

УДК 621.396.1

К.Д. Зайков, А.С. Аникин, Ф.Н. Захаров, К.А. Ярков, В.И. Вебер

Методика измерения матрицы рассеяния многопортового устройства двухпортовым векторным анализатором цепей

При проектировании приёмопередающих трактов возникает задача моделирования ожидаемых характеристик отдельных составных частей проектируемых трактов. Наиболее универсальной и удобной для описания СВЧ-устройств является матрица рассеяния. Использование двухпортовых и четырёхпортовых векторных анализаторов цепей позволяет измерить параметры большинства разрабатываемых СВЧ-устройств (делители, фильтры, усилители и т.д.). Часто перед инженером стоит задача измерить двухпортовым векторным анализатором цепей параметры многопортового устройства (портов больше 4) для последующего расчёта матрицы рассеяния каскадного соединения смежных аналоговых блоков. Целью данной статьи является представление методики проведения измерения матрицы рассеяния многопортовых устройств двухпортовым векторным анализатором цепей с последующим каскадированием для получения матрицы рассеяния многоканального итогового устройства (многоканальный радиотракт). Достижение поставленной цели позволяет обеспечить необходимый базис для синтеза отечественного программного обеспечения для проектирования СВЧ-трактов с точки зрения системного анализа.

Ключевые слова: методика измерения S -параметров, измерение S -параметров, матрица рассеяния, векторный анализатор цепей, каскадирование СВЧ-устройств.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-48-53

При проектировании приёмопередающих трактов возникает задача моделирования ожидаемых характеристик при заданных технических требованиях к отдельным составным частям тракта. Под составными частями понимаем блоки усиления, фильтрации, преобразования частоты и т.д. Каждый блок, в основном, состоит из двухпортовых устройств (например, усилитель, фильтр, фазовращатель и т.д.), реже трёхпортовых и четырёхпортовых устройств (например, смеситель и направленный ответвитель) [1, 2]. Устройства с большим количеством портов используются крайне редко, как правило, это ключи, переключатели, делители мощности. Для описания таких устройств в современных инженерных расчётах, САПР и технической документации принято использовать матрицы параметров.

Наиболее универсальной и удобной для описания СВЧ-устройств является матрица рассеяния (S) [3]. Данная матрица связывает входные и выходные порты устройства на единичные воздействия в виде падающих волн. При моделировании приёмопередающих трактов необходимо знать результирующую матрицу рассеяния во всем диапазоне интересующих частот, что позволяет оценить взаимное влияние элементов тракта, неравномерность частотной характеристики в полосе пропускания и т.д.

Большинство алгоритмов было разработано в XX в., в настоящее время в журналах публикуют модифицированные методы [4, 5], которые в ряде задач уменьшают вычислительную сложность.

В современных САПР реализован расчёт матриц рассеяния каскадного соединения смежных аналоговых блоков. Однако в справочной документации к САПР отсутствуют сведения о методике расчета либо косвенно отмечается подход к расчёту резу-

лирующей матриц рассеяния [6–8]. Среди отечественных САПР, в которых был реализован расчёт матриц рассеяния каскадного соединения смежных аналоговых блоков, методика расчета не найдена.

Как правило, многоканальные радиочастотные тракты могут быть декомпозированы на простые составные части/блоки. Данные блоки изготавливаются из простых СВЧ-устройств – усилителей, фильтров, аттенуаторов, смесителей, характеристики которых, как правило, могут быть измерены двухпортовым векторным анализатором цепей (для трёх- и четырёхпортовых устройств используют четырёхпортовые векторные анализаторы цепей).

Использование двухпортовых и четырёхпортовых векторных анализаторов цепей позволяет измерить характеристики большинства разрабатываемых СВЧ-устройств. Такие векторные анализаторы цепей находятся в свободной продаже и производятся серийно [9, 10].

Для измерения характеристик устройств с большим количеством портов изготавливаются штучные векторные анализаторы цепей с произвольным чётным количеством портов. Данные приборы изготавливаются на заказ.

