

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Кафедра радиоэлектроники и систем связи

А.А. Трубачев

А.Е. Бурая

В.Г. Романова

## **ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Методические указания для выполнения лабораторных работ для студентов  
технических направлений подготовки и специальностей

Томск

2026

УДК 621.3  
ББК 32.85  
Т77

**Рецензент:**

**Семенов Э.В.**, доцент, профессор кафедры радиоэлектроники  
и систем связи ТУСУР, доктор технических наук

**Трубачев, Анатолий Андреевич**

Т77 Экстракция параметров эквивалентной схемы пассивных элементов:  
методические указания к лабораторной работе / А.А. Трубачев, А.Е. Бурая,  
В.Г. Романова. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники,  
2026. – 15 с.

Учебно-методическое пособие содержит краткое теоретическое  
описание методам экстракции параметров эквивалентной схемы пассивных  
элементов, предназначено для выполнения лабораторных работ студентами  
технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено протоколом на заседании кафедры протокол № 6 от  
07.05.2026 г.

УДК 621.3  
ББК 32.85

© Трубачев А.А., Бурая А. Е.,  
Романова В.Г., 2026  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2026

## Оглавление

Введение.....	4
1 Краткие теоретические сведения .....	4
1.1 Описание файлов Touchstone.....	6
1.2 Перемещение плоскости калибровки .....	7
1.3 Описание измерительной установки .....	10
2 Определение коэффициента отражения линии и обработка данных .....	12
3 Требования к оформлению отчета .....	14
Список использованных источников .....	15

## Введение

**Цель работы:** получение навыков определения комплексного коэффициента отражения измеряемых устройств. Вычисление номиналов элементов эквивалентной схемы измеряемых устройств.

### 1 Краткие теоретические сведения

Как известно, S-параметры линии передачи без учета потерь равны [1]:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{\Gamma(1-e^{-2j\theta})}{1-\Gamma^2 e^{-2j\theta}}, \quad (1)$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{(1-\Gamma^2)e^{-j\theta}}{1-\Gamma^2 e^{-2j\theta}}, \quad (2)$$

Если предположить, что линия согласована, то  $\Gamma=0$  и матрица рассеяния приобретает вид:

$$S_L = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\theta} \\ e^{-j\theta} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

По правилу преобразования из S-матрицы в T:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{21}} & -\frac{S_{22}}{S_{21}} \\ \frac{S_{11}}{S_{21}} & S_{12} - \frac{S_{11}S_{22}}{S_{21}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Имеем T-матрицу согласованной линии без потерь:

$$T_L = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Теперь рассмотрим случай, когда некоторое устройство нагружено на двухполюсник, описываемый коэффициентом отражения  $\Gamma_L$ , как показано на рисунке 1.1.

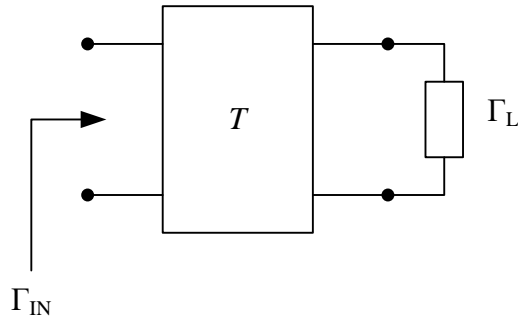


Рисунок 1.1 – Двухполусник, описываемый коэффициентом отражения  $\Gamma_L$

Определим коэффициент отражения такой цепи по входу [2].

