

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33



Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования

Евгений Алексеевич Ищенко¹✉, kursk1998@yandex.ru
 Юрий Геннадьевич Пастернак¹, pasternakyg@mail.ru
 Владимир Андреевич Пендюрин², infonpp-acc.ru@yandex.ru
 Дмитрий Константинович Проскурин¹, pdk@vgasu.vrn.ru
 Сергей Михайлович Фёдоров¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Воронежский государственный технический университет,
 Воронеж, 394006, Российская Федерация

²АО НПП «Автоматизированные системы связи»,
 Воронеж, 394062, Российская Федерация

Аннотация: В данной статье исследуется возможность использования схемотехнических форматов описания радиокомпонентов для применения в задачах электродинамического моделирования. Исследование проводилось на примере управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла для коммутации узлов, которого применялись SPICE-модели эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей. Также рассматривалась возможность использования альтернативного формата описания радиоэлектронных компонентов – Touchstone-файлы. Полученные результаты иллюстрируются графиками матриц рассеяния, а также эквивалентными схемами и SPICE-кодом. Полученные результаты могут быть востребованы при создании конструкций, совмещающих активные нелинейные радиокомпоненты и СВЧ-устройства.

Ключевые слова: эквивалентные схемы, SPICE, Touchstone, МЭМС-ключи, pin-диоды, метаматериал, электродинамическое моделирование

Ссылка для цитирования: Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Проскурин Д.К., Фёдоров С.М. Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 21–33. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33

Equivalent Circuits Application of Pin-Diodes and MEMS-Keys in Electrodynamic Modeling Problems

Eugene Ishchenko¹✉, kursk1998@yandex.ru
 Yuri Pasternak¹, pasternakyg@mail.ru
 Vladimir Pendyurin², infonpp-acc.ru@yandex.ru
 Dmitriy Proskurin¹, pdk@vgasu.vrn.ru
 Sergey Fedorov¹, fedorov_sm@mail.ru

¹Voronezh State Technical University,
 Voronezh, 394006, Russian Federation

²Research and Development Enterprise “Automated Communication Systems”, JSC,
 Voronezh, 394062, Russian Federation

Abstract: This article studies the possibility of using circuit formats to describe radio components in electrodynamic modeling problems. The study was carried out on the example of a controlled metamaterial in the form of an electromagnetic crystal with SPICE-models of equivalent circuits of pin-diodes and MEMS-keys. Also, the possibility of using Touchstone files as an alternative format for describing radio-electronic components was considered. The obtained results are illustrated by scatter matrix plots, as well as equivalent circuits and SPICE code. Obtained results can be used for the design of structures that combine active nonlinear radio components and microwave devices.

Keywords: equivalent circuits, SPICE, Touchstone, MEMS-switches, pin-diodes, metamaterial, electrodynamic simulation

For citation: Ishchenko E., Pasternak Yu., Pendyuein V., Proskurin D., Fedorov S. Equivalent Circuits Application of Pin-Diodes and MEMS-Keys in Electrodynamic Modeling Problems. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4): 21–33. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-21-33

Введение

В современных СВЧ-устройствах и антеннах часто используются активные радиокомпоненты, которые позволяют обеспечить управление характеристиками электромагнитных волн. Чаще всего в таких задачах используются pin-диоды и микро-электромеханические системы (МЭМС). Однако при проведении исследований и разработки СВЧ-устройств часто используются методы электродинамического моделирования, поэтому возникает задача описания и использования pin-диодов и МЭМС-устройств в процессе моделирования всего устройства в целом. Большинство таких компонентов имеют два основных режима работы – включенный режим, когда обеспечивается замыкание цепи; и выключенный, когда реализуется максимальная изоляция. Для моделирования МЭМС-структур и pin-диодов на топологическом уровне применяются специальное программное обеспечение (ПО), которое несовместимо с ПО для электродинамического моделирования. Для разрешения этого несоответствия применяют эквивалентные схемы активных радиокомпонентов.

Существует исследование [1], в котором при моделировании вместо МЭМС-ключей используются сосредоточенные элементы. Однако авторы отмечают, что из-за сложности реализации модели и определения характеристик МЭМС-коммутатора схема была упрощена, чтобы обеспечить высокую скорость моделирования и определить базовые характеристики работы предложенной конструкции. В работе [2] авторы предлагают использовать pin-диоды для реализации активных антенн с возможностью управления характеристиками диаграммы направленности. В ходе моделирования была использована эквивалентная схема из сосредоточенных элементов, соответствующая pin-диоду в активном (включенном) режиме. При этом не приводится информации о том, как была описана модель и как учитывались характеристики pin-диода в выключенном режиме. В работе [3] применяется модель варикапа, которая заменяется емкостью, что приводит к снижению точности исследования, так как в варикапах, как и в любых радиодеталях при-

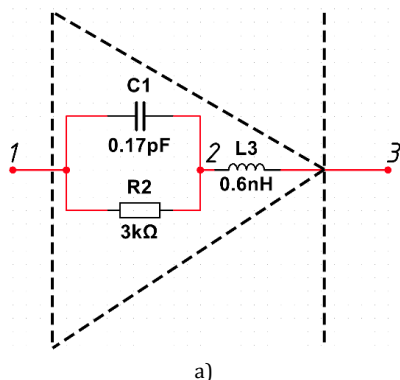
сутствуют паразитные эффекты, способные оказывать влияние на характеристики протекающих токов, а также электромагнитных волн. В работах [4, 5] авторы приводят подробные эквивалентные схемы pin-диодов для моделирования с последующим измерением параметров макета с установленными реальными pin-диодами. Результаты эксперимента подтверждают высокую точность и эффективность представленных эквивалентных схем для электродинамического моделирования активных СВЧ-устройств.

В данной работе представлено исследование возможности применения SPICE- и Touchstone-моделей (модель подразумевает описание радиокомпонента с учетом всех потерь и паразитных влияний на исследуемый объект) для электродинамического моделирования в DS CST Studio Suite 2023 управляемого метаматериала. Принцип работы метаматериала подробно описан в [6], но в общем он заключается в замыкании узлов электромагнитного кристалла для формирования отражающей поверхности и их размыкании для создания радио-прозрачной структуры.

Формирования SPICE- и Touchstone-моделей для задач электромагнитного моделирования

Рассмотрение форматов файлов моделей реальных электронных компонент начнем в хронологическом порядке их появления. Язык программирования для схем – SPICE (аббр. от англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) был разработан в Калифорнийском университете в Беркли в 1960-х гг. [7]. Особенностью данного языка является подробное описание эквивалентных схем с возможностью последующего математического моделирования. Базовым принципом построения SPICE-моделей является описание номиналов эквивалентных компонентов с привязкой к соединяющим узлам. Рассмотрим принцип построения SPICE-моделей, которые могут быть использованы в процессе моделирования и исследования различных схем. Для примера возьмем описание SPICE-модели pin-диода в выключенном режиме (рисунок 1), который приводится в работе [5]. Для описания

любой SPICE-модели требуется задать узлы, которые входят в схему для соединения компонентов. Отметим, что узел «0» всегда зарезервирован для заземления, а десятичные множители – в языке SPICE, согласно таблице 1.



a)

```
.SUBCKT PINDIODE OFF 1 3
C1 1 2 0.17PF
R2 1 2 3KOHMS
L3 2 3 0.6NH
.ENDS
```

b)

Рис. 1. Эквивалентная схема pin-диода (a) и его SPICE-код (b)