В связи с этим перед инженером может возникнуть задача измерить двухпортовым векторным анализатором цепей многопортовое устройство или многопортовый блок для последующего расчёта матрицы рассеяния каскадного соединения смежных аналоговых блоков.

Целью данной статьи является изложение методики проведения измерения матрицы рассеяния многопортового устройства двухпортовым векторным анализатором цепей с последующим каскадированием для получения матрицы рассеяния многоканального устройства (многоканальный радиотракт).

Постановка задачи

Наиболее распространенный метод каскадирования рассматриваемый в литературе метод блочных **S**-матриц. Для описания данного метода рассмотрим обобщенную схему каскадного соединения двух многополюсников (рис. 1).

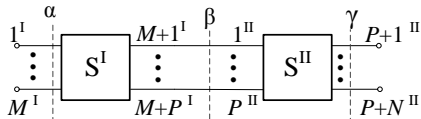


Рис. 1. Обобщенная структурная схема каскадного соединения двух многополюсников

Каждый из многополюсников имеет группу входов, не участвующих в соединении (у первого многополюсника число таких входов равно *M*, у второго *N*), и группу соединяемых входов, число которых равно *P* (см. рис. 1). Такое представление матриц называется блочным [3]. Для определения результирующей матрицы рассеяния соединения многополюсников необходимо применять определенную нумерацию входов. У многополюсника I нумеруются все свободные входы (группа входов *α*), а затем все выходы этого многополюсника, участвующие в соединении (группа входов *β*). У многополюсника II нумеруются все входы, участвующих в соединении (аналогично порядку выходных портов многополюсника I), а затем все свободные выходные порты (группа входов *γ*).

Используя указанную нумерацию, матрицы **S**^I и **S**^{II} можно разделить на четыре блока:

$$S^I = \begin{bmatrix} S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\beta} \\ S_{\beta\alpha} & S_{\beta\beta}^I \end{bmatrix}, \quad S^{II} = \begin{bmatrix} S_{\beta\beta}^{II} & S_{\beta\gamma} \\ S_{\gamma\beta} & S_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где **S**_{αα} и **S**^{II}_{ββ} – блочные матрицы, описывающие развязку входных портов первого и второго многополюсника соответственно; **S**_{βα} и **S**_{γβ} – блочные матрицы, описывающие прямую передачу (от входа к выходу) портов первого и второго многополюсника соответственно; **S**_{αβ} и **S**_{βγ} – блочные матрицы, описывающие обратную передачу (от выхода к входу) портов первого и второго многополюсников соответственно; **S**^I_{ββ} и **S**_{γγ} – блочные матрицы, описывающие развязку выходных портов первого и второго многополюсников соответственно.

Результирующая блочная матрица рассеяния представлена в виде

$$S^\Sigma = \begin{bmatrix} S_{\alpha\alpha}^\Sigma & S_{\alpha\gamma}^\Sigma \\ S_{\gamma\alpha}^\Sigma & S_{\gamma\gamma}^\Sigma \end{bmatrix},$$

где блочные матрицы будут вычисляться по формулам [3]:

$$S_{\alpha\alpha}^\Sigma = S_{\alpha\alpha} + S_{\alpha\beta} \left(E - S_{\beta\beta}^{II} S_{\beta\beta}^I \right)^{-1} S_{\beta\beta}^{II} S_{\beta\alpha},$$

$$S_{\alpha\gamma}^\Sigma = S_{\alpha\beta} \left(E - S_{\beta\beta}^{II} S_{\beta\beta}^I \right)^{-1} S_{\beta\gamma},$$

$$S_{\gamma\alpha}^\Sigma = S_{\gamma\beta} \left(E - S_{\beta\beta}^I S_{\beta\beta}^{II} \right)^{-1} S_{\beta\alpha},$$

$$S_{\gamma\gamma}^\Sigma = S_{\gamma\gamma} + S_{\gamma\beta} \left(E - S_{\beta\beta}^I S_{\beta\beta}^{II} \right)^{-1} S_{\beta\beta}^I S_{\beta\gamma}, \quad (2)$$

где **E** – единичная матрица.

