

ПОГРЕШНОСТЬ ВАТТМЕТРОВ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ВНЕПОЛОСНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ СПЕКТРА

Преимущества датчиков проходящей мощности на основе поглощающей стенки при измерении больших и сверхбольших уровней проходящей мощности перед другими, основанными на эффекте Холла и направленных ответвителях, очевидны. Это объясняется их высокой электрической и тепловой прочностью, простотой, надежностью, точностью. Они в отличие от “конкурентов” способны работать в условиях сильных механических и электромагнитных помех, а также при наличии в сигнале внеполосных и паразитных составляющих. Однако до настоящего времени количественная оценка этого влияния производилась только для ваттметров проходящей мощности СВЧ, основанных на использовании направленных ответвителей, многоэлементных болометрических и двухэлементных пондеромоторных преобразователей [1]. В настоящей статье приводятся результаты расчета дополнительного нагрева тонких поглощающих стенок внеполосными составляющими спектра сигнала, обусловленными, с одной стороны, различными неоднородностями в тракте, с другой – типом конструкции и качеством СВЧ генератора.

Методика расчета основана на определении температуры тонкой (50 мкм) поглощающей стенки из константана под воздействием высших типов волн на частоте основного типа и на второй-пятой гармониках, распространяющихся на волнах H_{20} , H_{10} , H_{11} , H_{21} , H_{30} , E_{11} и E_{21} , и сравнении с температурой той же стенки под воздействием основного типа волн H_{10} отдельно на узкую и широкую стенки. При этом необходимо было решить тепловую задачу о стационарном температурном поле реальных датчиков с реальными начальными и граничными условиями. Уровень внеполосных составляющих был задан, исходя из предельных значений, допускаемых соответствующими стандартами для серийных магнетронов. В качестве примера рассмотрен спектр одного из серийных магнетронов.

В результате установлено, что наличие дополнительного нагрева внеполосными составляющими с уровнями порядка сотых долей процента по отношению к уровню волны основного типа приводит к дополнительной систематической погрешности в единицы процентов.

В полом металлическом волноводе помимо основного типа волны и частоты могут существовать и паразитные внеполосные временные и пространственные составляющие спектра, причин возникновения которых несколько.

Если в волноводе имеются неоднородности (диафрагмы, штыри, изгибы, сочленения двух или нескольких отрезков, изменение формы или размеров поперечного сечения), то в местах их нахождения возникают волны, тип которых определяется конфигурацией неоднородности. Частота колебаний при этом остается одной и той же. Поэтому распространение этих волн на более или менее значительное расстояние возможно только тогда, когда длина волны основного типа значительно меньше критической. В противном случае они быстро затухают.

Если на выходе генератора СВЧ колебаний имеются кроме основной еще и высшие временные гармоники (с удвоенной, утроенной и т. п. частотами), также возникают высшие типы волн с соответствующими частотами. Эти гармоники могут распространяться как волны различных типов, конфигурация которых тоже зависит от характера неоднородностей внутри волновода и от конфигурации элемента связи генератора с волноводом. Количество типов волн определяется значением основной частоты и размером сечения волновода. В качестве примера на рис. 1 приведен спектр колебаний одного из серийных магнетронов сантиметрового диапазона. Индексы типов волн m и n могут достигать значений 2 и 1 для второй гармоники, 4 и 2 – для третьей, 5 и 2 – для четвертой, 6 и 3 – для пятой гармоники. Общее количество высших типов волн для такого магнетрона достигает 51. Мощность, переносимая этими волнами, невелика. В приведенном примере она составляет около 0,003 % общей мощности, вырабатываемой генератором и распространяющейся в волноводе. Но все же в некоторых случаях и такая небольшая мощность высших типов волн при измерениях может играть существенную роль. Так, например, наличие

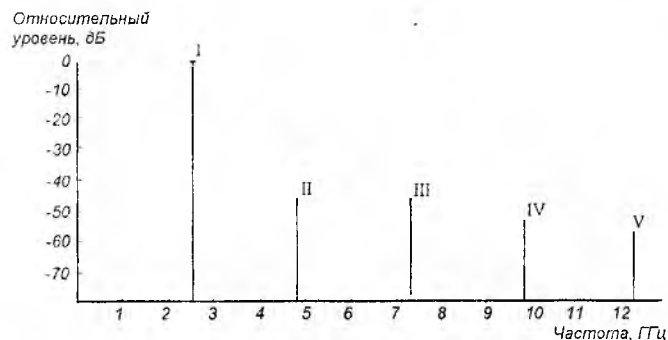


Рис. 1

существенную роль. Так, например, наличие

высших типов волн может служить причиной возникновения больших погрешностей при измерении мощности с использованием направленных ответвителей [1, 2]. Поэтому необходимо исследовать влияние внеполосных составляющих спектра сигнала на нагрев поглощающей стенки в волноводе и, следовательно на погрешность измерения проходящей мощности СВЧ на этом принципе.

