

УДК 53.084.6

СКАЛЯРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ ДЛЯ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Попов В.В.¹, Руденко В.В., Пономаренко В.И., Виногородский Д.Ф.

ВВЕДЕНИЕ

Скалярные анализаторы цепей служат для измерения модулей параметров рассеяния многополюсников. Наряду с векторными анализаторами цепей, позволяющими измерять одновременно модуль и фазу параметров рассеяния, они находят применение, как в научно-исследовательских, так и в инженерных приложениях [1, 2]. Современные анализаторы – это сложные компьютеризированные комплексы, включающие, как правило, широкий набор сервисных функций. В наиболее универсальных приборах может быть встроенный генератор СВЧ-колебаний. Такие приборы, обладая гибкостью в работе, весьма дорогостоящие и не всегда доступны исследователям. Отечественные анализаторы, например, Р2-54 не обеспечивают необходимую точность измерений, и, кроме того, неудобны для автоматизации [3, 4].

В работе, на примере рефлектометра, построенного для измерения параметров рассеяния двухполюсников в прямоугольном волноводе, предложена простая схема скалярного анализатора цепей. Устройство состоит из двух блоков: измерительного усилителя, предназначенного для усиления и детектирования сигналов с детекторных секций, и блока сопряжения с компьютером. Анализатор работает с генератором качающейся частоты ГЧ-61. Предложен метод калибровки анализатора с использованием поляризационного аттенюатора, который позволяет существенно расширить динамический диапазон измеряемых сигналов.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ АНАЛИЗАТОРА

Для измерения напряженности поля в волноводе применяется выпрямительные СВЧ-диоды. Детектирование основано на однополупериодном выпрямлении диодом СВЧ тока, который наводится на небольшой штыревой антенне, расположенной в волноводной линии, и замыкании переменной его составляющей на землю через шунтирующий конденсатор. Для этого диод включается одновременно в две цепи: в СВЧ-тракт и цепь выпрямленного тока. Для увеличения чувствительности диодного детектора на него подается напряжение смещения величиной порядка 0.4 В так, чтобы рабочая точка находилась в месте наибольшей кривизны вольтамперной характеристики (ВАХ) диода.

Так же, для увеличения отношения сигнал/шум и расширения динамического диапазона измерений, СВЧ-поле в волноводном тракте подвергается амплитудной модуляции [5]. Сигналы с детекторных диодов в этом случае имеют вид прямоугольных импульсов с частотой модуляции. С помощью измерительного усилителя выделяется и

¹ e-mail: slava_popov@front.ru

детектируется огибающая модулированного сигнала, несущая информацию об амплитуде (мощности) волны.

Генератор качающейся частоты ГЧ-61 обеспечивает импульсную модуляцию со скважностью 2 (режим меандра) и частотой 100 кГц. В современных генераторах режим модуляции может быть определен пользователем и варьируется в широких пределах – от единиц до сотен килогерц.

На рис. 1 изображена блок-схема устройства для измерения амплитудно-модулированного сигнала с детекторного СВЧ-диода. В скалярных рефлектометрах обычно применяются несколько идентичных детекторов для измерения падающей, отраженной и/или прошедшей волн. Каждому из каналов должен соответствовать отдельный измерительный усилитель, построенный по схеме рис. 1.

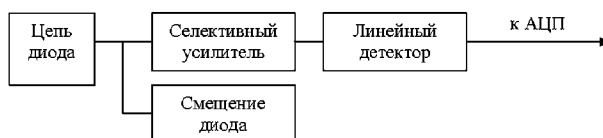


Рис. 1 Блок-схема измерительного усилителя.

Селективный усилитель предназначен для выделения и усиления составляющей сигнала с частотой 100 кГц, несущей информацию об амплитуде (мощности) волны в линии. Усилитель собран по схеме, изображенной на рис. 2, на микросхеме КР574УД2Б, представляющей собой два быстродействующих операционных усилителя (ОУ) с внутренней коррекцией и балансом. В обратную связь ОУ, включенного по схеме неинвертирующего усилителя, включен двойной Т-мост, который обеспечивает выделение синусоидальной составляющей сигнала с частотой 100 кГц [6].

Перечень элементов к схеме электрической принципиальной селективного усилителя: $R1=68$ кОм, $R2=R3=64$ кОм, $R4=360$ кОм, $C1=47$ нФ, $C2=C3=24$ пФ, $C4=47$ пФ.