Как видно из формулы (1), рис. 1 и описания представления блочных матриц, для того чтобы корректно использовать формулу (2) для получения матрицы рассеяния двух смежно соединенных СВЧ-устройств, необходимо использовать описанную выше нумерацию портов [3].

Обзор литературы и документации к векторным анализаторам цепей показал, что отсутствует описание методики измерения матрицы рассеяния многопортовых устройств двухпортовым векторным анализатором цепей с последующим каскадированием [11–13]. Исключение составляет методика объединения измерений, реализованная в зарубежном коммерческом приложении AWR Design Environment [8]. Данное приложение позволяет сформировать матрицу рассеяния многопортового устройства по измеренным матрицам рассеяния отдельных пар портов. В качестве недостатка данного приложения можно выделить отсутствие описания методики измерения, без которой инженер может пропустить важные *S*-параметры или дублировать ранее проведенные измерения. А также к недостаткам стоит отнести отсутствие описания алгоритма каскадирования смежных СВЧ-устройств, что затрудняет анализ полученных результатов с целью определения их достоверности. Среди отечественных САПР подобных приложений не существует.

Методика измерения матрицы рассеяния многопортового устройства

Порядок измерения матрицы рассеяния аналоговых трактов рассмотрим на следующем примере.

Предположим, измеряемое устройство имеет *M* входных портов и *P* выходных портов. Общее количество портов аналогового тракта составляет *N = M + P*. Нумерация входных и выходных портов должна быть сквозной. Таким образом, аналоговый тракт представляет собой *N*-портовое устройство (рис. 2).



Рис. 2. Пример устройства для измерения матрицы рассеяния

Перед проведением измерений с помощью двухпортового векторного анализатора цепей следует выполнить его калибровку. Порядок измерения матрицы рассеяния для двухпортового векторного анализатора цепей следующий:

1. Первый порт векторного анализатора цепей (далее порт I) подключить к первому порту измеряемого устройства, а второй порт анализатора (далее порт II) – ко второму порту этого же устройства. Остальные порты устройства подключить к согласованной нагрузке. После подключения указанных портов выполнить измерения матрицы рассеяния в интересующем диапазоне частот. Файл с результатами измерений матрицы рассеяния сохранить с именем «1_*.s2p». Примечание: Символом «*» обозначено имя файла. Файлы формата *.s2p должны быть сохранены в отдельную папку для конкретного устройства.

2. Второй порт устройства отключить от порта II векторного анализатора цепей. Затем порт II подключить к третьему порту устройства. Остальные порты устройства нагрузить согласованной нагрузкой. Провести измерения, файл сохранить с именем «2_*.s2p».

3. Этап 2 повторить до N-го порта устройства, включительно.

4. Порт I подключить ко второму порту устройства, а порт II подключить к третьему порту устройства. Остальные порты устройства нагрузить согласованной нагрузкой. После подключения указанных портов выполнить измерения матрицы рассеяния в интересующем диапазоне частот. Файл с результатами измерений матрицы рассеяния сохранить с именем «N_*.s2p».

5. Повторить п. 3 с сохранением порядка нумерации файлов формата *.s2p.

6. Повторить пп. 4, 5 для последовательности подключений порта I векторного анализатора цепей с третьего до N–1 порта измеряемого устройства (аналогового тракта).

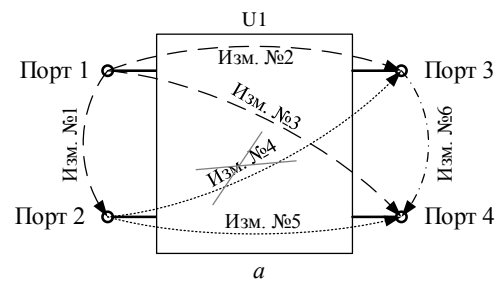
Общее количество файлов формата *.s2p с результатами измерений должно быть равно $K = 0,5 \cdot N \cdot (N - 1)$.

