

**МАТРИЦА РАССЕЙЯНИЯ ТОЧКИ ОТВЕТВЛЕНИЯ
ВНУТРИДОМОВОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ**

**МАТРИЦЯ РОЗСІЯННЯ ТОЧКИ ВІДГАЛУЖЕННЯ
ВНУТРІШНЬОДОВОМОЇ ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ**

SCATTING MATRIX OF THE POINT BRUNCH HOME WIRING

Аннотация. Определены элементы матрицы рассеяния точки ответвления, образованной соединением произвольного числа двухжильных отрезков проводов с различным волновым сопротивлением.

Анотація. Визначені елементи матриці розсіяння точки відгалуження, яка утворена з'єднанням довільної кількості двожильних відрізків дротів з різним хвильовим опором.

Summary. The scattting matrix elements of point brunch, which is formed by arbitrary number twin conductors with the different impedance, is defined.

Существующая сеть внутридомовых и внутриквартирных электросетей используется не только для подачи электрической энергии потребителям. На ее базе строится автоматизированная система контроля и учета энергопотребления бытовых потребителей, система автоматического считывания показаний счетчиков [1] и организуется доступ в Интернет. Для реализации широкополосного доступа разработана технология PLC/BPL (Power Line Communication/Broadband over Power Lines) [2], в которой используется передача цифровой информации в диапазоне частот от 1 до 32 МГц. По прогнозам исследователей, число пользователей PLC/BPL-технологии в США в 2011 году достигнет 2,5 млн. Ожидается, что в 2012 г. 33% всех новых пользователей сетей широкополосного доступа в США будут применять PLC/BPL-технологии, а 13% “старых” пользователей перейдут на эту технологию [2].

Для определения характеристик PLC/BPL-системы, необходимо решить проблему определения электрических параметров компонентов, входящих в состав внутридомовой электропроводки. Такими компонентами являются отрезки проводов, соединения (стыки) отрезков проводов, ответвления (в том числе точки ответвления), установочные устройства и нагрузки – потребители электроэнергии. Соединения и ответвления проводов выполняются в соединительных и ответвительных коробках. Внутридомовая электропроводка подключается к распределительному и защитному устройству (РЗУ).

Электрические параметры компонентов, входящих в состав электропроводки, наиболее полно описываются матрицей рассеяния. Матрицы рассеяния отрезков линий и мест соединений (стыков) линий известны [3...5]. Однако информация о матрице рассеяния точки ответвления, в которой соединяется произвольное число отрезков проводов, в литературе отсутствует.

Целью статьи является определение матрицы рассеяния точки ответвления, образованной соединением произвольного числа отрезков двухжильных проводов.

Будем рассматривать ответвление как многополюсник. Для анализа передающих свойств многополюсников, в частности на СВЧ, широкое применение получили матрицы передачи [A] и рассеяния [S], которые связаны между собой [4, 5]. Особенностью матрицы рассеяния является физический смысл ее элементов. Так, диагональные элементы являются коэффициентами отражения на соответствующих входных полюсах многополюсника при согласованных нагрузках на остальных полюсах. Недиagonальные элементы являются коэффициентами передачи между двумя входными полюсами при согласованных нагрузках на остальных полюсах.

Матрицу рассеяния точки ответвления с произвольным числом отрезков двухжильных проводов определим методами теории цепей СВЧ.

Ответвление, образованное n отрезками двухжильных проводов, приведено на рис. 1. Тонкими линиями показаны токопроводящие жилы, а места соединения жил отрезков проводов обозначены маленькими кружками. Цифры на схеме обозначают номера входов (полюсов) отрезков проводов, $U_{\text{пад}}$ и $U_{\text{отр}}$ – напряжения падающих и отраженных волн в отрезках двухжильных проводов, буквой A обозначена точка ответвления двухжильных проводов.

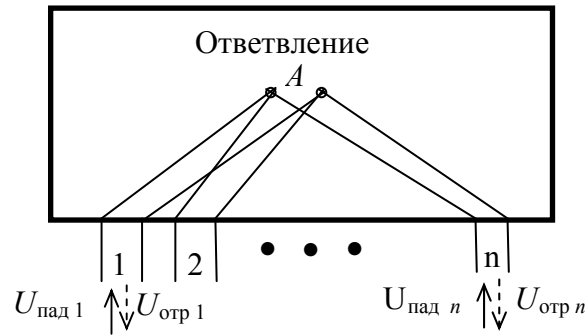


Рисунок 1 – Схема ответвления, состоящего из n соединенных в одной точке отрезков двухжильных проводов

Рассмотрим общий случай применения отрезков двухжильных проводов с разными волновыми сопротивлениями Z_{Bi} .