Падающие и отраженные волны связаны через  $T$ -матрицу, как показано ниже:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Учитывая тот факт, что отраженная от нагрузки волна равна:

$$a_2 = \Gamma_L b_2 \quad (7)$$

Тогда получим:

$$a_1 = T_{11} b_2 + T_{12} \Gamma_L b_2 \quad (8)$$

$$b_1 = T_{21} b_2 + T_{22} \Gamma_L b_2 \quad (9)$$

Умножив обе части выражения для  $a_1$  на  $(T_{21} + T_{22} \Gamma_L)$ , а выражение для  $b_1$  на  $(T_{21} + T_{22} \Gamma_L)$ , получим:

$$a_1 (T_{21} + T_{22} \Gamma_L) = (T_{21} + T_{22} \Gamma_L) (T_{11} + T_{12} \Gamma_L) b_2 \quad (10)$$

$$b_1 (T_{11} + T_{12} \Gamma_L) = (T_{11} + T_{12} \Gamma_L) (T_{21} + T_{22} \Gamma_L) b_2 \quad (11)$$

Тогда можно приравнять два выражения:

$$a_1 (T_{21} + T_{22} \Gamma_L) = b_1 (T_{11} + T_{12} \Gamma_L) \quad (12)$$

Исходя из условия, что

$$\Gamma_{IN} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{(T_{21} + T_{22} \Gamma_L)}{(T_{11} + T_{12} \Gamma_L)} \quad (13)$$

Учитывая рассчитанную  $T$ -матрицу для согласованной линии передачи, получим :

$$\Gamma_{IN} = e^{-2j\theta} \Gamma_L \quad (14)$$

Таким образом, чтобы определить коэффициент отражения двухполюсника, зная его коэффициент отражения при подключении через линию необходимо поделить его на  $e^{-2j\theta}$ .

При этом, зная, что:

$$\theta = \beta l = \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (15)$$

необходимо определить эквивалентную длину линии  $l$ .

При измерении коэффициента отражения линии, нагруженной на ХХ во временной области, измеренное время равно удвоенному расстоянию до новой опорной плоскости, пройденному со скоростью света, так как волна, двигаясь от генератора проходит всю длину линии, затем отразившись от ХХ проходит всю длину еще раз в обратном направлении. Таким образом:

$$l = c \frac{\Delta t}{2} \quad (16)$$

## 1.1 Описание файлов Touchstone

Файлы расширением \*.snp содержат информацию о параметрах рассеяния, описываемые частотно-зависимыми линейными векторными параметрами для векторных анализаторов цепей от 1 (\*.s1p) до 10 (\*.s10p) портов, такой формат данных также известен как формат Touchstone. Рассмотрим подробно структуру данных в файле формата \*.s1p и как с ней работать.

Файлы touchstone представляют собой текстовые файлы ASCII, в которых частотно-зависимые данные отображаются построчно, по одной строке на точку данных, в порядке возрастания частоты. Каждая частотная линия состоит из значения частоты и одной или нескольких пар значений величины и фазы каждого S-параметра на этой частоте. Значения разделяются одним или несколькими пробелами или табуляциями. Комментарии предваряются восклицательным знаком (!). Комментарии могут отображаться в отдельных строках или после данных в любой строке

или строках. Лишние пробелы игнорируются. На рисунке 1.2 приведен стандартный touchstone файл.