Для того чтобы рассчитать матрицу рассеяния каскадно соединенных СВЧ-устройств, при условии, что измерение многопортовых устройств было произведено по описанной выше методике, была разработана и зарегистрирована программа ЭВМ [14].

Данная программа предназначена для считывания файлов S-параметров в формате Touchstone, измеренных двухпортовым векторным анализатором цепей, и расчёта результирующей матрицы рассеяния каскадного соединения СВЧ-устройств по алгоритму, описанному в [3].

В программе реализована возможность пропускать измерения. Инженер вправе решить, какие измерения можно пропустить (например, из-за большой развязки портов), при пропуске измерения должен быть пропущен соответствующий порядковый номер наименования файла. Пример пропуска и наименования файлов в папке представлен на рис. 3. На рисунке показана ситуация, когда пропущено измерение № 4 в связи с пренебрежимо малым значением модуля S-параметра между 2-м и 3-м порта-

ми. Измерения в папке должны быть пронумерованы так, как приведено на рис. 3, б.



Имена файлов	№ измерения
1_U1.s2p	1
2_U1.s2p	2
3_U1.s2p	3
4_U1.s2p	4
5_U1.s2p	5
6_U1.s2p	6

б

Рис. 3. Пример пропуска измерения четвертого измерения: а – схема, б – наименования файлов измерений

Верификация методики

Для верификации методики были проведены измерения S-параметров двух делителей мощности ДМС2А-26-13р [15] и их каскадного соединения. Измерения производились на векторном анализаторе цепей «Planag» серии «Кобальт С1220» с предварительной калибровкой. Расчет проводился в программе, изложенной в [14].

Собранная схема из делителей представлена на рис. 4. Вычисленные значения S-параметров сопоставлялись с измеренной матрицей рассеяния итогового устройства по формуле

$$\Delta S_{i,j} = \left| S_{i,j} [\text{дБ}] - S_{i,j}^* [\text{дБ}] \right|, \quad (3)$$

где $S_{i,j}$ – рассчитанное значение S-параметров итогового устройства между j и i портами; $S_{i,j}^*$ – измеренное значение S-параметров итогового устройства между j и i портами.

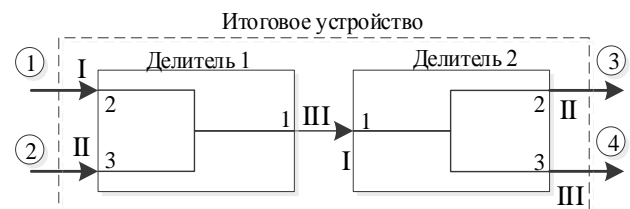


Рис. 4. Исследуемая схема

На рис. 4 арабские цифры без круга – нумерация портов устройства согласно Datasheet, римские цифры – порядок нумерации портов при измерении и расчёте, арабские цифры в круге – нумерации портов итогового устройства.

Усреднённые значения, вычисленные по формуле (3), представлены в таблице. Для примера на рис. 5 приведены сравнения вычисленных и измеренных значений S-параметров.

Усреднённые значения абсолютной разницы измеренной и вычисленной матриц рассеяния устройства

$\Delta S_{i,j}$, дБ		Номер порта			
		1	2	3	4
Номер порта	1	0,209	0,198	0,220	0,151
	2	0,199	0,191	0,088	0,127
	3	0,227	0,079	0,193	0,198
	4	0,155	0,123	0,199	0,272

