



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОЙ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ Y-ЦИРКУЛЯТОРА

Е.А. Дрыгина, курсант,
leno4ka-drygina@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

На основе собранной лабораторной установки проведены экспериментальные исследования частотной зависимости модулей S-параметров матрицы рассеяния Y-циркулятора. Значения коэффициентов отражения от каждого из плеч Y-циркулятора и развязки между его плечами соответствуют известным нормам данных параметров. Отличие полученных в эксперименте значений прямых потерь от теоретических данных объясняется невозможностью учета всех потерь в собранной лабораторной установке и неидеальностью контрольно-измерительной аппаратуры. Созданная лабораторная установка позволяет отрабатывать навыки проведения измерений модулей S-параметров матрицы рассеяния Y-циркулятора и исследовать характер их зависимости от частоты в рамках лабораторного практикума при изучении дисциплины «Антенны и устройства СВЧ» курсантами специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Y-циркулятор, S-параметры, измерительная линия, калибровочная характеристика, коэффициент стоячей волны (КСВ), прямые потери, развязка между плечами

При решении задач направленной передачи энергии в СВЧ-технике находят применение невзаимные многополюсники, примером которых является Y-циркулятор. Благодаря компактности конструкции таких устройств они используются в широком диапазоне длин волн – от миллиметровых до метровых [1]. Y-циркулятор применяется в качестве развязывающего вентиля в составе отражательных усилителей СВЧ-диапазона (например, квантовые парамагнитные усилители и параметрические усилители на полупроводниковых диодах), в составе ферритового антенного переключателя радиолокационных станций (РЛС) [2].

Теоретическое изучение свойств устройств СВЧ-диапазона курсантами специальности 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» происходит в рамках освоения дисциплины «Антенны и устройства СВЧ», что делает задачу экспериментального исследования основных параметров актуальной для закрепления полученных теоретических знаний на практике.

Целью данной работы является создание лабораторной установки по исследованию частотной зависимости прямых потерь, развязки и коэффициента отражения от плеч Y-циркулятора.

Для достижения этой цели были решены следующие частные задачи:

- проведен выбор контрольной измерительной аппаратуры в составе лабораторной установки;
- выбраны методы исследования;
- выполнено экспериментальное исследование частотной зависимости S-параметров волновой матрицы рассеяния Y-циркулятора;
- осуществлен анализ полученных экспериментальных данных.

Y-циркулятор может быть описан матрицей S-параметров, определяемой матричным уравнением (1) вида [3]:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1^- \\ \dot{U}_2^- \\ \dot{U}_3^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1^+ \\ \dot{U}_2^+ \\ \dot{U}_3^+ \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где \dot{U}_k^+ и \dot{U}_k^- – комплексные амплитуды падающей и отраженной волн в k -м плече Y-циркулятора.

Диагональные элементы $S_{kk}, k=1,2,3$ данной матрицы представляют собой комплексные коэффициенты отражения по напряжению от k -го плеча. Недиагональные элементы $S_{km}, k \neq m$ описывают коэффициенты передачи энергии в прямом и обратном направлениях. При $k=1, m=2; k=2, m=3; k=3, m=1$ элементы S_{km} описывают комплексные коэффициенты прямой передачи по напряжению между данными плечами. Модули этих коэффициентов носят название прямых потерь при передаче энергии между плечами. При $k=1, m=3; k=3, m=2; k=2, m=1$ элементы S_{km} описывают комплексные коэффициенты обратной передачи по напряжению между данными плечами. Модули этих коэффициентов называются развязкой между плечами.

В состав лабораторной установки для исследования S-параметров были включены:

- генератор высокочастотных сигналов Г4-129, работающий в диапазоне частот от 310 до 1200 МГц;
- микроамперметр Ф 195, работающий в диапазонах 0 – 500 нА и 0 – 100 мкА;
- измерительная линия, работающая в диапазоне частот 0,5 – 3 ГГц;
- Y-циркулятор ЦКВ-2.

