с частотой $3\Omega_2$ также проходит через фильтр с минимальным ослаблением при

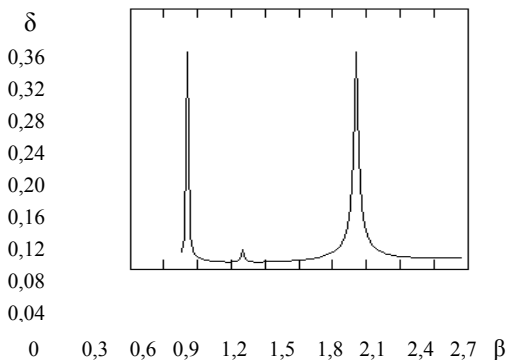


Рисунок 2 – Зависимость погрешности измерения напряжения с частотой Ω_3 на выходе фильтра

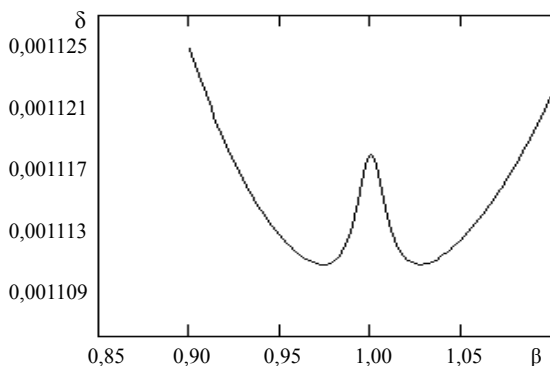


Рисунок 3 – Зависимость погрешности измерения напряжения с частотой Ω_3 на выходе фильтра в области

$\beta_2 = 2,0$. Аналогично проводится анализ для других составляющих спектра.

Зависимость погрешности измерения напряжения с частотой Ω_3 в области минимума показана на рисунке 3.

Анализ полученного результата показывает, что при настройке полосно-пропускающего фильтра с эквивалентной

добротностью 100 на частоту Ω_3 погрешность измерения порядка одного процента. При $\beta = 1$ вторые гармоники модулирующих сигналов, как следует из выражений (4), (5), проходят через фильтр с минимальным ослаблением, как это видно из рисунка, поэтому их подавление должно осуществляться путем модуляции СВЧ сигнала меандром. При этом скважность модулирующего напряжения должна равняться 2 с погрешностью не более 0,1% (принятое при расчете подавление в 0,1%, полученное экспериментально, достигнуто путем тщательной регулировки скважности модулирующего напряжения).

Выделение сигнала с частотой Ω_4 осуществляется аналогично в соответствии с выражением

$$K_i = 1 / \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{n \cdot \Omega_1}{\Omega_4} - \frac{\Omega_4}{n \cdot \Omega_1} \right)^2}.$$

Значения β , при которых гармоники частот Ω_1 , Ω_2 проходят через фильтр с минимальным ослаблением, можно определить из соотношений

$$\Omega_2 - \Omega_1 = n \cdot \Omega_1,$$

$$\Omega_1 - \Omega_2 = n \cdot \Omega_2.$$

При этом получим

$$\beta_1 = 1/(n+1), \quad (7)$$

$$\beta_2 = (n+1). \quad (8)$$

Погрешность измерения напряжения с частотой Ω_4 на выходе фильтра, рассчитанная по выражению (6), изображена на рисунке 4.

Анализ кривой показывает, что основной вклад в погрешность измерения разностной частоты вносят первые гармоники модулирующих напряжений с частотами Ω_1 , Ω_2 . Как следует из (7), (8) при $\beta = 0,5$ в полосу про-

пускания фильтра попадает первая гармоника частоты Ω_1 , а при $\beta=2$ первая гармоника частоты Ω_2 . Форма модулирующего напряжения в рассматриваемом случае может отличаться от меандра, так как вторые гармоники не оказывают существенного влияния на погрешность измерения.

На рисунке 5 показана зависимость погрешности измерения напряжения с частотой Ω_4 в области минимума.