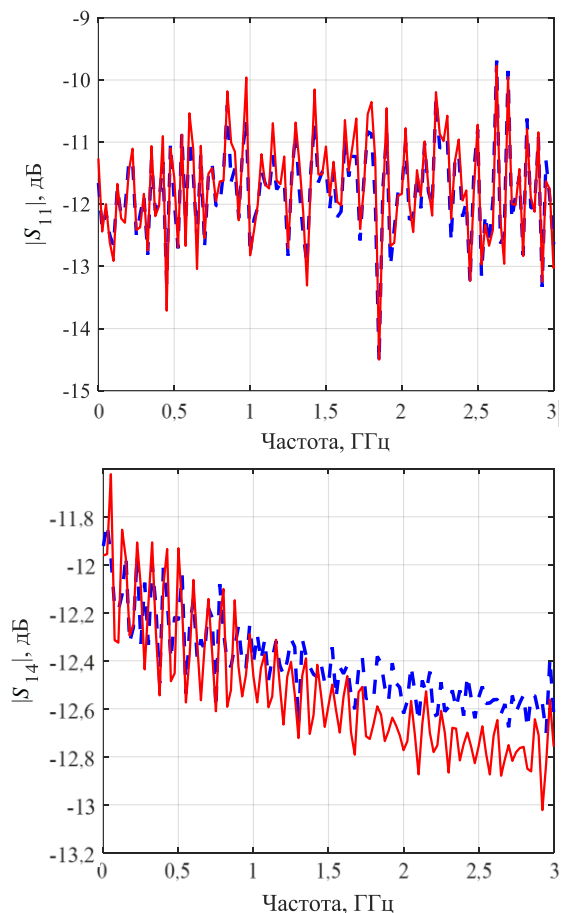


Рис. 5. Сравнение измеренных и рассчитанных S -параметров схемы, представленной на рис. 3 (сплошная линия – расчётные значения, пунктирная – измеренные значения)

Заключение

По данным из таблицы и рис. 5 видно, что результат вычисления итоговой матрицы совпадает с измеренными значениями с незначительной расходимостью, вызванной, главным образом, фазовой нестабильностью СВЧ-кабелей.

Достижение поставленной цели позволяет обеспечить необходимый базис для синтеза отечественного программного обеспечения для проектирования СВЧ-трактов с точки зрения системного анализа.

Описанная методика применима и для четырехпортового векторного анализатора цепей с учетом того, что вместо порта II используется группа портов II–IV векторного анализатора цепей.

Работа выполнена в рамках реализации государственного проекта Минобрнауки «Программа

стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Литература

1. Mini Circuits – мировой лидер в области радиочастотных и микроволновых компонент [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/>, свободный (дата обращения: 20.09.2022).
2. Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/ru/index.html> (дата обращения: 20.09.2022).
3. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высш. школа, 1981. – 295 с.
4. A New Method to Calculate Cascaded S-Parameters. 2018 IEEE 27th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8534261> (дата обращения: 20.09.2022).
5. Extended S-parameters for imperfect test ports / J. Hoffmann, M. Wollensack, J. Ruefenacht, M. Zeier // Metrologia. – 2015. – Vol. 52, No. 1. – P. 121–129. DOI: 10.1088/0026-1394/52/1/121
6. MathWorks – создатели MATLAB и Simulink. Объединение S-параметров для формирования каскадной сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://se.mathworks.com/help/rf/ref/cascadeparams.html>, свободный (дата обращения: 20.09.2022).
7. Qucs. Work book // QUCS Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://qucs.sourceforge.net/docs/workbook_ru.pdf, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
8. Combine S-Parameters // kb.awr.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kb.awr.com/display/awrutil/Combine+S-Parameters>, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
9. Анализаторы цепей векторные // PLANAR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://planarchel.ru/catalog/analizatory_tsepey_vektornye/, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
10. Векторные анализаторы цепей // chipdip [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/search?searchtext=векторные+анализаторы+цепей>, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
11. Анализатор цепей векторный. Руководство по эксплуатации. Технические характеристики. РЭ 6687-143-21477812–2018. Версия 22.1 // PLANAR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.planarchel.ru/uploadmedialibrary/00b/asmyfwgydtzo5ao4l0uql711c2m6nuh/OM_Sseries_Part1_ver22.3.pdf, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
12. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. – М.: МЭИ, 2018. – 500 с.
13. S-Parameters Techniques for faster, More Accurate Network Design. Agilent EEsof EDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.phys.hawaii.edu/~idlab/taskAndSchedule/5989-9273EN.pdf>, свободный (дата обращения: 21.09.2022).
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021669469 РФ. Программа расчёта матрицы рассеяния каскадного соединения СВЧ-устройств с произвольным количеством портов / К.Д. Зайков, А.С. Аникин, Ф.Н. Захаров; заявитель ФГБОУ ВО «Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники». – № 2021668682; заявл. 24.11.2021; опубл. 29.11.2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=D1B2AF4D-3F87-4A8F-9354-A18A360BD085>, свободный (дата обращения: 21.09.2022).