Измерение КСВ проводилось с помощью измерительной линии Р1-17 [4] в диапазоне частот от 600 до 900 МГц с шагом 25 МГц. Выбор частотного диапазона для исследования ограничен снизу возможностями измерительной линии, сверху – рабочим диапазоном генератора. Для каждого значения частоты была измерена калибровочная характеристика. Структурная схема лабораторной установки для снятия калибровочных характеристик приведена на рис. 1. При снятии калибровочных характеристик в качестве нагрузки выступала стандартная короткозамкнутая нагрузка (И1-18).



Рисунок 1 - Структурная схема лабораторной установки по исследованию частотной зависимости модуля коэффициента отражения

Ниже для примера приведены результаты измерения калибровочной характеристики на частоте $f = 600$ МГц (табл. 1) и соответствующий ей график (рис. 2). Из приведенного графика видно, что калибровочная характеристика имеет квадратичную зависимость.

Измерения модуля коэффициента отражения от каждого из плеч Y-циркулятора проводились косвенно, по результатам измерения коэффициента стоячей волны (КСВ) в измерительной линии. При этом в качестве нагрузки (рис. 1) использовалось исследуемое

плечо Y-циркулятора, подключаемое к измерительной линии через коаксиальный переходник с 75 на 50 Ом с затуханием 6 дБ.

Таблица 1 – Результаты измерения калибровочной характеристики на частоте $f=600$ МГц

$I, \text{мкА}$	0,01	0,03	0,051	0,11	0,18	0,27	0,34	0,43
$x, \text{мм}$	135,8	145,8	153,8	162,8	171,8	180,8	189,8	198,8
$I, \text{мкА}$	0,5	0,59	0,65	0,69	0,72	0,75	0,76	
$x, \text{мм}$	207,8	216,8	225,8	234,8	243,8	252,8	261,8	

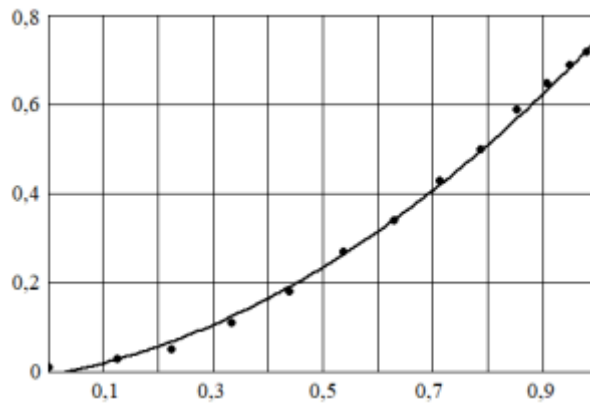


Рисунок 2 – Калибровочная характеристика для частоты $f=600$ МГц: по оси абсцисс отложены значения $\gamma = \sin(2\pi(x - x_0)/\lambda)$, по оси ординат - показания индикаторного прибора I в мкА

При подключении в качестве нагрузки каждого из плеч Y-циркулятора были измерены все максимумы и минимумы в распределении тока вдоль длинной линии. По их усредненным значениям α_{max} и α_{min} по графикам калибровочных характеристик были определены соответствующие им значения γ_{max} и γ_{min} . Параметры КСВ в измерительной линии были найдены как отношение $\gamma_{max}/\gamma_{min}$. Для примера в табл. 2 приведены результаты косвенных измерений КСВ для 1-го плеча Y-циркулятора.

Таблица 2 – Зависимость КСВ от частоты для 1-го плеча Y-циркулятора

$f, \text{МГц}$	600	625	650	675	700	725	750
K_{CB}	1.089	1.112	1.08	1.088	1.092	1.13	1.052
$f, \text{МГц}$	775	800	825	850	875	900	
K_{CB}	1.085	1.106	1.161	1.049	1.224	1.372	

На рис. 3 показан вид частотной зависимости КСВ в измерительной линии при исследовании отражения от первого (а), второго (б) и третьего (в) плеч Y-циркулятора.