Анализ графика показывает, что погрешность измерения в диапазоне $\beta=0,8 \dots 1,25$ при добротности фильтра 35 не превышает одного процента. При $\beta_1=1$ модуль коэффициента передачи фильтра, настроенного на частоту Ω_4 , для любой из гармоник спектра продетектированного измерительного сигнала равен нулю. Очевидно, что условие $\beta_1=1$ практически не реализуемо. Поэтому разностную частоту следует выбирать из противоречивых условий. С одной стороны, частота Ω_4 должна быть как можно ближе к нулю, с другой, - она должна отстоять как можно дальше от первой гармоники сети 50 Гц, так как уровень продетектированного СВЧ сигнала может быть соизмерим с напряжением сети 50 Гц. Очевидно, что частота измерительного сигнала не должна быть кратна гармонике сети переменного тока. С учетом сказанного можно записать

$$\Omega_4 = \frac{m \cdot f_c + (m+1) \cdot f_c}{2},$$

где m – гармоника сети; f_c – частота сети переменного тока.

С другой стороны, как следует из (2), (3),

$$\Omega_4 = (1 - \beta_2) \cdot \Omega_2,$$

откуда следует

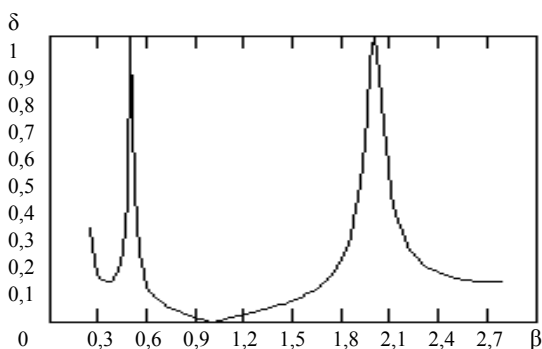


Рисунок 4 – Зависимость погрешности измерения напряжения на выходе фильтра с частотой Ω .

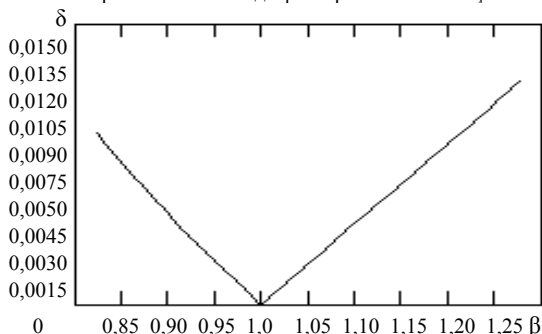


Рисунок 5 – Зависимость погрешности измерения напряжения частотой Ω_4 в области минимума

$$\Omega_2 = \frac{m \cdot f_c + (m+1) \cdot f_c}{2 \cdot (1 - \beta_2)}. \quad (9)$$

Можно предложить следующий порядок выбора модуляционных частот.

1 По кривой, приведенной на рисунке 5, задаемся допустимой погрешностью измерения напряжения с частотой Ω_4 , например $\delta_2 = 0,002$, что соответствует $\beta_i = 1,05$.

2 Для $m = 5$ из (9) получаем $\Omega_2 = 5,5$ кГц.

3 Из выражения (3) получаем $\Omega_1 = 5,775$ кГц.

Как показывает эксперимент, используемые в макете рpn-диодные модуляторы, на частотах модуляции, полученных при расчете, работают удовлетворительно. Их инерционность начинает заметно сказываться на форме протектированного СВЧ сигнала на частотах выше 10 кГц.

Сравнение двух способов выделения измерительной информации из спектра протектированного СВЧ сигнала показывает, что второй вариант, подразумевающий выделение разностной частоты, допускает использование фильтра с более низкой добротностью. Данное обстоятельство объясняется ослаблением влияния на погрешность измерения второй и более высоких гармоник. Действительно все составляющие спектра в этом случае находятся по правую сторону от частоты настройки фильтра. Следовательно, использование сигнала с разностной частотой при прочих равных условиях обеспечивает наименьшие динамические искажения измерительного сигнала.

Библиография

1 А.с. 1809395 СССР. МКИ G01R 27/00. Измеритель комплексных параметров СВЧ-четырёхполюсника / А.Н. Трушкин (СССР). — № 4890596/09; Заяв. 10.12.90; Оpubл. 15.04.93, Бюл. № 14. — 2 с.: ил.

2 А.с. 1160331 СССР. МКИ G01R 27/00. Измеритель комплексного коэффициента отражения / А.Н. Трушкин, Н.А. Грудина (СССР). — № 3668023/24-09; Заяв. 30.11.83; Оpubл. 07.06.85, Бюл. № 21. — 2 с.: ил.

3 Калашников А.М. Колебательные системы / А.М. Калашников, Я.В. Степук. — Л.: Энергия, 1972. — 376 с.

4 Рабинович С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. — Л.: Энергия, 1978. — 262 с.

Поступила в редакцию 14.11.2000 г.