Fig. 1. Pin-Diode Equivalent Circuit (a) and its SPICE Code (b)

ТАБЛИЦА 1. Десятичные множители в языке SPICE

TABLE 1. Scale Factors of SPICE

Буква обозначения	Десятичный множитель	Приставка
T	10^{12} (e12)	Тера
G	10^9 (e9)	Гига
X или MEG	10^6 (e6)	Мега
K	10^3 (e3)	Кило
M	10^{-3} (e-3)	Милли
U	10^{-6} (e-6)	Микро
N	10^{-9} (e-9)	Нано
P	10^{-12} (e-12)	Пико
F	10^{-15} (e-15)	Фемто

Описание SPICE-модели (расширение файлов «.cir») всегда начинается с задания компонента с помощью команды «.SUBCKT». После этой команды, через табуляцию (TAB), следует название компонента или модели, а далее задаются номера входного (положительного) и выходного (отрицательного) контакта:

```
«.SUBCKT NAMECOMPONENTN+ N-»
```

Затем следует листинг описания всех эквивалентных элементов. Т. к. в нашем случае во всех задачах используются только пассивные компоненты, то будут приведены их описания, но важно отметить, что в SPICE могут быть описаны и активные компоненты (транзисторы, диоды и др.) [7].

Модель резистора имеет описание в виде:

```
«RNAME N1 N2 VALUE$OHMS»
```

Для удобства написания и последующей проверки схемы компонента рекомендуется делать сквозную нумерацию эквивалентных элементов, однако это не является обязательным, т. к. для SPICE приоритетными являются именно номера узлов ($N1$, $N2$) и номинал ($VALUE$; обозначения десятичных множителей (S) приведены в таблице 1).

Модель конденсатора имеет описание в виде:

```
«CNAME N+ N- VALUE$F<IC=INCOND>»
```

Особенностью описания конденсатора (и некоторых других элементов) является возможность задания начального значения напряжения или тока ($IC=INCOND$), но использование данной функции возможно только при описании полной активной схемы со строкой моделирования «.TRAN».

Модель индуктивности имеет описание в виде:

```
«LNAME N+ N- VALUE$H<IC=INCOND>»
```

Структура описания индуктивности является идентичной конденсатору. Стоит отметить, что указание названия величин не является обязательным (Омы – $OHMS$, Фарады – F , Генри – H), а для обозначения десятичного множителя может использоваться экспоненциальная запись (приводится во второй колонке таблицы 1 в скобках).

Завершается описание модели командой «.ENDS». Как и в любом языке программирования, в SPICE возможно внесение комментариев путем добавления знака «*» перед текстом. В качестве примеров SPICE-моделей далее будут приведены эквивалентные схемы pin-диодов и МЭМС-переключателей.

Из сказанного выше видно, что SPICE-модели представляют собой подробное описание радиоэлектронного компонента и позволяют создать его копию для последующего производства, что создает угрозу сохранению коммерческой тайны и экономическим интересам разработчика. По этой причине в 1984 г. Hewlett-Packard (HP) был предложен новый формат файлов описания радиоэлектронных компонент – Touchstone [8], который позже стал стандартом в векторных анализаторах цепей, а также в программном обеспечении Advanced Design System (компания Keysight). Развитием данного формата описания стали модели IBIS (аббр. от англ. Input/output Buffer Information Specification). По названию формата видно, что в таком файле описываются характеристики входных/выходных портов (коэффициенты отражения) и результаты работы компонента (коэффициенты передачи). Подобная запись позволяет держать в секрете конструкцию радиоэлектронного компонента, т. к. он представляется в виде «черного» ящика, преобразующего сигнал со

входа в некоторый сигнал на выходе. Touchstone-модель (расширение файла «.s2p») содержит информацию об одной выбранной волновой матрице СВЧ-компонента, частотах измерения, типах представления данных. Особенностью таких файлов является то, что они описываются только в определенном диапазоне частот, моделирование вне которого невозможно. Формат записи заголовка и начало описания Touchstone-модели приводится в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Описание файла Touchstone

TABLE 2. Description of the Touchstone File

Стартовая строка Touchstone-модели имеет вид:		
#	< frequency unit>	<parameter> <format> R <n>
Функция в файле .s2p	Обозначение	Виды и описание
Строки комментариев	!	Возможно указание служебной или иной информации, которая не используется
Начало главной строки и считывания файла	#	Обозначает первую строку, которую начинает анализировать ПО
< frequency unit>	GHz MHz KHz Hz	Обозначает множитель частоты, который использовался при формировании записи, по умолчанию (GHz)
<parameter>	S Y Z H G	Указывает тип записанной матрицы параметров; по умолчанию используются S-параметры (матрица рассеяния)
<format>	DB MA RI	Формат записи данных: DB – амплитуда в дБ ($20 \log \text{Mag}$) и, через табуляцию, записывают углы; MA – абсолютные значения амплитуд (Magnitude) и, через табуляцию, записывают углы; RI – действительные-мнимые числа (Re-Im). По умолчанию используется формат MA, углы записываются в градусах
R <n>	<n> – заменить на сопротивление	Указывает эталонное сопротивление при измерениях; по умолчанию 50 Ом

После указания первой строки заголовка записывается основной код файла, который определяет коэффициенты передачи для многополюсников. Ниже приводится пример листинга файла Touchstone:

```
«!Demo Touchstone file
# GHz S MA R 50
! freq magS11 angS11 magS21 angS21 magS12 angS12
magS22 angS22
1      0.9      -0.24    0.01    89.8    0.1    89.8
      0.9      -0.24»
```

Как видно из примера выше, Touchstone-файлы содержат данные о результатах измерения, при этом не требуют информации о внутреннем строении схемы, что делает их универсальным и удобным инструментом для использования результатов реальных измерений в процессе математического моделирования.

Отметим, что, несмотря на свой возраст, SPICE до сих пор популярен в схемотехническом моделировании: SPICE и его модификации используются в NI Multisim, Cadence OrCAD, MicroCAP, LTspice, Altium Designer. Формат Touchstone применяются в программах электродинамического моделирования (Keysight ADS, NI AWR), а также в векторных анализаторах цепей для сохранения данных измерений.

В данной статье для математического моделирования в программном пакете DS CST Studio Suite 2023 будут использоваться эквивалентные схемы pin-диодов и МЭМС-ключей во включенном и выключенном состоянии, записанные в виде SPICE- и Touchstone-моделей, между которыми будет произведено сравнение.

Исследуемая модель управляемого метаматериала, размещенного в волноводе

В процессе моделирования использовался волновод WR510 (WG7, R18) с размерами 129,54×64,77 мм (5,10×2,55 дюймов) с частотой среза 1,157 ГГц. В середину волновода была вставлена пластина метаматериала с длиной плеча 9,38 мм ($\lambda/16$ на частоте 2 ГГц). Вид волновода и пластины метаматериала приводится на рисунке 2.

Данная конструкция волновода с метаматериалом может работать в двух режимах:

- 1) прозрачный – коммутирующие устройства включены, и электромагнитная волна проходит сквозь метаматериал с минимальными потерями;
- 2) отражательный – коммутирующие элементы в узлах замкнуты, и падающая волна испытывает отражение от пластины метаматериала.

В идеализированном случае, когда в прозрачном режиме в узлах отсутствует электрический контакт, а в отражательном режиме узлы замкнуты медными проводниками, матрицы рассеяния (S_{11} и S_{21}) будут иметь вид, представленный на рисунке 3.