Определим диагональный элемент матрицы рассеяния S_{ii} при $1 \leq i \leq n$.

Коэффициент отражения S_{ii} со стороны входного полюса i равен отношению напряжения отраженной волны $U_{отр i}$ к напряжению падающей волны $U_{пад i}$, который связан с волновым сопротивлением двухжильного провода Z_{Bi} и сопротивлением нагрузки Z_{Hi} в точке ответвления A [6]

$$S_{ii} = \frac{Z_{Hi} - Z_{Bi}}{Z_{Hi} + Z_{Bi}}, \quad (1)$$

где Z_{Hi} – эквивалентное сопротивление нагрузки на выходе двухжильного провода i в точке ответвления, которое образовано параллельным включением входных (волновых) сопротивлений проводов в направлении входов $1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$

$$Z_{Hi} = 1 / \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{Bj}}. \quad (2)$$

После подстановки выражения (2) в (1), получим

$$S_{ii} = \frac{1 - Z_{Bi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{Bj}}}{1 + Z_{Bi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{Bj}}}. \quad (3)$$

Следует отметить, что при получении выражения для диагонального элемента матрицы S_{ii} , который является отношением напряжений падающей и отраженной волн, нормирование последних не изменяет величину S_{ii} , так как проводится относительно волнового сопротивления i -го отрезка провода.

Недиагональные элементы матрицы рассеяния ответвления S_{ij} при $1 \leq i \neq j \leq n$ представляют собой коэффициенты передачи по напряжению от входа j к входу i [4, 5]. Определим недиагональный элемент матрицы рассеяния S_{ji}

$$S_{ji} = \frac{U_{отрj}}{U_{падi}}. \quad (4)$$

Напряжение $U_{отв}$ в точке ответвления A является суммой напряжений падающей и отраженной волн со стороны входа i , которое с учетом коэффициента отражения на входе i можно представить в виде [6]

$$U_{отвj} = U_{падi} (1 + S_{ii}). \quad (5)$$

Подставив выражение (3) в (5), получим выражение для $U_{отвj}$

$$U_{отвj} = U_{падi} \frac{2}{1 + Z_{Bi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{Bj}}}. \quad (6)$$

Проведя нормировку напряжений $U_{отвj}$ и $U_{падi}$ по волновым сопротивлениям проводов j и i , и воспользовавшись равенством $U_{отрj} = U_{отвj}$, которое выполняется только в точке ответвления A , получим выражение для элемента матрицы S_{ji}

$$S_{ji} = \frac{2\sqrt{Z_{Bi}/Z_{Bj}}}{1 + Z_{Bi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{Z_{Bj}}} \quad (7)$$

В качестве примера приведем выражения для определения элементов матриц рассеяния двух распространенных на практике ответвлений, состоящих из трех и четырех отрезков проводов. Выражения для определения элементов матриц рассеяния получены с помощью выражений (3), (7) и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Элементы матрицы рассеяния точки ответвления, образованной соединением трех и четырех отрезков проводов