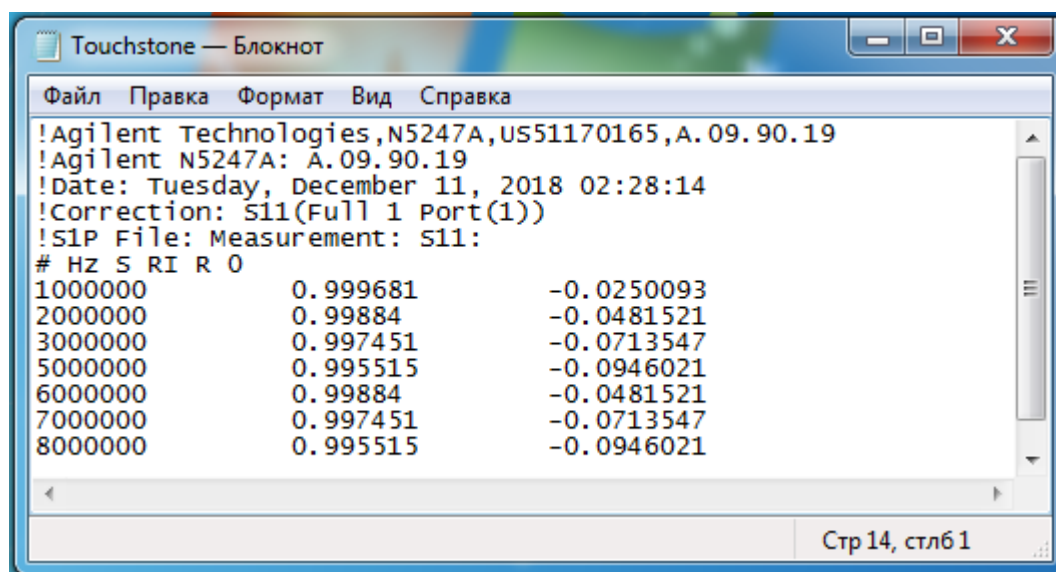


Рисунок 1.2 – Структура Touchstone

Строки частотных данных содержат интересные данные. Для файлов данных с 2 портами используется специальный формат, в котором все данные векторных параметров для одной частоты перечислены в одной строке. Порядок векторных параметров: S11, S21, S12, S22. Строка текста после знака # показывает следующие параметры: Hz- частота, Гц; S- вид измеряемого параметра; RI–формат данных для сохранения (существует также MA–амплитуда в размах и фаза, DB – амплитуда в децибелах и фаза, RI – реальное и мнимое значение); R 0 – сопротивление нормировки (перенормировки).

## 1.2 Перемещение плоскости калибровки

В Mathcad файле для перемещения плоскости калибровки первым делом необходимо загрузить touchstone файл (рис. 1.3–1.4), выбрать номер строки, с которой будет производиться считывание данных (строка, сразу после строки начинающейся с «#»).

Считать данные из файла в среде MathCad можно следующим образом: в рабочем окне нажать правой кнопкой мыши и выбрать «ввод из файла», выбрать необходимый файл, задать диапазон данных для считывания.

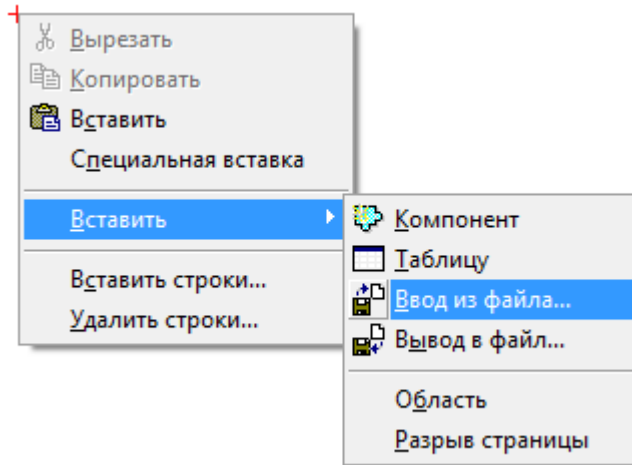


Рисунок 1.3 – Вставка элемента «ввод из файла»