Как видно, при коммутации узлов удастся обеспечить высокий коэффициент отражения электромагнитных волн от структуры метаматериала в широком диапазоне частот. На основании представленной конструкции проведем исследование эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей на основе SPICE- и Touchstone-моделей.

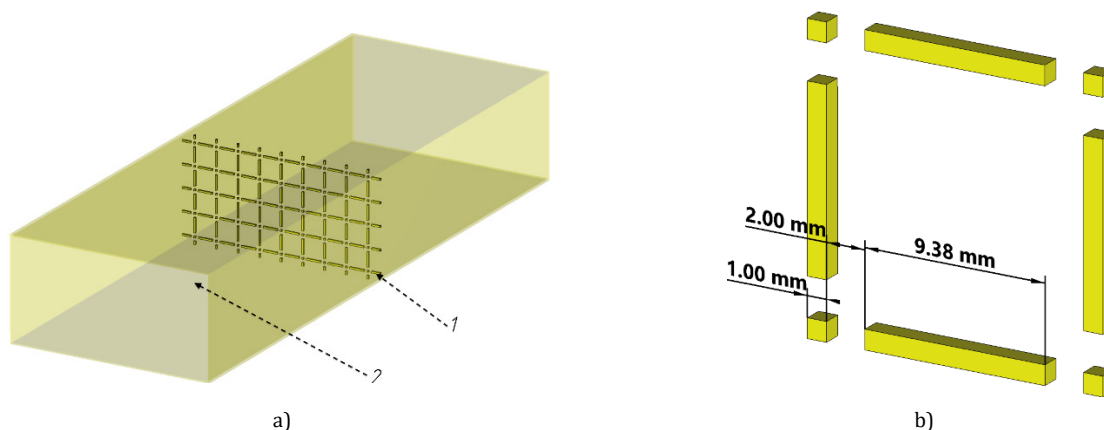


Рис. 2. Исследуемая в процессе моделирования задача: а) пластина метаматериала (1), волновод (2); б) ячейка метаматериала (в углах размещаются коммутирующие устройства – pin-диоды или МЭМС-ключи)

Fig. 2. Problem Studied in Process of Modeling: a) Metamaterial Plate (1), Waveguide (2); b) Metamaterial Cell (Switching Devices are Placed in the Nodes – Pin-Diodes or MEMS-Switches)

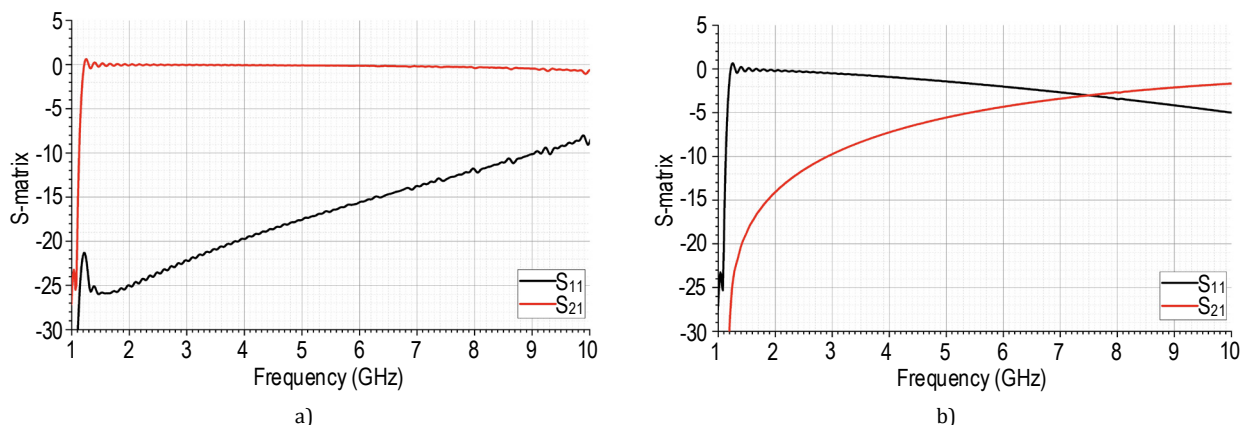


Рис. 3. S-параметры волновода с метаматериалом в идеализированном случае: прозрачный (а) и отражательный (б) режим

Fig. 3. S-parameters of Waveguide with Metamaterial in the Idealized Case: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Математическое моделирование управляемого метаматериала со SPICE-моделями pin-диодов

Первым этапом исследования является выбор эквивалентных схем для используемых радиокомпонентов. Эквивалентная схема pin-диода во многом определяется структурой полупроводникового перехода после добавления i -области. Общие принципы создания конструкции pin-диодов позволили выявить закономерности их параметров, на основе которых были построены эквивалентные схемы для открытого и закрытого состояния диода. При этом, с точки зрения набора эквивалентных элементов, эти схемы будут неизменны. Обобщенная структура pin-диода [9], а также его универсальные эквивалентные схемы приведены на рисунке 4.

Данная универсальная эквивалентная схема является общей для всех pin-диодов, а различия между конкретными изделиями будут лишь в номиналах L , R_s , C_T и R_p . Отметим, что параметр L зависит от геометрических характеристик корпуса и размеров контактных площадок, и имеет малые значения, поэтому наиболее важными являются остальные три параметра диода. В открытом ре-

жиме pin-диод ведет себя как переменный резистор, управляемый протекающим током:

$$R_s = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p)Q} \text{ или } R_s = \frac{W^2}{(\mu_n + \mu_p)I_f \tau}, \quad (1)$$

где $Q = I_f \tau$; W – ширина i -области; I_f – прямой ток; τ – время жизни носителей заряда; μ_n – подвижность электронов; μ_p – подвижность дырок.

В закрытом режиме резистор R_s заменяется на параллельное соединение емкости (C_T) и омических потерь при обратном токе (R_p). Паразитная емкость при этом определяется в соответствии с выражением:

$$C_T = \frac{\epsilon A}{W}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость кремния; A – площадь перехода.

Описанная эквивалентная схема позволяет обеспечить минимальное сопротивление pin-диодов в открытом (включенном) и высокую изоляцию в закрытом (выключенном) состоянии. В данной статье рассматриваются две конструкции pin-диодов

из научных статей [5, 10]. Эквивалентная схема с номиналами элементов для pin-диода из статьи [5] представлена на рисунке 5.

Приведенные эквивалентные схемы использовались для электродинамического моделирования

волновода с управляемым метаматериалом (см. рисунок 2). На рисунке 6 приводятся графики S -параметров, полученные с использованием эквивалентных схем pin-диодов в качестве коммутирующих элементов, а также идеализированного случая (см. рисунок 3) работы метаматериала.