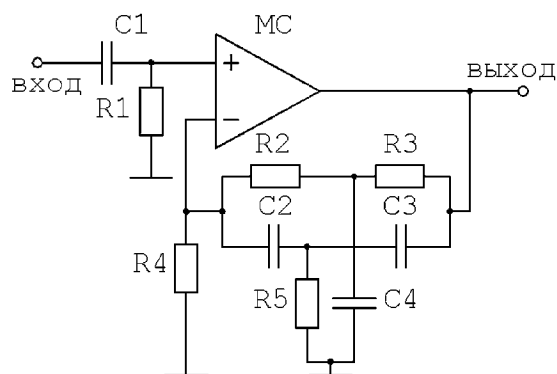


Рис. 2 Принципиальная схема селективного усилителя.

Для уменьшения взаимного влияния ОУ, размещенных в одном корпусе, селективный усилитель собран по двухкаскадной схеме. Каждый из каскадов выполнен по схеме рис. 2, а в качестве ОУ используются оба усилителя микросхемы КР574УД2Б. При этом сигнал с выхода первого каскада непосредственно поступает на вход второго. Таким образом, во-первых, без потери стабильности существенно возрастает коэффициент усиления, а, во-вторых, взаимное влияние ОУ оказывается синфазным, что позволяет его не учитывать.

Линейный детектор обеспечивает линейное детектирование сигналов с амплитудой от 0 В до приблизительно 10^3 мВ. Принципиальная схема линейного детектора изображена на рис. 3.

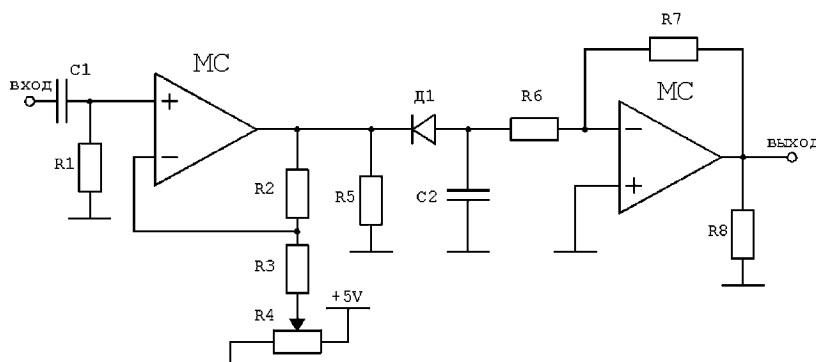


Рис. 3 Принципиальная схема линейного детектора.

В схеме линейного детектора применены следующие элементы: $R1=68$ кОм, $R2=R3=R6=R7=R8=47$ кОм, $R4=1.5$ кОм, $R5=91$ кОм, $C1=47$ нФ, $C2=150$ нФ, Д1 – диод КД522.

Для того чтобы обеспечить детектирование сигналов низкого уровня входной синусоидальный сигнал смещается на величину падения напряжения на диоде. Смещение обеспечивается неинвертирующим усилителем, собранным на одном из ОУ микросхемы КР574УД2Б. Величина смещения задается потенциометром R4 и составляет порядка 0,6 В.

Выходной каскад линейного детектора, собранный на второй половине микросхемы КР574УД2Б, представляет собой инвертирующий усилитель и предназначен, прежде всего, для задания диапазона выходных напряжений детектора с учетом реальных амплитуд сигнала с СВЧ-диода и коэффициента усиления селективного усилителя. Коэффициент усиления выходного каскада линейного детектора выбирается таким образом, чтобы максимальное постоянное напряжение, поступающее на вход АЦП, составляло около 5 В.

Схема смещения рабочей точки СВЧ-диода представлена на рис. 4 и представляет собой эмиттерный повторитель напряжения, снимаемого с резистивного делителя.

В схеме применены следующие элементы: $R1=12$ кОм, $R2=1.5$ кОм, $R3=500$ Ом, транзистор – КТ315. Смещение на диоде величиной от 0 до приблизительно 0,6 В задается с помощью переменного резистора R2.

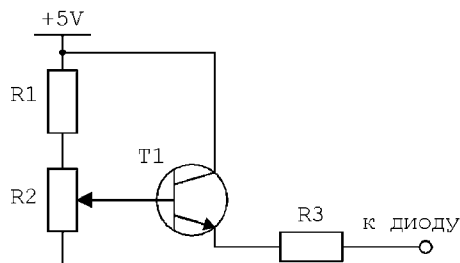


Рис. 4 Схема смещения диода.

Отметим, что динамический диапазон измерительного усилителя, построенного по схеме рис. 1, составляет 25 dB.

УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ

Устройство сопряжения предназначено для оцифровки напряжения пропорционального частоте, формируемого на выходе генератора качающейся частоты, и напряжений, снимаемых с линейных детекторов измерительного усилителя и пропорциональных амплитудам полей в каналах падающей и отраженной волн.

Каждый из сигналов оцифровывается с помощью блока, выполненного на основе одноканального 12-ти разрядного АЦП фирмы Burr-Brown ADS7816P [6] по схеме, изображенной на рис. 5. В схеме применены следующие элементы: R1=10 Ом, R2=500 Ом, C1=1000 мкФ, C2=0.15 мкФ, транзистор KT315, стабилитроны КС560. Отметим, что для повышения разрешения анализатора по частоте, можно использовать 16-ти разрядный АЦП ADS8320, который включается по схеме, тождественной приведенной на рис. 5.

Устройство сопряжения в целом содержит три таких блока, у которых объединены управляющие входы DCLOCK и CS, с помощью которых организована последовательная передача данных от АЦП к компьютеру. Для подключения устройства сопряжения к параллельному порту компьютера используется стандартный 8-проводной сетевой кабель. Для подачи инициализирующего сигнала CS используется 2-ой бит регистра Control Register параллельного порта, тактирующий импульс DCLOCK – подается через 3-й бит регистра Control Register, а последовательный код DOUT каждого из трех АЦП снимается с 4, 5 и 7 битов регистра Status Register.

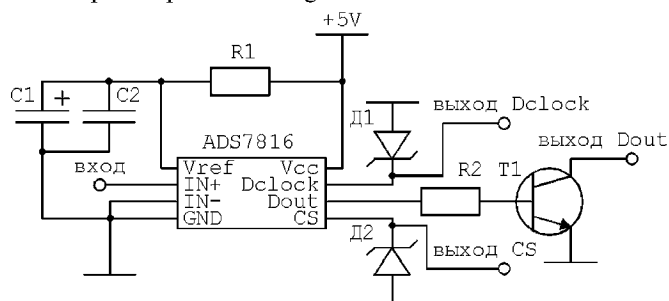


Рис. 5 Принципиальная схема аналогово-цифрового преобразователя.

Для питания АЦП используется стабилизированный источник напряжения. Резистор R1 и конденсаторы C1, C2 образуют фильтр низких частот для опорного напряжения, что уменьшает погрешность аналого-цифрового преобразования.

Цифровые входы и выходы оснащены защитой, которая позволяет производить безопасное подключение устройства к LPT-порту компьютера. Стабилитроны D1, D2 на 5.6 В используются для защиты входов DCLOCK и CS, а резистор R2 и транзистор T1 предназначены для защиты цифрового выхода АЦП. Программным путем учитывается, что при такой схеме включения выходной цифровой сигнал DOUT будет инвертирован.

КАЛИБРОВКА СКАЛЯРНОГО АНАЛИЗАТОРА С ПОМОЩЬЮ АТТЕНЮАТОРА

Измеряемые с помощью предложенного скалярного анализатора цепей сигналы с детекторов направленных ответвителей в общем случае не являются функцией квадрата амплитуды поля в волноводе (мощности волны). Это связано с тем, что динамический диапазон амплитуд поля значительно шире квадратичного участка ВАХ СВЧ-диода, на основе которого реализован волноводный детектор. Особенно заметным этот эффект становится при измерении сигналов, имеющих резонансный характер. Современные диодные детекторы, применяемые в скалярных анализаторах цепей фирм Agilent и Anritsu, подвергаются заводской калибровке, результаты которой сохраняются в EEPROM памяти детектора и автоматически считываются анализатором при вычислении значений параметров рассеяния [9].

В настоящем разделе предложен метод калибровки измерительной установки с помощью поляризационного аттенюатора, который позволяет учесть одновременно неквадратичность работы СВЧ-детектора, а также возможную нелинейность измерительного усилителя. Принципиальной особенностью метода является то, что он не нуждается в генераторе СВЧ-сигнала эталонной мощности, а точность калибровки определяется только точностью установки ослабления с помощью аттенюатора.

Калибровка осуществляется с использованием экспериментальной установки, изображенной на рис. 6. Волноводная секция 2, ограниченная металлическим короткозамыкателем с одной стороны и индуктивной диафрагмой с другой, образует квазирезонатор. Амплитуда поля в квазирезонаторе, может изменяться с помощью поляризационного аттенюатора, включенного между источником СВЧ-колебаний и питающей квазирезонатор секцией 1.