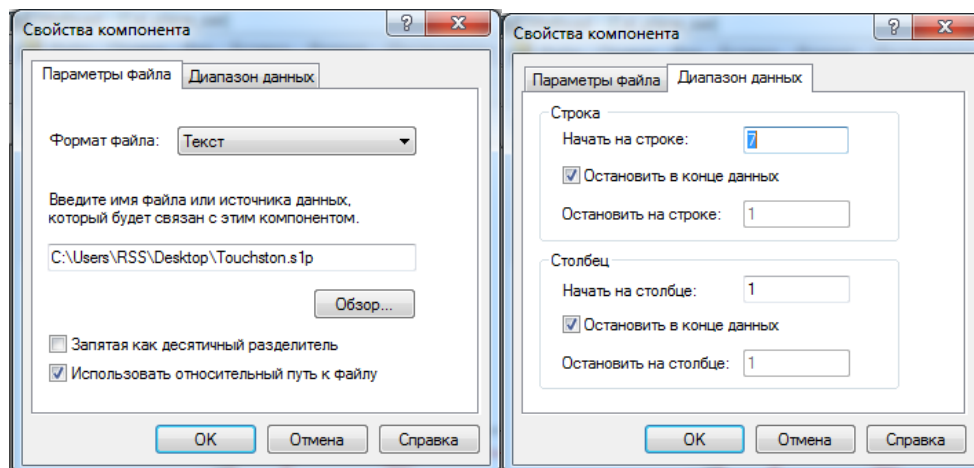
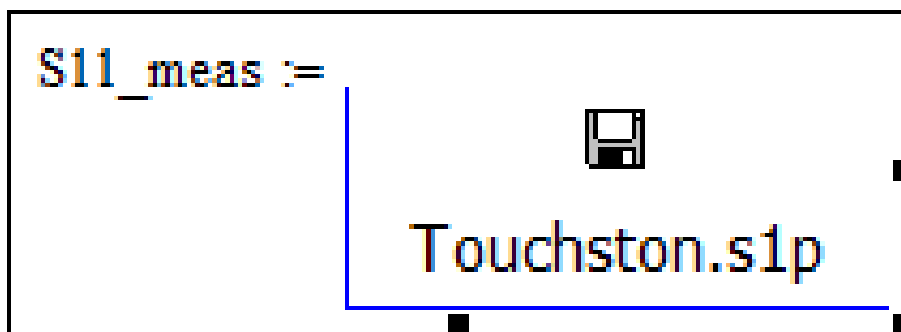


Рисунок 1.4 – Загрузка данных

Для дальнейшей работы с данными необходимо ввести порядковый номер частот (обращение к строкам данных), как показано на рис. 1.5.

$$k := 0..rows(S11\_meas) - 1$$

Рисунок 1.5 – Запись выражения в среде MathCad для доступа к строкам данных

Математические операции нужно выполнять с комплексными значениями коэффициента отражения (Рис. 1.6).

$$S11\_complex_k := S11\_meas_{k,1} + i \cdot S11\_meas_{k,2}$$

Рисунок 1.6 – Запись выражения в среде MathCad для получения комплексных значений коэффициента отражения

Далее перенесем плоскость калибровки на длину линии (Рис. 1.7):

$$f_k := S11\_meas_{k,0} \quad f - \text{Список частот, Гц}$$

$$l_k := 34.476 \cdot 10^{-3} \quad l - \text{длина линии, м}$$

$$\theta_k := 2 \cdot \pi \cdot \frac{1 \cdot f_k}{3 \cdot 10^8} \quad \text{- Фазовая задержка сигнала при прохождении через линию, рад}$$

$$\Gamma_k := \frac{S11\_complex_k}{e^{-i \cdot 2 \cdot \theta_k}} \quad \text{- Комплексный коэффициент отражения, раз}$$

Рисунок 1.7 – Запись выражения в среде MathCad для переноса плоскости калибровки

Выполнив необходимые математические преобразования необходимо сохранить результаты в формате touchstone с расширением \*.s1p (рисунки 1.8–1.9). Для того, чтобы сохранить данные в файл, необходимо в рабочем окне MathCad нажать правой кнопкой мыши и выбрать вывод в файл (Рис. 1.8).