Из качественного рассмотрения метода поглощающей стенки следует, что незначительные по уровню паразитные составляющие спектра сигнала не могут приводить к большим погрешностям как в случае, описанном во [2], однако количественной оценки до сих пор выполнено не было.

Рассмотрим случай, когда в прямоугольном согласованном трехсантиметровом волноводе сечением 23×10 мм распространяется волна типа H_{10} , а также присутствует несколько высших типов волн с той же частотой, что и основной тип. Рассмотрим нагрев датчика из константановой поглощающей стенки толщиной 50 мкм, расположенной по всей широкой, а затем узкой стенке волновода и длиной 100 мм, т. е. порядка двух длин волн в волноводе.

Методика нахождения погрешности заключается в определении дополнительного нагрева внеполосными составляющими по сравнению с нагревом волной основного типа на частоте первой гармоники. При этом из решения уравнения для температурного поля поглощающей стенки численным методом [3] находилось распределение температуры по ее поверхности в случаях, когда в волноводе существует только волна H_{10} и когда присутствует только один из высших типов волн (общая мощность остается той же). В узлах сетки, используемой при решении уравнения теплопроводности, определялся модуль относительной разности температур в этих случаях. Полученные значения усреднялись по всей поверхности поглощающей стенки, и затем определялся относительный вклад в погрешность измерений внеполосных составляющих.

На рис. 2 приведены кривые, показывающие, как влияет на распределение температуры по поверхности стенки наличие одного из высших типов волн. При расчетах принималось, что в основном типе волны сосредоточено 99,99 % энергии, в высшем типе – 0,01 %.

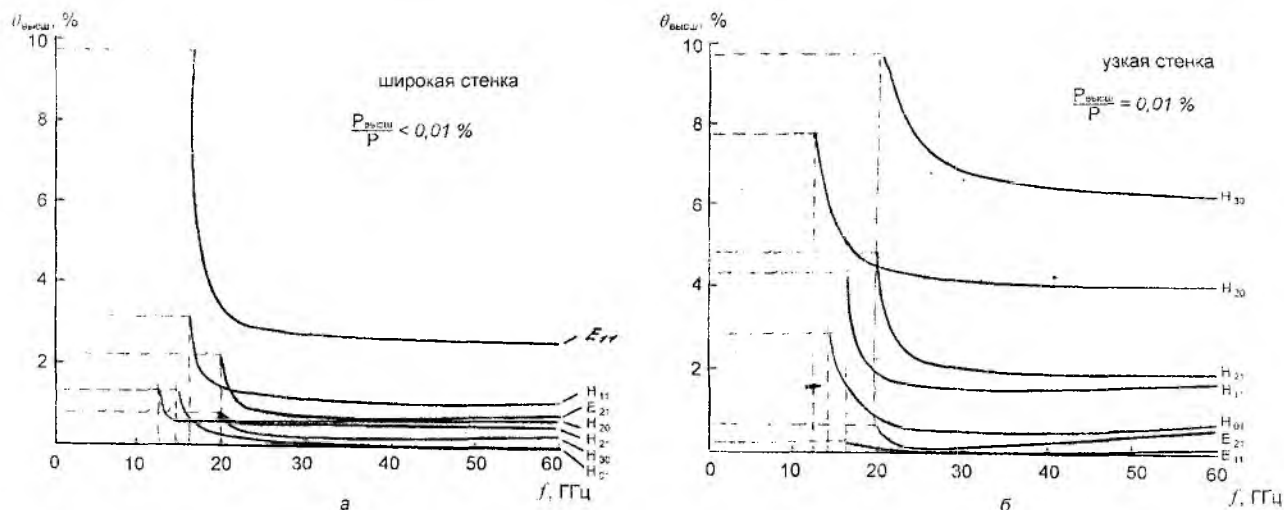


Рис. 2

На рис. 2 показано, что наличие некоторых типов волн может довольно сильно исказить результат измерений температуры стенки. Например, присутствие волны E_{11} с долей мощности 0,01 % общей мощности, распространяющейся в волноводе, приводит к погрешности измерения температуры широкой стенки в несколько процентов. Еще сильнее сказывается наличие волны H_{30} при установке датчика в узкую стенку.

Наибольшего значения погрешность достигает на частотах внеполосных паразитных составляющих, соответствующих их критическим или близким к ним значениям. С некоторыми приближениями можно считать, что энергия, переносимая ими, при этом почти полностью поглощается в датчике и может быть причиной роста погрешности измерений.