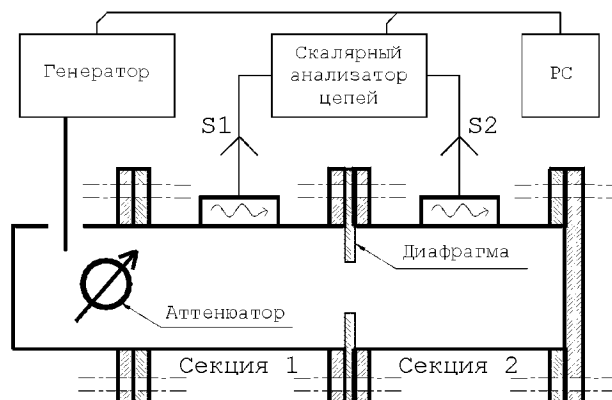


Рис. 6 Схема установки для калибровки скалярного анализатора цепей.

Настроившись на произвольный резонанс около центральной частоты волновода, следует измерить сигнал S_2 с детектора секции 2 при нескольких значениях уровня ослабления аттенюатора. После этого необходимо поменять секции 1 и 2 местами и провести аналогичные измерения сигнала S_1 с детектора секции 1. Для удобства анализа, вычисляются квадратные корни из сигналов S_1 и S_2 .

Сигналы S_1 и S_2 , измеренные при ослаблении 0 dB, принимаются за точные значения амплитуды поля в волноводе \tilde{S}_1 и \tilde{S}_2 соответственно, т.е.:

$$\tilde{S}_1|_{0dB} = S_1|_{0dB}, \quad \tilde{S}_2|_{0dB} = S_2|_{0dB}. \quad (1)$$

После этого, для каждой секции строятся таблицы вида: «измеренный сигнал» – «точный сигнал». «Точный» сигнал вычисляется по формуле:

$$\tilde{S}_{1,2}|_{X dB} = \tilde{S}_{1,2}|_{0dB} \cdot 10^{X/20}, \quad (2)$$

где X – считываемое с табло аттенюатора значение ослабления сигнала в dB.

На рис. 7 приведена зависимость $\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1(S_1)$ (функция $\tilde{S}_2 = \tilde{S}_2(S_2)$ имеет аналогичный вид) амплитуды «точного» сигнала от амплитуды «измеренного» сигнала. Маркерами отмечены отдельные экспериментальные точки, полученные при разных значениях ослабления. Очевидно, что в случае квадратичной зависимости сигнала с выхода измерительного усилителя от поля в волноводе, была бы получена прямая, изображенная на рисунке сплошной линией без маркеров.

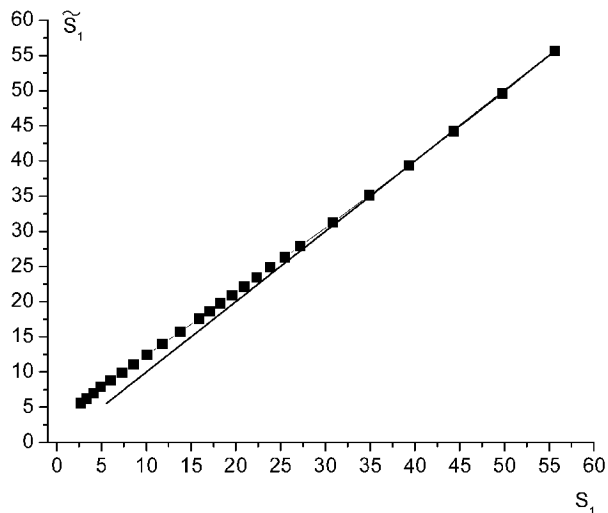


Рис. 7 Калибровочная кривая для пересчета «измеренного» сигнала S_1 в «точный» сигнал \tilde{S}_1 .

На основе таблиц, встроенных в программу-драйвер скалярного анализатора цепей, пересчет снимаемых сигналов осуществляется автоматически. Для значений сигналов, несовпадающих с узлами, по которым построены таблицы пересчета, применяется линейная интерполяция. Кроме того, величины \tilde{S}_1 , \tilde{S}_2 возводятся в квадрат для того, чтобы получить зависимость не от амплитуды, а от мощности волны в волноводе.