Элементы матрицы рассеяния точки ответвления	Выражения для определения элементов матриц рассеяния точки ответвления, образованной соединением	
	трех отрезков проводов	четырёх отрезков проводов
S_{11}	$(Z_{B2}Z_{B3} - Z_{B1}(Z_{B2} + Z_{B3}))/D_3$	$(Z_{B2}Z_{B3}Z_{B4} - Z_{B1}(Z_{B2}Z_{B3} + Z_{B2}Z_{B4} + Z_{B3}Z_{B4}))/D_4$
S_{22}	$(Z_{B1}Z_{B3} - Z_{B2}(Z_{B1} + Z_{B3}))/D_3$	$(Z_{B1}Z_{B3}Z_{B4} - Z_{B2}(Z_{B1}Z_{B3} + Z_{B1}Z_{B4} + Z_{B3}Z_{B4}))/D_4$
S_{33}	$(Z_{B1}Z_{B2} - Z_{B3}(Z_{B1} + Z_{B2}))/D_3$	$(Z_{B1}Z_{B2}Z_{B4} - Z_{B3}(Z_{B1}Z_{B2} + Z_{B1}Z_{B4} + Z_{B2}Z_{B4}))/D_4$
S_{44}	–	$(Z_{B1}Z_{B2}Z_{B3} - Z_{B4}(Z_{B1}Z_{B2} + Z_{B1}Z_{B3} + Z_{B2}Z_{B3}))/D_4$
$S_{12} = S_{21}$	$2Z_{B3}\sqrt{Z_{B1}Z_{B2}}/D_3$	$2Z_{B3}Z_{B4}\sqrt{Z_{B1}Z_{B2}}/D_4$
$S_{13} = S_{31}$	$2Z_{B2}\sqrt{Z_{B1}Z_{B3}}/D_3$	$2Z_{B2}Z_{B4}\sqrt{Z_{B1}Z_{B3}}/D_4$
$S_{14} = S_{41}$	–	$2Z_{B2}Z_{B3}\sqrt{Z_{B1}Z_{B4}}/D_4$
$S_{23} = S_{32}$	$2Z_{B1}\sqrt{Z_{B2}Z_{B3}}/D_3$	$2Z_{B1}Z_{B4}\sqrt{Z_{B2}Z_{B3}}/D_4$
$S_{24} = S_{42}$	–	$2Z_{B1}Z_{B3}\sqrt{Z_{B2}Z_{B4}}/D_4$
$S_{34} = S_{43}$	–	$2Z_{B1}Z_{B2}\sqrt{Z_{B3}Z_{B4}}/D_4$
Примечание. $D_3 = Z_{B1}Z_{B2} + Z_{B1}Z_{B3} + Z_{B2}Z_{B3}$, $D_4 = Z_{B1}Z_{B2}Z_{B3} + Z_{B1}Z_{B2}Z_{B4} + Z_{B1}Z_{B3}Z_{B4} + Z_{B2}Z_{B3}Z_{B4}$.		

В частном случае, при равенстве волновых сопротивлений отрезков двухжильных проводов, элементы матрицы рассеяния точки ответвления принимают следующие значения

при соединении трех отрезков

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = -1/3, \quad S_{12} = S_{21} = S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} = 2/3,$$

при соединении четырех отрезков

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = -1/2, \\ S_{12} = S_{21} = S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} = S_{14} = S_{41} = 1/2,$$

при соединении n отрезков

$$S_{ii} = \frac{2}{n} - 1, \quad S_{ij} = \frac{2}{n}.$$

Рассчитанные значения элементов матрицы рассеяния точки ответвления, образованной соединением трех отрезков проводов, совпадают со значениями элементов матрицы рассеяния коаксиального разветвления, состоящего из трех одинаковых отрезков коаксиальных кабелей с Т-волной [4].

Измерение рабочего затухания и затухания несогласованности ответвлений, состоящих из трех и четырех соединенных в одной точке метровых отрезков двухжильных проводов типа ППВ 2 x 2,5 в диапазоне частот от 10 кГц до 4 МГц с помощью анализатора систем передачи и кабелей связи AnCom А-7, подтвердили достоверность приведенных результатов расчета значений элементов матриц рассеяния этих точек ответвлений.

В заключение можно отметить следующее.

1. Методами теории цепей СВЧ получены выражения для элементов матрицы рассеяния точки ответвления домовой электропроводки, образованной соединением произвольного числа отрезков двухжильных проводов с разными волновыми сопротивлениями.

2. Экспериментальная проверка значений элементов матрицы рассеяния ответвлений, состоящих из трех и четырех соединенных в одной точке отрезков двухжильных проводов типа ППВ 2 x 2,5, в диапазоне частот от 10 кГц до 4 МГц подтвердила достоверность результатов расчетов по предлагаемой методике.

3. Знание матрицы рассеяния точки ответвления позволяет решить задачу определения параметров передачи внутридомовой электропроводки произвольной топологии и скорости передачи цифровых сигналов PLC-технологии.

Литература

1. *Моррис П. Питер*. Реализация технологии BPL / Питер Моррис // Сети и системы связи. – 2007. – № 11.
2. *Тубинис В.В.* АСКУЭ бытовых потребителей. Преимущества PLC-технологии связи / В.В. Тубинис // Новости электротехники. – 2005. – № 2(32).
3. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / Баскаков С.И. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.
4. *Сазонов Д.М.* Устройства СВЧ / Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.
5. *Фельдштейн А.Л.* Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Явич Л.Р. – М.: Связь, 1971. – 388 с.
6. *Зелях Э.В.* Двухполюсники и четырехполюсники : учеб. пособ. / Зелях Э.В. – Одесса: Изд. ОЭИС им. А.С. Попова, 1976. – 128 с.