Из анализа полученных расчетных результатов можно сделать выводы:

1. Погрешность, вызванная наличием высших типов волн, слабо зависит от частоты. Кривые на рис. 2 идут почти горизонтально, за исключением участков вблизи критических частот. Однако, и там они даже в непосредственной близости от $f_{кр}$ растут слабо. Так, крайние значения $\theta_{высчи}$ (см.

рис. 2) рассчитаны для частот, отличающихся от критических всего на 0,2 %. Но и там погрешности имеют тот же порядок значений, что и в рабочей полосе частот.

2. Выяснить, какой из высших типов волн сильнее влияет на распределение температуры, из качественного анализа распределения полей в волноводе нельзя, так как для этого необходимы численные расчеты. Это связано с тем, что конфигурация полей в волноводе при наличии внеполосных составляющих очень сложная, так как в одних точках поля основного и высшего типов волн складываются, в других – вычитаются, а при произвольных или изменяющихся фазах коэффициента отражения на гармониках картину поля определить крайне сложно, поэтому результирующий эффект можно получить только путем количественного анализа. Из графиков видно только, что те типы волн, которые сильно влияют на температуру широкой стенки, на температуру узкой влияют слабо, и наоборот.

На рис. 3 показана зависимость погрешности $\theta_{\text{высш}}$ от процентного содержания высших типов волн. Кривые хорошо аппроксимируются функцией $f = K_{mn} \sqrt{P_{\text{высш}}/P}$, где K_{mn} – коэффициент, зависящий от типа волны; $P_{\text{высш}}$ – мощность, переносимая только высшими типами волн; P – общая мощность генератора.

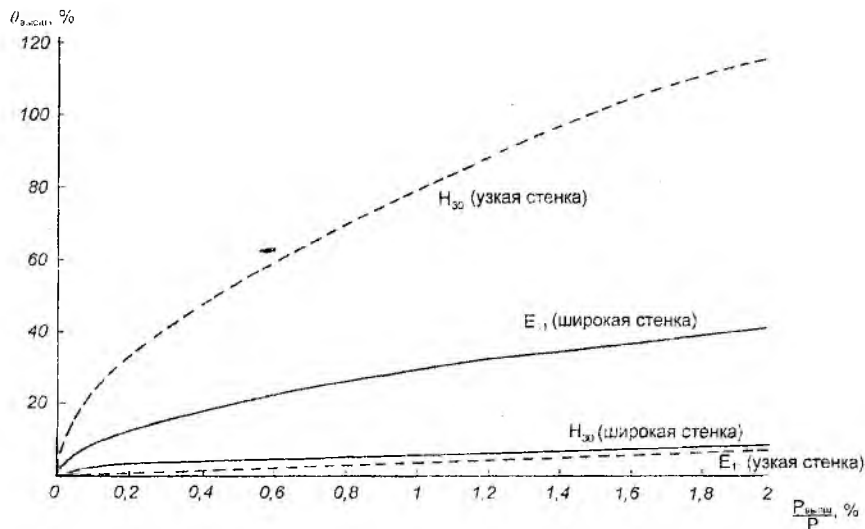


Рис. 3

Рис. 3 хорошо иллюстрирует ситуацию, когда при проектировании ваттметра датчик конструктивно надо устанавливать не в узкую, а в широкую стенку (волна H_{30}), и наоборот (волна E_{11}).

Если в волноводе присутствует сразу несколько высших типов волн, то их результирующее влияние не равно сумме влияний отдельных типов волн, а несколько слабее. Например, в случае, когда волна содержит 99,993 % энергии, а остальная энергия равномерно распределена между волнами H_{20} , H_{01} , H_{11} , H_{21} , H_{30} , E_{11} и E_{21} , для широкой стенки $\theta_{\text{высш}} = 1,2$ %. Значения же $\theta_{\text{высш}}$ для случаев, когда эти же типы волн существуют в отдельности, составляют 0,2; 0,03; 0,4; 0,2; 0,1; 0,9, 0,3 соответственно, что в сумме равно 2,1 %. Для узкой стенки эти же значения составляют 3,6 и 5 %. Это объясняется особенностями суммирования полей этих типов волн.

При наличии высших типов колебаний искажается картина распределения поля вдоль волновода, так как длина волны в волноводе для каждого типа волн имеет собственное значение, и в результате интерференции возникают дополнительные узлы и пучности поля. На рис. 4 показано распределение интенсивности поля $I(z)$ вдоль волновода для некоторых случаев присутствия внеполосных составляющих.

Рис. 4, а иллюстрирует ситуацию, когда в трехсантиметровом волноводе 99,93 % мощности переносится волной H_{10} , а остальные 0,07 % – волной H_{20} . Вследствие биений между этими двумя типами волн интенсивность поля вдоль волновода изменяется по синусоидальному закону.