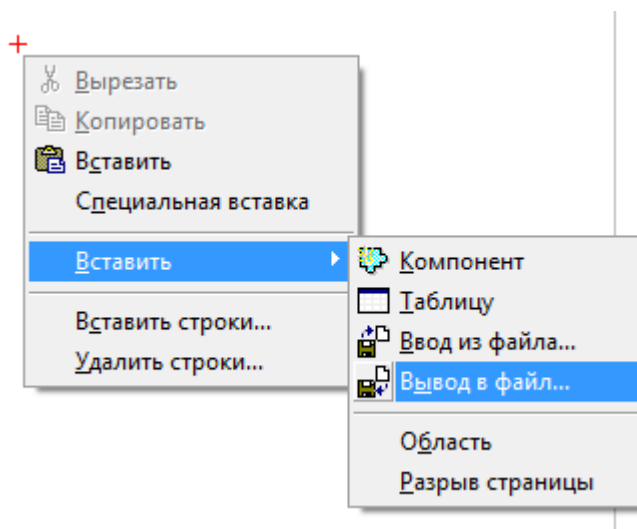


Рисунок 1.8 – Вставка элемента «вывод из файла»

Затем нужно выбрать путь сохранения файла:

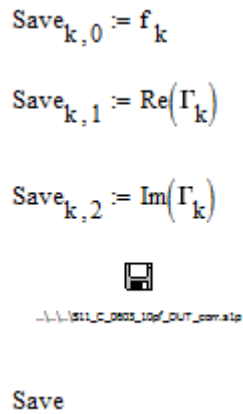


Рисунок 1.9 – Вывод файла из Mathcad

После сохранения данных необходимо вручную первой строкой добавить следующую строку текста для правильного считывания файла в САПР: # Hz S RI R 0

### 1.3 Описание измерительной установки

На рисунке 1.10 изображена схема измерительной установки. Она состоит из СВЧ переключателя, управляемого с ПК через контроллер. К общему порту переключателя подключен векторный рефлектометр Caban R140 [3]. СВЧ переключатель может соединять вход рефлектометра и одну из нагрузок, которые включают меры короткого замыкания (КЗ), холостого хода (ХХ), согласованную нагрузку (СН) и измеряемые устройства 1–3 (ИУ 1–3).