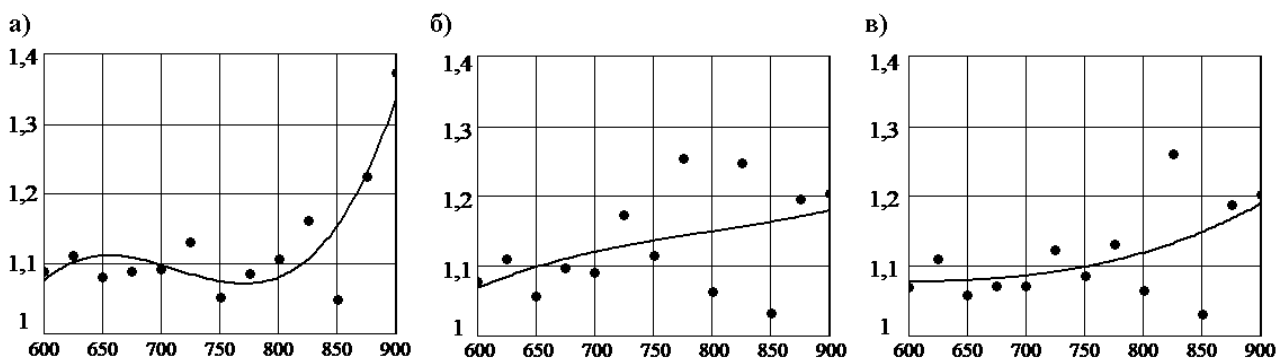


Рисунок 3 – Зависимость КСВ в измерительной линии от частоты для различных плеч Y-циркулятора: а – 1-е плечо; б – 2-е плечо; в – 3-е плечо

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие общие выводы:

- с ростом частоты значение КСВ в среднем увеличивается от 1,1 до 1,4;
- в диапазоне частот от 600 до 800 МГц КСВ практически не изменяется и не превышает значения 1,15;
- при использовании лабораторной установки в учебном процессе шаг по частоте должен быть выбран неравномерным (3 – 4 значения частоты в диапазоне от 600 до 800 МГц и 5 – 6 значений частоты в диапазоне от 800 до 1000 МГц).

Полученные результаты позволяют заключить, что указанный диапазон частот является частью рабочей области циркулятора, так как для современных коаксиальных Y-циркуляторов, работающих в диапазоне от 10 до 1875 МГц, КСВ не превышает 1,6 [5].

Далее производилось измерение прямых потерь в направлениях прямой передачи. Измерения выполнялись в два этапа. На первом этапе определяли показания индикатора измерительной линии I_0 без участия Y-циркулятора. Мощность, поступающая в первое из плеч прямой передачи, пропорциональна квадрату данного значения. Для исключения зависимости мощности от положения каретки детекторной секции в измерительной линии был реализован режим, близкий к режиму бегущей волны. Для этого использовалась стандартная согласованная 50-омная нагрузка НК КСВ 1,06. На втором этапе аналогично было измерено показание I индикатора измерительной линии, подключенной со стороны входа ко второму плечу прямой передачи. Схема лабораторной установки для измерения прямых потерь приведена на рис. 4.

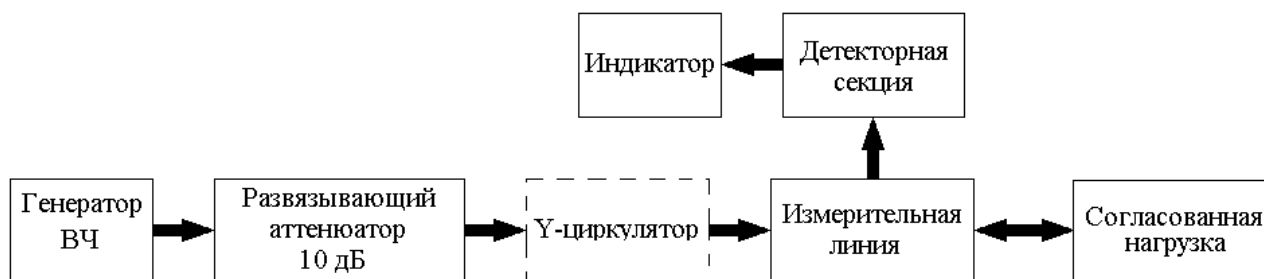


Рисунок 4 – Структурная схема лабораторной установки по исследованию частотной зависимости прямых потерь