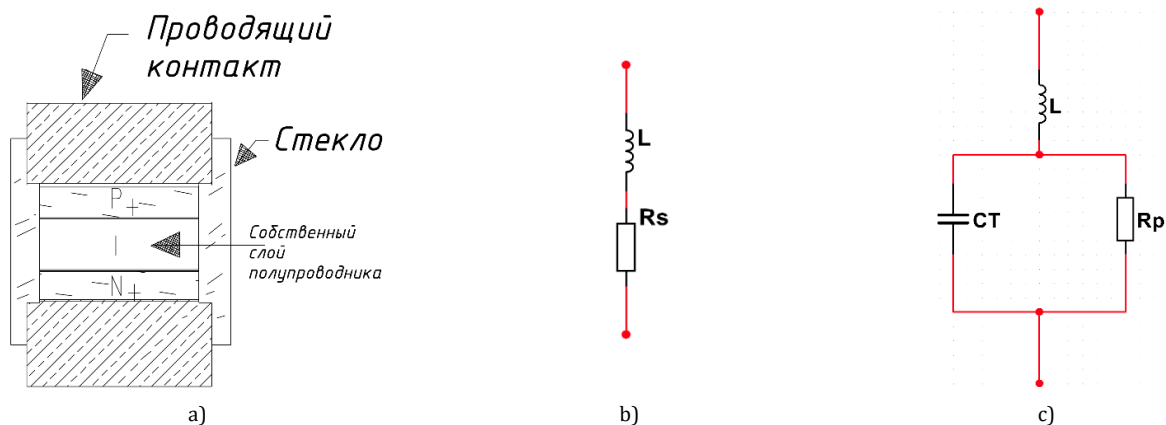
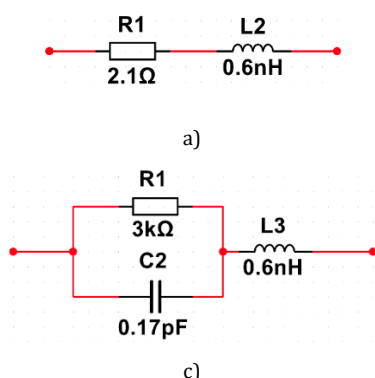


Рис. 4. Обобщенная структура (а) и эквивалентная схема PIN-диода в открытом (b) и закрытом (c) состоянии

Fig. 4. Pin-Diode Design (a) and Its Equivalent Circuit in ON State (b) and OFF State (c)



```
.SUBCKT PIN1ON 1 3
R1 1 2 2.1OHMS
L2 2 3 0.6NH
.ENDS
```

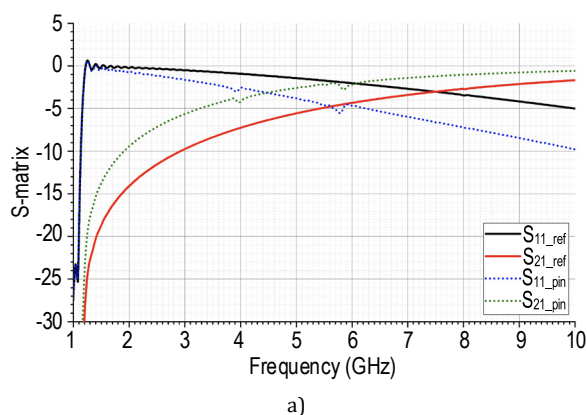
b)

```
.SUBCKT PIN1OFF 1 3
R1 1 2 3KOHMS
C2 1 2 0.17PF
L3 2 3 0.6NH
.ENDS
```

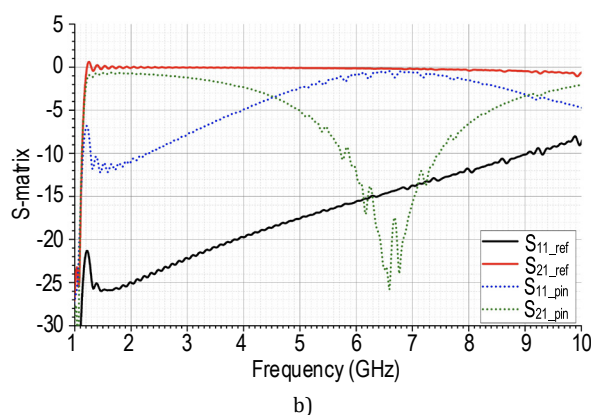
d)

Рис. 5. Эквивалентные схемы для pin-диода [5]: схема pin-диода (a) и SPICE-модель (b) – включенное состояние; схема pin-диода (c) и SPICE-модель (d) – выключенное состояние

Fig. 5. Equivalent Circuits for Pin-Diode [5]: a) Pin-Diode Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) Pin-Diode Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State



a)



b)

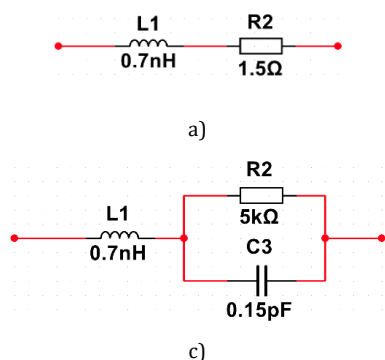
Рис. 6. S -параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели pin-диода [5]: отражательный (a) и прозрачный (b) режим

Fig. 6. S -Parameters of Controlled Metamaterial With Pin-Diode SPICE Models from REFERENCE [5]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно по полученным результатам, использование pin-диодов приводит к увеличению потерь в прозрачном режиме, т. к. в закрытом состоянии сопротивление pin-диодов не бесконечно, и определяется эквивалентной схемой. Также стоит обратить внимание на существенное возрастание S_{11} -параметра в диапазоне частот от 5 до 8 ГГц для прозрачного режима. Данный всплеск вызван резонансом в контуре закрытого pin-диоода, что приводит к замыканию узлов метаматериала и, как следствие, отражению электромагнитной волны от него. Таким образом, использование pin-диодов в качестве

коммутирующих элементов ограничено по частоте из-за особенностей их эквивалентной схемы.

Далее, рассмотрим pin-диод из работы [10], в которой авторы на основе экспериментальных измерений и технической спецификации получили эквивалентную схему pin-диоода Skyworks SMP1345-079LF (рисунок 7). На основе приведенных эквивалентных схем и соответствующего SPICE-кода проводилось моделирование аналогичное ранее рассмотренному pin-диоду из работы [5]. Полученные результаты, а также сравнение с идеализированным случаем приводятся на рисунке 8.



```
.SUBCKT PIN2ON 1 3
L1 1 2 0.7NH
R2 2 3 1.5OHMS
.ENDS
```

```
.SUBCKT PIN2OFF 1 3
L1 1 2 0.7NH
R2 2 3 5KOHMS
C3 2 3 0.15PF
.ENDS
```

Рис. 7. Эквивалентные схемы для pin-диоода [10]: схема pin-диоода (a) и SPICE-модель (b) – включенное состояние; схема pin-диоода (c) и SPICE-модель (d) – выключенное состояние

Fig. 7. Equivalent Circuits for Pin-Diode [10]: a) Pin-Diode Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) Pin-Diode Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

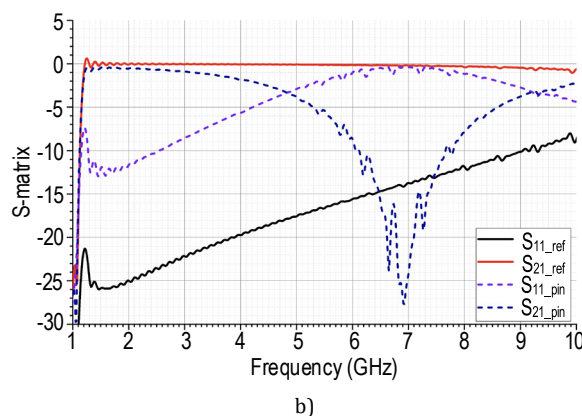
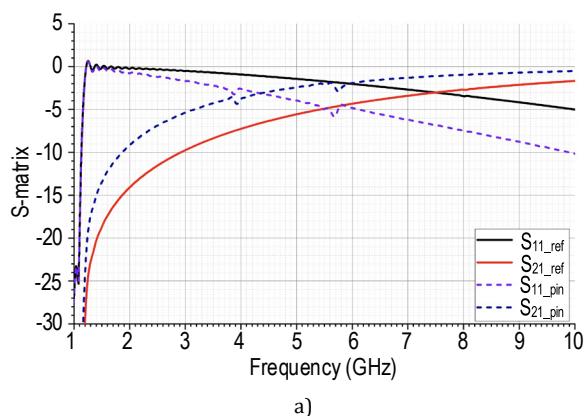