15. Делители мощности – элементы СВЧ-тракта – Микран // АО «НПФ «Микран» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.micran.ru/productions/IIS/accessory/divider/divider/>, свободный (дата обращения: 21.09.2022).

Зайков Кирилл Денисович

Аспирант каф. радиотехнических систем (РТС), м.н.с. НИИ РТС Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-161-04-82
Эл. почта: kirill.d.zaikov@tusur.ru

Аникин Алексей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. РТС, с.н.с. НИИ РТС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9747-3266
Тел.: +7 (382-2) 41-38-89
Эл. почта: anikinas@main.tusur.ru

Захаров Федор Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. РТС, зав. лаб. распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7751-557X
Тел.: +7 (382-2) 41-38-89
Эл. почта: zakharovfn@main.tusur.ru

Ярков Кирилл Алексеевич

Аспирант каф. РТС, м.н.с. НИИ РТС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-38-89
Эл. почта: kirill.a.yarkov@tusur.ru

Вебер Владислав Игоревич

Аспирант каф. РТС ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-38-89
Эл. почта: vladislav.i.veber@tusur.ru

Zaikov K.D., Anikin A.S., Zakharov F.N., Yarkov K.A., Veber V.I.

Methodology for Measuring the Scattering Matrix of a Multiport Device with a Two-Port Vector Network Analyzer

When designing transceiver paths, the problem of modeling the characteristics of individual components arises. The most universal and convenient for describing the microwave device is the scattering matrix. The use of two-port and four-port vector network analyzers allows to adjust the parameters of most of the developed microwave devices (dividers, filters, amplifiers, etc.). Often, the task is to use a two-port vector network analyzer to measure the parameters of a multi-port device (ports more than 4) to solve the problem of calculating the scattering matrix of the bone connection of adjacent industrial units. The purpose of this article is to compile a methodology for measuring the scattering of multiport devices with a two-port vector network analyzer with a sequence to obtain a measurement of a multi-channel final device (multi-channel

radio path). Achieving this goal allows us to provide the necessary basis for the synthesis of domestic software used to develop microwave paths from the point of view of an overview of system analysis.

Keywords: S-parameter measurement technique, S-parameter measurement, scattering matrix, vector network analyzer, microwave device cascading.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-48-53