Величина прямых потерь оценивалась по выражению (2):

$$L_{\text{пр}} = 20\lg(I/I_0) + 6 - L_{\text{каб1}} - L_{\text{каб2}}, \text{дБ} \quad (2)$$

где учтено затухание в 6 дБ от применения коаксиального перехода и затухания $L_{\text{каб1}}$ и $L_{\text{каб2}}$ сигналов в коаксиальных кабелях, соединяющих генератор с циркулятором и циркулятор с входом измерительной линии соответственно. Затухание $L_{\text{каб2}}$ измерялось дополнительно по разности показаний индикатора в схеме рис. 4 без циркулятора при использовании каждого из коаксиальных кабелей. Затухание $L_{\text{каб1}}$ оценивалось на основе предполагаемых характеристик кабеля, в частности погонного затухания. На рис. 5 приведены результаты измерения прямых потерь на различных частотах выбранного диапазона.

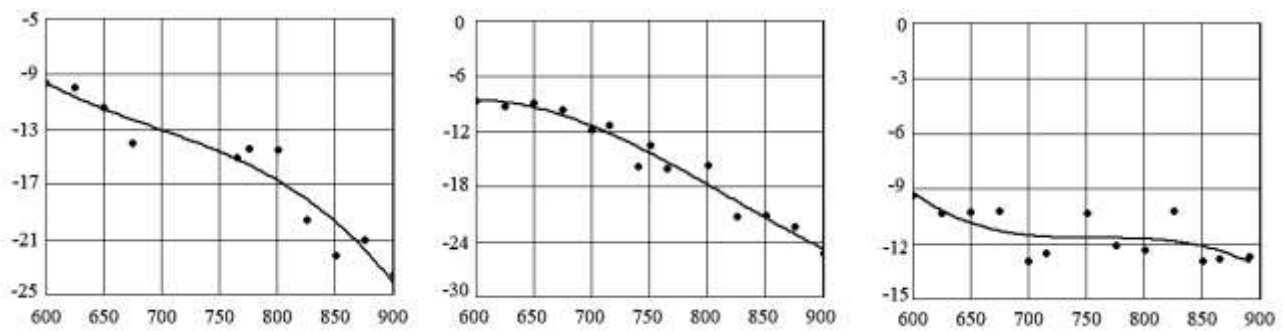


Рисунок 5 – Зависимость прямых потерь от частоты для различных направлений передачи в Y-циркуляторе: а - 1→2; б – 2→3; в – 3→1

Анализ полученных частотных зависимостей прямых потерь позволяет заключить, что с ростом частоты прямые потери достаточно быстро возрастают. Значения прямых потерь на частоте 600 МГц для всех трех направлений передачи оказались примерно одинаковыми. Существенное отличие этих значений от теоретических данных для современных коаксиальных Y-циркуляторов (для диапазона частот от 10 до 1875 МГц прямые потери составляют от 0,3 дБ до 1,2 дБ) [5] можно объяснить тем, что в выражении (2) учтены потери не для всех использованных в лабораторной установке переходов и не известны истинные параметры коаксиальных кабелей, которые при длительной эксплуатации могут отклоняться от нормы. Дополнительной причиной может быть непостоянство мощности генератора при изменении нагрузки (в опытах с циркулятором и без него).

На заключительном этапе было проведено измерение развязки в направлениях обратной передачи по методике, использованной для оценки прямых потерь. На рис. 6 приведены результаты измерения развязки между плечами на различных частотах выбранного диапазона.