Рис. 8. S-параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели pin-диоода [10]: отражательный (a) и прозрачный (b) режимы

Fig. 8. S-Parameters of Controlled Metamaterial with Pin-Diode SPICE Models from Reference [10]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно из представленных графиков, использование pin-диоода другой конструкции не приводит к существенному изменению характера кривой S-параметров. Имеющиеся незначительные различия в рабочих характеристиках рассмотренных конструкций pin-диодов напрямую вызваны особенностями их топологий. По этой причине конструкция из работы [10] в прозрачном режиме обеспечивает большую изоляцию в более широком

диапазоне частот, что подтверждается графиками на рисунке 9, а также результатами схемотехнического моделирования для одиночного pin-диоода.

Таким образом, на основе моделирования управляемого метаматериала с pin-диоодами можно сделать вывод, что основные характеристики pin-диоода слабо зависят от конкретной модели и в основном определяются общей эквивалентной схемой.

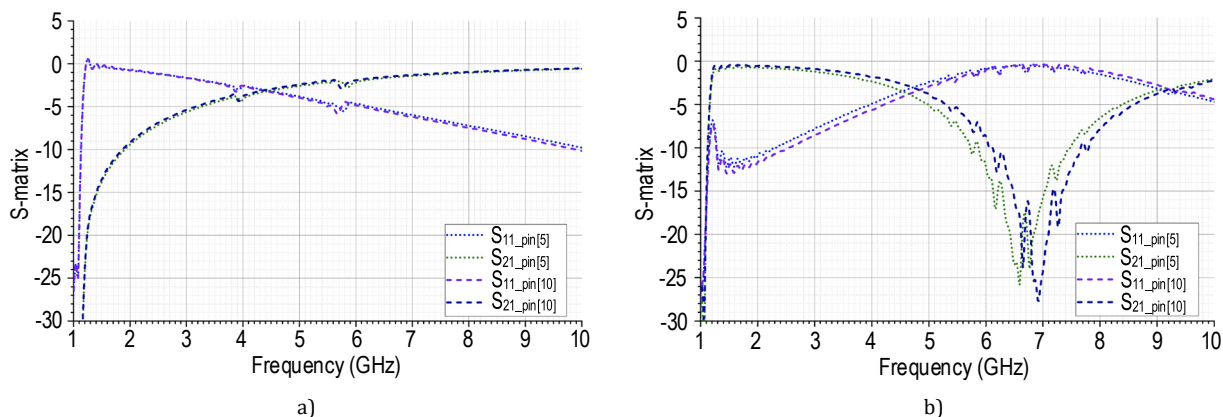


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования управляемого метаматериала с использованием SPICE-моделей pin-диодов в качестве коммутационных элементов: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

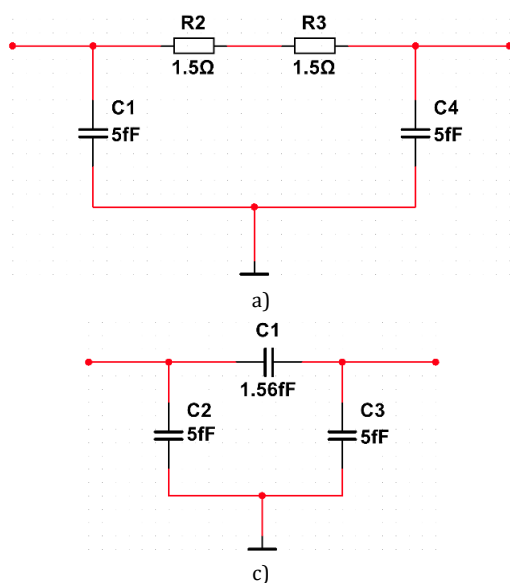
Fig. 9. Comparison of Simulation Results of Controlled Metamaterial with Equivalent Circuits of Pin-Diodes: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Математическое моделирование управляемого метаматериала со SPICE-моделями МЭМС-переключателей

Проведем аналогичный анализ для случая использования МЭМС-переключателей. В настоящее время их конструкции быстро развиваются, а в производстве используют современные технологии фотолитографии, в том числе с применением фотолитографии в глубоком ультрафиолете (компания ASML) и технологий 5+ нм, что приводит к постоянному изменению их эквивалентных схем, сильно зависящих от технологического процесса, топологической конструкции контактов, используемых актуаторов и методов обеспечения питания. В данной работе рассмотрены две конструкции МЭМС-переключателей из работ [11, 12]. Отметим, что высокая сложность конструкции современных МЭМС-

переключателей делает невозможным или крайне затруднительным получение эквивалентных схем, поэтому при их исследовании удобнее использовать Touchstone-файлы.

В статье [11] была предложена конструкция МЭМС-переключателя, обеспечивающего в закрытом состоянии достаточно высокий уровень изоляции благодаря формированию П-контура из конденсаторов с малыми емкостями. Эквивалентная схема этого МЭМС-переключателя, а также его SPICE-модель приводятся на рисунке 10. На основе приведенных SPICE-моделей проводилось электродинамическое моделирование волновода с управляемым метаматериалом; полученные результаты сравнивались с идеализированным случаем. Графики зависимостей S-параметров от частоты приведены на рисунке 11.



```
.SUBCKT MEMS1ON 1 3
C1 1 0 5FF
R2 1 2 1.5OHMS
R3 2 3 1.5OHMS
C4 3 0 5FF
.ENDS
```

b)

```
.SUBCKT MEMS1OFF 1 2
C1 1 2 1.56FF
C2 1 0 5FF
C3 2 0 5FF
.ENDS
```

d)

Рис. 10. Эквивалентные схемы для МЭМС-переключателя [11]: схема МЭМС-переключателя (а) и SPICE-модель (б) – включенное состояние; схема МЭМС-переключателя (с) и SPICE-модель (д) – выключенное состояние

Fig. 10. Equivalent Circuits for MEMS-Switch [11]: a) MEMS-Switch Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) MEMS-Switch Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

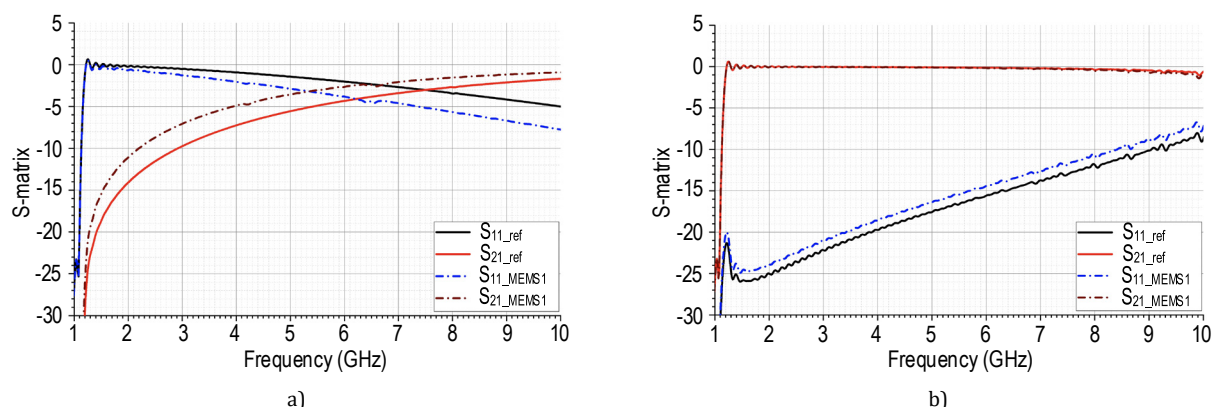


Рис. 11. S -параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели МЭМС-переключателя [11]: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

Fig. 11. S -Parameters of Controlled Metamaterial with MEMS-Switch SPICE Models from Reference [11]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Как видно по полученным результатам, использование МЭМС-переключателя [11] позволяет получить S -параметры, очень близкие к идеализированному случаю. Таким образом, рассмотренный МЭМС-переключатель обеспечивает лучшие характеристики работы управляемого метаматериала по сравнению с pin-диодами.