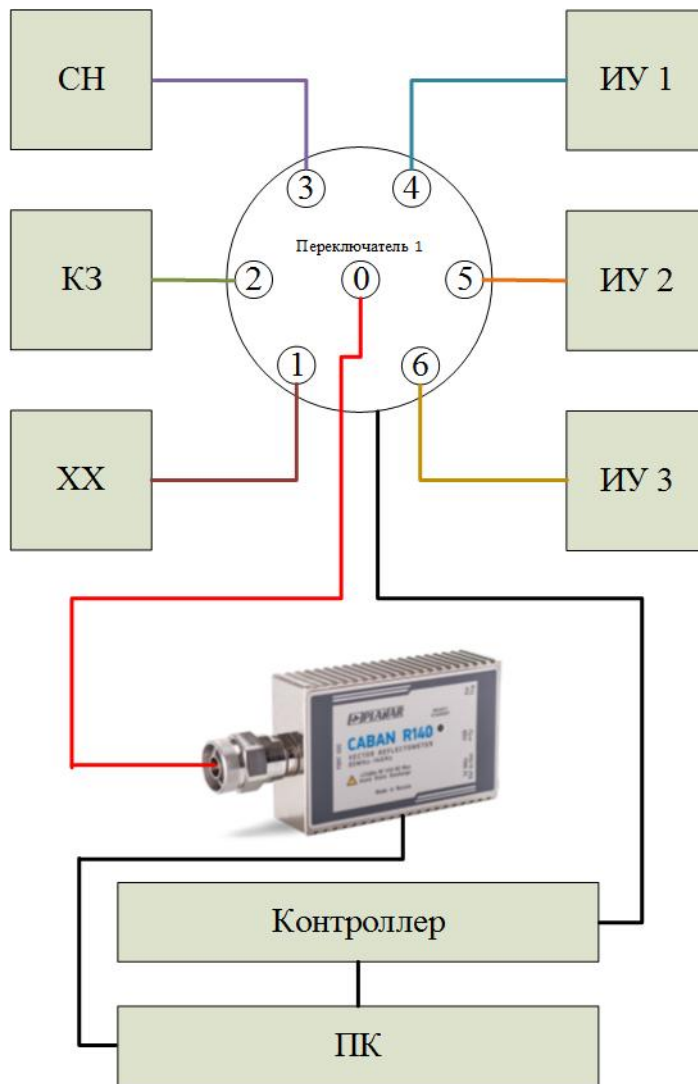


Рис. 1.10 – Схема установки лабораторной работы

## 2 Определение коэффициента отражения линии и обработка данных

Порядок действий для выполнения работы следующий:

1. Подключиться к удаленному рабочему столу (RDP-клиент).
2. Запустить необходимое программное обеспечение (Keysight BenchVue – для управления СВЧ переключателем, RVNA – для работы с векторным анализатором цепей Planar Caban R140).

### 3. Калибровка ВАЦ

а) задать исходные данные:

- диапазон рабочих частот (85 МГц-10 ГГц);
- мощность (высокая);
- фильтр ПЧ (100 Гц);
- количество точек измерения 1001.

б) загрузить калибровочный набор (Micran\_cal\_Kit);

в) изменять положения СВЧ переключателя согласно схеме установки, проводить поэтапную калибровку при помощи мер.

4. Измерить коэффициент отражения линии, нагруженной на ХХ (ИУ 1) во временной области. Для этого:

а) задать режим измерения во временной области;

б) создать маркер и определить максимум коэффициента отражения и его координаты по времени;

в) перейти обратно в режим частотного измерения.

5. Измерить коэффициент отражения линии, нагруженной на компонент А (ИУ 2) в частотной области. Для этого:

а) перейти к формату отображения в виде диаграммы Вольперта-Смитта ( $R+jX$ ).

б) измерить коэффициент отражения с удлинением портов и без него.

в) сохранить характеристики в виде файлов s1p в формате Реальное-мнимое (RI) с удлинением портов и без него (2 отдельных файла).

6. Измерить коэффициент отражения линии, нагруженной на компонент Б (ИУ 3) в частотной области. Для этого:

а) перейти к формату отображения в виде диаграммы Вольперта-Смитта ( $R+jX$ ).

б) измерить коэффициент отражения с удлинением портов и без него.

в) сохранить характеристики в виде файлов s1p в формате Реальное-мнимое (RI) с удлинением портов и без него (2 отдельных файла).

7. Обработать данные измерений в MathCad, согласно вышеописанной методике (Описание файлов Touchstone).

8. Вычислить номиналы элементов эквивалентной схемы (при помощи САПР).

9. Сравнить результаты моделирования и эксперимента (при помощи САПР).

### **3 Требования к оформлению отчета**

Отчет должен содержать:

1. Постановку задачи и цели исследований.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты расчетов.
4. Экспериментальные результаты.
5. Сравнение полученных результатов и выводы по работе.

### Список использованных источников

1. Матханов П.Н. Основы синтеза линейных электрических цепей/П.Н. Матханов. – М: Высшая школа, 1978. – 208 с.
2. Румянцев К.Е., Землянухин П.А., Окорочков А.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для студентов. образоват. учреждений сред. проф. образования/К.Е. Румянцев, П.А. Землянухин, А.И. Окорочков. – М.: Academia, 2005. – 382 с.
3. Векторный рефлектометр Caban R140. Технические характеристики. [Электронный ресурс]: ООО «Планар». URL: <https://planarchel.ru/> (дата обращения: 08.04.2026).
4. Yeom Kyung-Whan. Microwave Circuit Design: A Practical Approach Using ADS. Microwave Circuit Design: A Practical Approach Using ADS. Pearson Education, Limited, 2015.