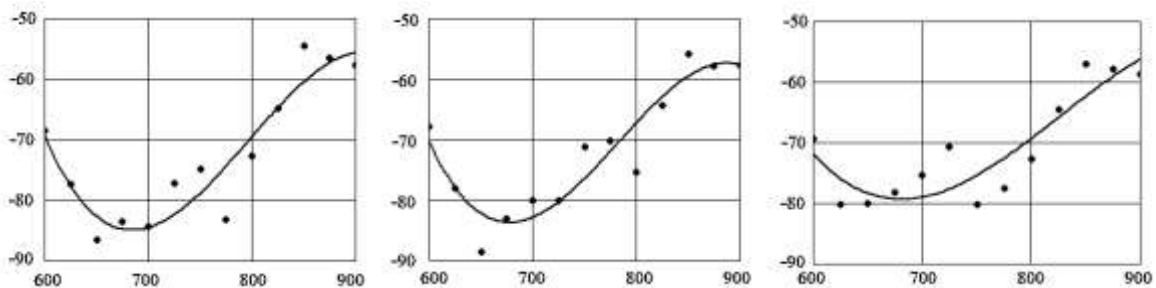


Рисунок 6 – Зависимость развязки от частоты для различных направлений передачи в Y-циркуляторе: а - 2→1; б – 3→2; в – 1→3

Исходя из полученных значений развязки, можно сделать вывод, что во всех трех случаях примерно на одной и той же частоте (порядка 680 МГц) наблюдается наилучшая развязка порядка -80 дБ, а при отклонении от данной частоты развязка уменьшается. Полученное значение развязки существенно превосходит теоретические данные к современным коаксиальным Y-циркуляторам (для диапазона частот от 10 до 1875 МГц максимальная развязка составляет от 14 до 30 дБ) [5].

Таким образом, созданная лабораторная установка позволяет отрабатывать навыки проведения измерений модулей S-параметров матрицы рассеяния Y-циркулятора и исследовать характер их зависимости от частоты в рамках лабораторного практикума при изучении дисциплины «Антенны и устройства СВЧ». Однако получаемые на практике значения прямых потерь сильно отличаются от типовых, что не позволяет сделать вывод об унитарности матрицы рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милованов, О.С. Техника сверхвысоких частот: учеб. пособие для вузов / О.С. Милованов, Н.С. Собенин. – Москва: Атомиздат, 1980. – 464 с.
2. Лебедев, И.В. Техника и приборы СВЧ: учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы» / И.В. Лебедев; под ред. акад. Н.Д. Девяткова. – Москва: Высшая школа, 1980. – 440 с.
3. Абрамов, В.П. Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах / В.П. Абрамов, В.А. Дмитриев, С.А. Шелухин. – Москва: Радио и связь, 1989. – 200 с.
4. Линии измерительные на коаксиальный тракт сечений 7/3 мм P-17, P-18. Тех. описание, инструкция по эксплуатации и паспорт. – 43с.
5. Coaxial Circulator [Электронный ресурс]. URL: https://www.uiy.com/Coaxial_Circulator/CoaxialCirculator,HighPower,RF/Microwave,N,SMA,7/16,L29,VHF,UHF (дата обращения: 25.04.2018)

EXPERIMENTAL STUDY

S-PARAMETROV OF THE WAVE MATRIX OF DISPERSION Y-TSIRKULYATORA

E. A. Drygina, cadet, leno4ka-drygina@mail.ru

Kaliningrad State Technical University
BALTIC FISHING FLEET STATE ACADEMY

In work on the basis of assembled laboratory installation pilot experimental investigations of a frequency dependence of dispersion matrix elements absolute values for Y-circulator are conducted in this work. Values of reflection coefficient for each of Y-circulator shoulders and isolation between them are corresponds to the standard requirements. The difference in the direct losses experimental values and its requirements is explained by impossibility of all laboratory installation losses accounting and unideality of the control instrumentation. The created laboratory installation allows to carry out measurements of Y-circulator dispersion matrix absolute values and to investigate their frequency dependence during studying discipline "Antennas and SHF devices" by cadets of specialty "Technical Operation of the Transport Radio Equipment".

Y-circulator, S-parameters, the measuring line, the calibration characteristic, SWR, direct losses, isolation