References

1. Mini Circuits – mirovoy lider v oblasti radiochastotnykh i mikrovolnovnykh komponent [Mini Circuits is the world leader in RF and microwave components]. Available at: <https://www.minicircuits.com>, free (Accessed: September 20, 2022) (in Russ.).
2. Analog Devices. Available at: <https://www.analog.com/ru/index.html>, free (Accessed: September 20, 2022).
3. Sazonov D.M. Ustroystva SVCH [*Microwave Devices*]. Moscow, Higher School Publ, 1981, 295 p. (in Russ.).
4. A New Method to Calculate Cascaded S-Parameters. 2018 IEEE 27th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and System. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8534261>, free (Accessed: September 20, 2022).
5. Hoffmann J., Wollensack M., Ruefenacht J., Zeier M. Extended S-parameters for imperfect test ports. *Metrologia*, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 121–129. DOI: 10.1088/0026-1394/52/1/121
6. MathWorks – Creators of MATLAB and Simulink. Combining S-parameters to form a cascade network. Available at: <https://se.mathworks.com/help/rf/ref/cascadesparams.html>, free (Accessed: September 20, 2022).
7. Qucs. Work book. Available at: https://qucs.sourceforge.net/docs/workbook_ru.pdf, free (Accessed: September 20, 2022) (in Russ.).
8. Combine S-Parameters. Available at: <https://kb.awr.com/display/awrutil/Combine+S-Parameters>, free (accessed: September 21, 2022).
9. Analizatory tsepey vektornyye [Vector circuit analyzers] Available at: https://planarchel.ru/catalog/analizatory_tsepey_vektornyye/, free (Accessed: September 21, 2022) (in Russ.).
10. Vektornyye analizatory tsepey [Vector network analyzers] Available at: https://www.chipdip.ru/search?search_text=vector+analyzers+circuits, free (Accessed: September 21, 2022) (in Russ.).
11. Analizator tsepey vektornyy. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Tekhnicheskiye kharakteristiki. RE 6687-143-21477812–2018. Versiya 22.1 [Vector circuit analyzer. Manual. Specifications. RE 6687-143-21477812–2018. Version 22.1] Available at: https://www.planarchel.ru/uploadmedia-library/00b/asmyfwgdytzo5ao410uq1711c2m6nuih/OM_Sseries_Part1_ver22.3.pdf, free (Accessed: September 21, 2022) (in Russ.).
12. Khibel M. Osnovy vektornogo analiza tsepey [*Fundamentals of vector circuit analysis*], Moscow, MPEI, 2018, 500 p. (in Russ.).
13. S-Parameters Techniques for faster, More Accurate Network Design. Agilent EEsof EDA. Available at: <https://www.phys.hawaii.edu/~idlab/taskAndSchedule/5989-9273EN.pdf>, free (Accessed: September 21, 2022).
14. Zaikov K.D., Anikin A.S., Zakharov F.N. Programma rascheta matrity raseyaniya kaskadnogo soyedineniya SVCh-ustroystv s proizvolnym kolichestvom portov [The program for calculating the scattering matrix of a cascade connection of microwave devices with an arbitrary number of ports] Certificate of state registration of the computer program

No. 2021669469, 2021, Available at: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=D1B2AF4D-3F87-4A8F-9354-A18A360BD085>, free (Accessed: September 21, 2022) (in Russ.).

15. Deliteli moshchnosti – Elementy SVCh-trakta [Power dividers – Elements of the microwave path – JSC «Mikran»] Available at: <https://www.micran.ru/productions/IIS/accessory/divider/divider/>, free (Accessed: September 21, 2022) (in Russ.).

Kirill D. Zaikov

Postgraduate student, Department of Radio Engineering Systems (RES), Junior researcher of Research Institute (RI) RES, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-161-04-82
Email: kirill.d.zaikov@tusur.ru

Aleksei S. Anikin

Candidate of Science in Engineering, Department of RES, Senior researcher of Research Institute of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-9747-3266
Phone: +7 (382-2) 41-38-89
Email: anikinas@main.tusur.ru

Fedor N. Zakharov

Candidate of Science in Engineering,
Assistant Professor Department of RES,
Head of Radio Wave Propagation Laboratory,
Research Institute of Radio Engineering TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0001-7751-557X
Phone: +7 (382-2) 41-38-89
Email: zakharovfn@main.tusur.ru

Kirill A. Yarkov

Postgraduate student, Department of RES,
Junior researcher of RI RES, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: + 7 (382-2) 41-38-89
Email: kirill.a.iarkov@tusur.ru

Vladislav I. Veber

Postgraduate student Department of RES, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-38-89
Email: vladislav.i.veber@tusur.ru