В качестве еще одного варианта коммутирующего элемента был исследован МЭМС-переключатель из статьи [12]. На рисунке 12 приводится эквивалентная схема и SPICE-модель этого МЭМС-переключателя. Как и в предыдущих случаях, представленные SPICE-модели использовались для моделирования метаматериала и получения S -параметров (рисунк 13). Отметим, что из-за усложне-

ния эквивалентной схемы большого числа нелинейных элементов, а также с учетом использования 180 переключателей для коммутации всех узлов пластины метаматериала, время моделирования увеличилось в 2,5 раза по сравнению со случаем использования pin-диодов и в 1,5 раза по сравнению с МЭМС-переключателем из [11].

Полученные результаты показывают, что использование MEMS-переключателей позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот по сравнению с pin-диодами. Однако МЭМС-переключатель из [12] значительно уступает конструкции из [11] в реализуемой эффективности работы метаматериала, что особенно заметно в отражательном режиме.

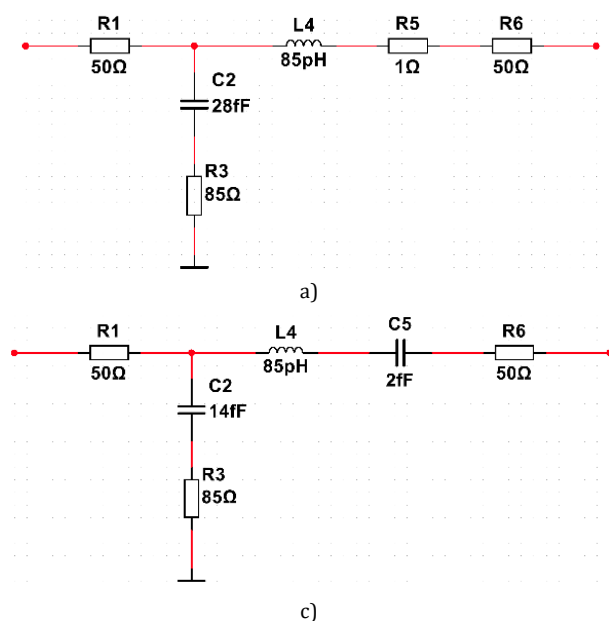


Рис. 12. Эквивалентные схемы для МЭМС-переключателя [12]: схема МЭМС-переключателя (а) и SPICE-модель (б) – включенное состояние; схема МЭМС-переключателя (с) и SPICE-модель (д) – выключенное состояние

Fig. 12. Equivalent Circuits for MEMS-Switch [12]: a) MEMS-Switch Circuit for ON State; b) SPICE Model for ON State; c) MEMS-Switch Circuit for OFF State; d) SPICE Model for OFF State

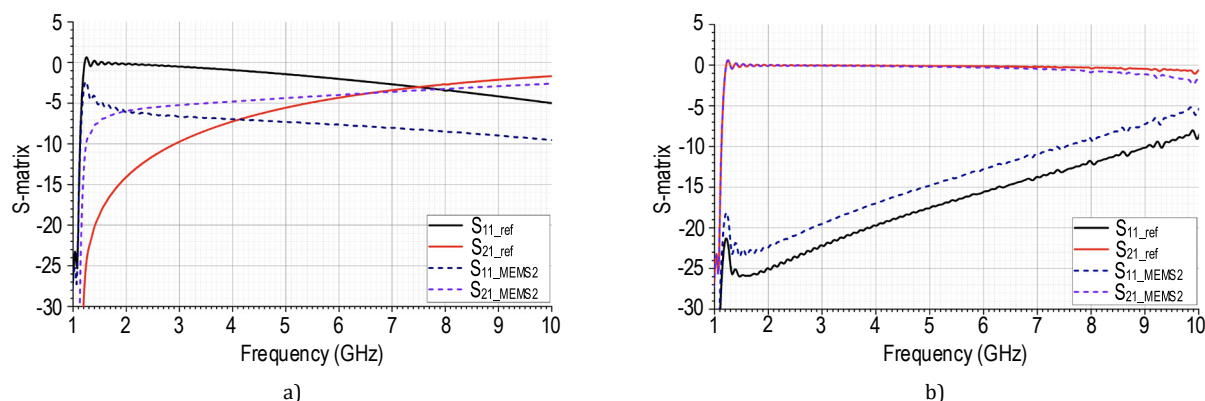


Рис. 13. S -параметры управляемого метаматериала, использующего SPICE-модели МЭМС-переключателя [12]: отражательный (а) и прозрачный (б) режимы

Fig. 13. S -Parameters of Controlled Metamaterial with MEMS-Switch SPICE Models from Reference [12]: a) Transparent Mode; b) Reflective Mode

Таким образом, использование SPICE-моделей позволяет повысить точность математического моделирования благодаря учету влияния паразитных характеристик радиокомпонента, включая нелинейный характер зависимости сопротивления от частоты. Однако также следует рассмотреть случай, когда использование SPICE-моделей по какой-либо причине невозможно, и доступны только Touchstone-файлы. Поэтому произведем сравнение точности моделирования при использовании SPICE- и Touchstone-моделей.

Сравнение результатов моделирования при использовании SPICE- и Touchstone-моделей эквивалентных схем

Для оценки эффективности применения Touchstone-файлов при электродинамическом моделировании рассматривался случай использования pin-диода (см. рисунок 5) в закрытом состоянии, а также МЭМС-переключатель (см. рисунок 10) в открытом состоянии. Для формирования Touchstone-файла были построены эквивалентные схемы коммутационных элементов в редакторе схем CST Schematic и рассчитаны их S -параметры в широком диапазоне частот (рисунки 14 и 15).

Отметим, что формирование Touchstone-файла проще, чем создание SPICE-модели, т. к. не требуется вручную набирать программный код описания радиоэлектронного компонента. Но Touchstone-файл ограничен выбранным при его формировании диапазоном частот и не может использоваться для математического моделирования вне этого диапазона. На рисунке 16 приводятся результаты моделирования волновода с управляемым метаматериалом с использованием Touchstone-файлов, а также их сравнение со SPICE-моделями для соответствующих случаев. Из приведенных графиков видно, что применение Touchstone-файлов при моделировании дает результаты, совпадающие со случаем использования SPICE-моделей. Таким образом, при наличии одной из волновых матриц описания компонента возможно проведение электродинамического моделирования с высокой точностью, что является востребованным при определении влияния нелинейных элементов на различные СВЧ-устройства или антенны. Однако отметим, что использование нелинейных элементов приводит к значительному усложнению процедуры математического моделирования, а значит, увеличивает требования к вычислительным мощностям.