На рис. 4, б приведена ситуация, когда мощность высших типов волн также составляет 0,07 % всей мощности, но существует два типа волн H_{20} и E_{11} , между которыми энергия распределена поровну, и характер биений в этом случае более сложен.

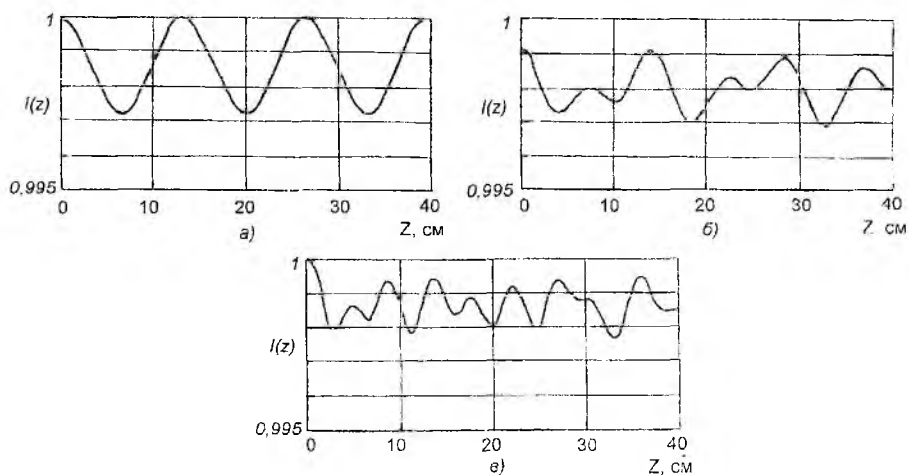


Рис. 4

И, наконец, на рис. 4, в изображен график биений между различными типами волн, когда кроме основной волны H_{10} в волноводе распространяются волны H_{20} , H_{30} , H_{01} , H_{11} , H_{21} , E_{11} и E_{21} . В каждой из них сосредоточено по 0,01 % общей мощности. Картина биений в этом случае очень сложная, и даже на участке длиной 40 см (длине волны в волноводе на основном типе) вдоль волновода нельзя заметить какой-либо периодичности.

Амплитуда биений во всех трех случаях мала, так как невелика мощность высших типов волн. Причем амплитуда больше в том случае, когда присутствует только один высший тип, чем в случае когда высших типов много. Но во всех случаях она настолько мала, что наличие биений при расчетах температуры можно не учитывать.

В случае, когда в волноводе наряду с колебаниями основной частоты присутствуют колебания высших гармоник (удвоенной, утроенной и т. п. частот), порядок погрешности, вносимой их наличием, такой же, как и в рассмотренном выше случае. Но значения погрешностей несколько меньше. Это связано с тем, что частоты колебаний здесь различны и соотношения фаз суммирующихся полей все время изменяется. Поэтому общий эффект примерно равен сумме влияний наличия каждого типа волн в отдельности. А так как мощность высших типов волн невелика, то и вклад их мал. Так, например, выше было показано, что когда волна E_{11} основной частоты содержит 0,01 % общей мощности, погрешность равна примерно 0,9 %. Если же колебания удвоенной частоты распространяются в виде волны этого типа, то погрешность составляет всего лишь 0,01 %. Это же относится и к степени искажения картины поля вдоль волновода.

Из анализа выполненных расчетов следует, что наличие в спектре высших временных гармоник значительно меньше оказывает влияние на погрешность датчика на поглощающей стенке, чем присутствие высших типов волн с той же частотой, что и основная волна.

В заключение можно сделать вывод о том, что ваттметры проходящей мощности СВЧ на основе поглощающей стенки обладают меньшей чувствительностью к наличию внеполосных составляющих спектра сигнала, чем все остальные типы ваттметров, и их можно рекомендовать к использованию в радиоэлектронных системах с большими и сверхбольшими уровнями мощности, где, как правило, эти составляющие встречаются.

Выполненные расчеты могут быть использованы также при оптимальном проектировании датчиков ваттметров проходящей мощности СВЧ.

Список литературы: 1. Мильников А.В., Перепелкин В.А., Шагин Ю.В. Чувствительность ваттметров СВЧ к паразитным гармоническим составляющим сигнала // Измерительная техника. 1980. № 2. С. 37–39. 2. Билык Е.Г., Лейкин В.Ю. Измерение переходного ослабления направленных ответвителей на волнах высших типов // Вопросы радиоэлектроники. 1970. Серия VI (РИТ). Вып. 2. С. 23–30. 3. Волков В.М. Методы расчета теплового режима тонкостенных СВЧ линий передачи // Радиофизика и электроника. 2000. № 1.

Харьковский государственный технический
Университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 8.06.2000