Рассмотрим схему стандартного скалярного рефлектометра, когда направленный ответитель 1 измеряет волну, падающую на исследуемый объект, а ответитель 2 – отраженную от объекта. Обозначим через A_1 амплитуду волны в секции 1, через A_2 – амплитуду волны в секции 2. Тогда величины \tilde{S}_1 , \tilde{S}_2 , получаемые в результате калибровки, связаны с амплитудой поля в волноводе следующими соотношениями:

$$\tilde{S}_1 = c_1 A_1^2, \quad \tilde{S}_2 = c_2 A_2^2. \quad (3)$$

Константы c_1 , c_2 в общем случае не совпадают и зависят от выбора единичного уровня в (1), который соответствует ослаблению 0 dB.

Отношение сигналов, принимаемых ответителями, имеет вид:

$$\tilde{\Psi} = \frac{\tilde{S}_2}{\tilde{S}_1} = \frac{c_2}{c_1} \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2. \quad (4)$$

Для исключения из выражения (4) отношения неизвестных констант следует провести измерения сигналов в секциях 1 и 2 при одинаковых электродинамических условиях, например, когда каждая из этих секций подключена непосредственно к источнику колебаний с одной стороны и согласована с другой. В этом случае можно считать, что

амплитуда поля в линии, как в первом, так и во втором случае одинакова и равна A_0 . После пересчета сигналов с использованием формул (3) получим:

$$\tilde{S}_1^0 = c_1 A_0^2, \quad \tilde{S}_2^0 = c_2 A_0^2. \quad (5)$$

Рассмотрим функцию Ψ следующего вида:

$$\Psi = \tilde{\Psi} \frac{\tilde{S}_1^0}{\tilde{S}_2^0} = \frac{c_2}{c_1} \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2 = \left| \frac{A_2}{A_1} \right|^2. \quad (6)$$

Таким образом, функция Ψ , определяемая выражением (6), равна отношению квадратов амплитуд поля в секциях 1 и 2 или модулю коэффициента отражения от исследуемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный скалярный анализатор обеспечивает высокую точность, надежность, гибкость и скорость измерений. Поскольку анализатор непосредственно подключается к персональному компьютеру, то снимаемые данные можно подвергать дальнейшей обработке с помощью специализированного программного обеспечения.

Скалярный анализатор цепей использовался для измерений с помощью многорезонансного метода [8] комплексного коэффициента отражения от набора эталонных индуктивных диафрагм. Погрешность измерения составила порядка 0,02 по модулю и менее 2 градусов по фазе коэффициента отражения. Такую точность обеспечивают наиболее современные векторные анализаторы цепей. Также устройство применялось для измерений волноводным методом параметров материалов [2, 10]. Результаты, полученные для воздуха, фторопласта, спирта и ряда других образцов, хорошо согласуются с литературными данными и служат подтверждением высокой точности, как схемы скалярного анализатора цепей, так и метода калибровки с использованием поляризационного аттенюатора.

Список литературы

1. Agilent Technologies Inc. Vector Network Analyzers for Measurements to 50 GHz. // Microwave Journal. 10, 2001.
2. Бержанский В.Н., Пономаренко В.И., Попов В.В., Торкунов А.В. Измерение импеданса микропроводов в прямоугольном волноводе // Письма в Журнал Технической Физики. 2005, том 31, вып. 22, 26 ноября, с. 24-28.
3. Пономаренко В.И., Попов В.В., Руденко В.В. Обработка зависимостей «частота-сигнал» при измерении коэффициента отражения в волноводе // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. - Серия «Физика». - 2003. - Т. 15-16 (54-55). - № 1. - С. 94-102.
4. Звягинцев А.О., Иванов А.И., Погарский С.А., Стрижаченко А.В., Чижов В.В. Многофункциональный СВЧ измерительный комплекс // Материалы 13-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». 8-12 сентября, Севастополь, Украина. Издательство «Вебер», Севастополь, 2003 г. с.674-676.
5. Милованов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980, 464 с.
6. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и Связь, 1992, 302 с.

СКАЛЯРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ ДЛЯ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

7. Burr-Brown 2000 CD-ROM Catalog. ADS7816 12-Bit High Speed Micro Power Sampling Analog-To-Digital Converter.
8. Пономаренко В.И., Попов В.В. Многорезонансный метод измерения комплексного коэффициента отражения в волноводе. – Приборы и техника эксперимента, №1, 2005, с. 94-100.
9. Agilent 85037 Series Precision Detector, 10 MHz to 18 GHz. Data Sheet.
10. Виногородский Д.Ф., Пономаренко В.И., Попов В.В. Исследование дисперсии диэлектрической проницаемости веществ многорезонансным методом // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. - 2003. - Серия «Физика». - Т. 15-16 (54-55). - № 1. - С. 156-160.

Поступила в редакцию 17.10.2005 г.