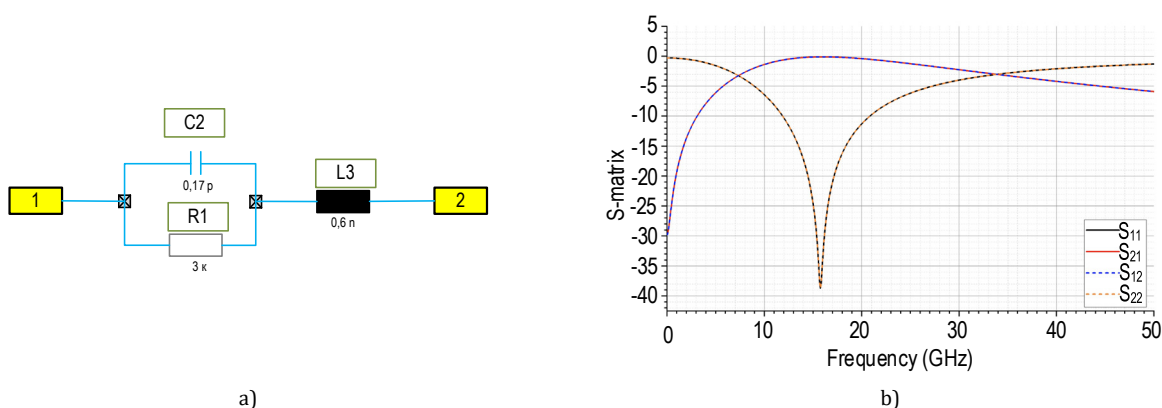


Рис. 14. Touchstone-файл для pin-диода в закрытом состоянии: а) эквивалентная схема, собранная в CST Schematic; б) графики S -параметров, которые записывались в Touchstone-файл

Fig. 14. Touchstone File for Pin-Diode in OFF State: a) Equivalent Circuit in CST Schematic; b) S -Parameters for Touchstone File

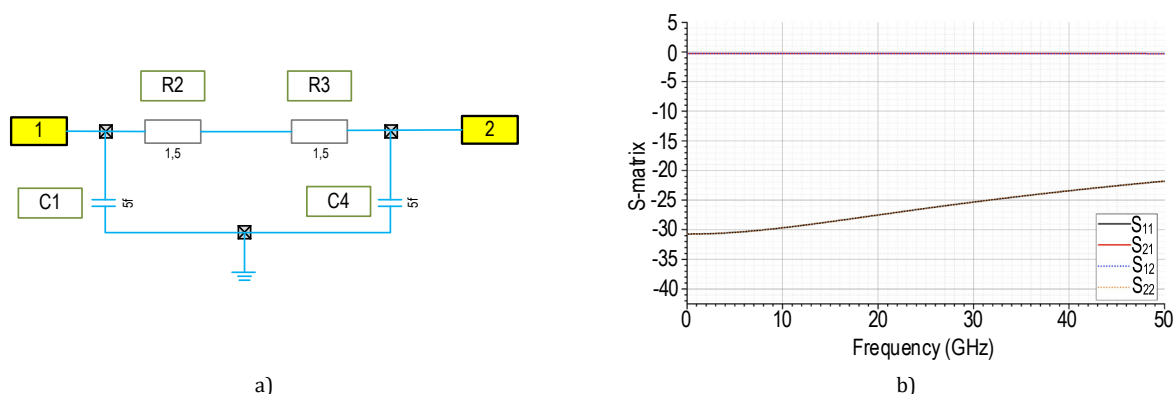


Рис. 15. Touchstone-файл для МЭМС- переключателя в открытом состоянии: а) эквивалентная схема, собранная в CST Schematic; б) графики S -параметров, которые записывались в Touchstone-файл

Fig. 15. Touchstone File for MEMS-Switch in OFF State: a) Equivalent Circuit in CST Schematic; b) S -Parameters for Touchstone File

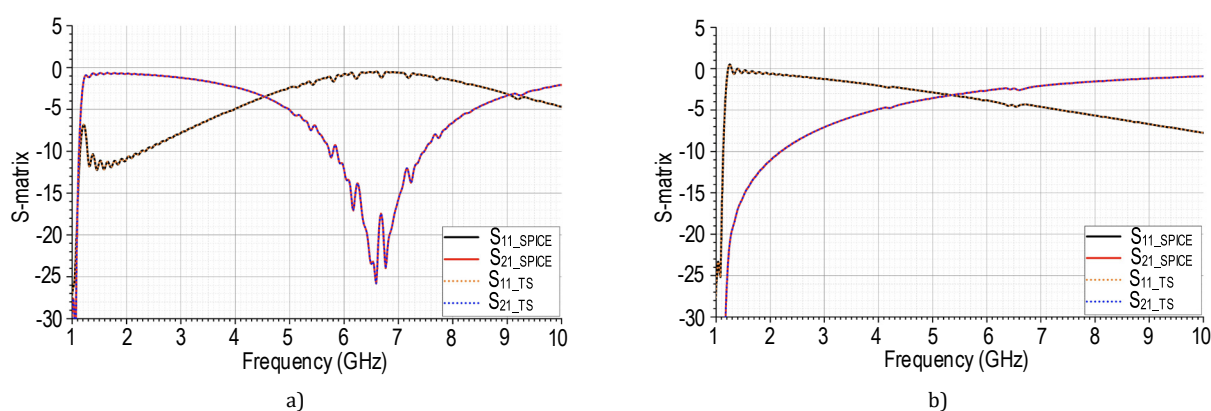


Рис. 16. S -параметры для волновода с управляемым метаматериалом с использованием Touchstone-файлов для случая: а) pin-диода в закрытом состоянии; б) МЭМС-переключателя в открытом состоянии

Fig. 16. S -parameters of Controlled Metamaterial with Touchstone Files for the Case of: a) Pin-Diode in OFF State; b) MEMS-Switch in ON State

Также, в ходе моделирования в программном пакете DS CST Studio Suite 2023 было обнаружено, что использование SPICE-моделей позволяет уменьшить время расчета по сравнению с Touchstone-файлами. Например, при решении последней из рассмотренных задач (сравнение результатов моделирования МЭМС-переключателя на основе SPICE-модели и Touchstone-файла) было выяснено, что моделирование с использованием SPICE-модели занимает 10 мин. 30 с, использует 57 ГБ оперативной памяти в пике и обеспечивает равномерную загрузку CUDA-ядер ($2 \times$ Nvidia Tesla T4); в случае Touchstone-файла время расчета составило 12 мин. 59 с (что на 5 % больше), было использовано 69 ГБ оперативной памяти в пике, а загрузка CUDA-ядер носила неравномерный характер. Такие результаты объясняются особенностями работы программного пакета DS CST Studio Suite 2023: в случае SPICE-моделей S -параметры эквивалентной схемы рассчитываются во всем исследуемом диапазоне частот перед началом моделирования; а при использовании Touchstone-файлов считывание волновой матрицы происходит для каждой частоты по отдельности по мере надобности. Однако

в общем эффективность расчетов оставалась на достаточно высоком уровне при моделировании всех рассмотренных нелинейных компонентов благодаря использованию вычислительных ядер CUDA.

Заключение

Таким образом, применение SPICE-моделей и Touchstone-файлов позволяет совместить схемотехнические системы моделирования с электродинамическими, за счет чего в ходе расчетов учитывается больше параметров реальных радиоэлектронных компонентов и повышается точность результатов моделирования СВЧ-устройств. SPICE-модели являются достаточно точным описанием компонентов на топологическом уровне, учитывающим их паразитные параметры, которые оказывают влияние на протекающие токи и электромагнитные волны. Однако из-за особенностей построения SPICE-моделей, создающих угрозу сохранению в тайне конструкции компонента, в настоящее время в основном используется описание только в виде IBIS-файлов. Touchstone-файлы также лишены этого недостатка. Они могут быть получены на основе

IBIS-файлов и представляют собой набор волновых матриц многополюсников. Кроме того, Touchstone-файлы могут быть сформированы с помощью векторных анализаторов цепей, так как являются стандартом предоставления результатов (измерительная аппаратура Keysight и Rohde&Schwarz). Эта особенность позволяет проводить гибридные исследования – когда часть результатов получена на основе реальных измерений, а часть – путем выполнения электродинамического моделирования.

Актуальность полученных результатов связана с повышением точности численного электродинамического анализа метаматериальных объемных структур с управляемой диаграммой рассеянного излучения [13, 14], в частности – для оценки потерь мощности в управляющих элементах и цепях их питания. В работах [13, 14] было показано, что на ос-

нове объемных метаматериальных структур с оптическим или электрическим способом управления рассеянным излучением могут быть реализованы отражатели фазированных антенных решеток, а также – рефлекторы антенных систем с широкоугольным сканированием в сверхширокой полосе частот и покрытий, существенно снижающих эффективную поверхность рассеяния защищаемых объектов в заданных направлениях.

Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют значительно повысить эффективность автоматизированного проектирования управляемых метаматериалов за счет использования схемотехнических форматов описания управляющих элементов, а также – для верификации электродинамических моделей на основе данных натурного измерения характеристик радиокомпонентов.

Список источников

1. Wu Z.-f., Liu J.-b. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter // *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China (ACES, Beijing, China, 29 July–01 August 2018)*. IEEE, 2018. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application // *Proceedings of the 18th International Conference on Smart Technologies (IEEE EUROCON 2019, Novi Sad, Serbia, 01–04 July 2019)*. IEEE, 2019. DOI:10.1109/EUROCON.2019.8861926
3. Wu Z.N., Tang W.X., Cui T.J. A beam-steerable metamaterial lens using varactor diodes // *Proceedings of the MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP, Suzhou, China, 01–03 July 2015)*. IEEE, 2015. DOI:10.1109/IMWS-AMP.2015.7324902
4. Chaimool S., Hongnara T., Rakluea C., Akkaraekthalin P., Zhao Y. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019. Vol. 2019. Article ID 7216324. DOI:10.1155/2019/7216324
5. Liu B., Lin G., Cui Y., Li R. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article ID 9852. DOI:10.1038/s41598-017-10364-4
6. Пастернак Ю.Г., Ищенко Е.А., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя // *Труды учебных заведений связи*. 2021. Т. 7. № 1. С. 54–62. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62
7. Vladimirescu A. The SPICE Book. John Wiley, 1994. 432 p.
8. Touchstone File Format Specification. Rev 1.1. EIA/IBIS Open Forum, 2002. 11 p.
9. The PIN Diode Circuit Designers': Handbook. Microsemi Corporation, 1998. 137 p.
10. Ahmad I., Dildar H., Khan W.U.R., Ullah S., Ullah S., Albreem M.A., Alsharif M.H., Uthansakul P. Frequency Reconfigurable Antenna for Multi Standard Wireless and Mobile Communication Systems // *Tech Science Press*. 2021. Vol. 68. Iss. 2. PP. 2563–2578. DOI:10.32604/cmc.2021.016813
11. Casals-Terré J., Pradell L., Heredia J.C., Giacomozzi F., Iannacci J., Contreras A., Ribó M. Enhanced Robustness of a Bridge-Type Rf-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 22. Article ID 8893. DOI:10.3390/s22228893
12. Gong S., Shen H., Barker N.S. Study of Broadband Cryogenic DC-Contact RF MEMS Switches // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. Vol. 57. Iss. 12. PP. 3442–3449. DOI:10.1109/TMTT.2009.203387
13. Авдюшин А.С., Ашихмин А.В., Зеленин И.А., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Искусственный диэлектрик с синтезируемой поверхностью отражения электромагнитных волн СВЧ диапазона // *Радиотехника*. 2014. № 6. С. 4–7.
14. Авдюшин А.С., Ашихмин А.В., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М., Чугуевский В.И. Использование цилиндров с анизотропным характером проводимости для упрощения модели искусственного диэлектрика // *Радиотехника*. 2014. № 6. С. 100–104.

References

1. Wu Z.-f., Liu J.-b. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter. *Proceedings of the International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – China, ACES, 29 July–01 August 2018, Beijing, China*. IEEE; 2018. DOI:10.23919/ACCESS.2018.8669307
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application. *Proceedings of the 18th International Conference on Smart Technologies, IEEE EUROCON 2019, 01–04 July 2019, Novi Sad, Serbia*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/EUROCON.2019.8861926

3. Wu Z.N., Tang W.X., Cui T.J. A beam-steerable metamaterial lens using varactor diodes. *Proceedings of the MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, IMWS-AMP, 01–03 July 2015, Suzhou, China*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/IMWS-AMP.2015.7324902
4. Chaimool S., Hongnara T., Raklua C., Akkaraekthalin P., Zhao Y. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2019;2019:7216324. DOI:10.1155/2019/7216324
5. Liu B., Lin G., Cui Y., Li R. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding. *Scientific Reports*. 2017;7:9852. DOI:10.1038/s41598-017-10364-4
6. Pasternak Yu., Ishchenko E., Pendyurin V., Fedorov S. Use of Active Metamaterial as a Phase Shifter Integrated into the Waveguide. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2021;7(1):54–62. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-54-62
7. Vladimirescu A. *The SPICE Book*. Wiley; 1994. 432 p.
8. *Touchstone File Format Specification*. Rev 1.1. EIA/IBIS Open Forum; 2002. 11 p.
9. *The PIN Diode Circuit Designers' Handbook*. Microsemi Corporation; 1998. 137 p.
10. Ahmad I., Dildar H., Khan W.U.R., Ullah S., Ullah S., Albreem M.A., Alsharif M.H., Uthansakul P. Frequency Reconfigurable Antenna for Multi Standard Wireless and Mobile Communication Systems. *Tech Science Press*. 2021;68(2):2563–2578. DOI:10.32604/cmc.2021.016813
11. Casals-Terré J., Pradell L., Heredia J. C., Giacomozzi F., Iannacci J., Contreras A., Ribó M. Enhanced Robustness of a Bridge-Type Rf-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications. *Sensors*. 2022;22(22):8893. DOI:10.3390/s22228893
12. Gong S., Shen H., Barker N.S. Study of Broadband Cryogenic DC-Contact RF MEMS Switches. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009;57(12):3442–3449. DOI:10.1109/TMTT.2009.2033872
13. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Zelenin I.A., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. Artificial Dielectric with Surface Synthesized for Reflection of Electromagnetic Waves of Microwave Range. *Radiotekhnika*. 2014;6:4–7.
14. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M., Chuguevskiy V.I. Use of Cylinders with Anisotropic Conductivity to Simplify Mathematical Model of Artificial Dielectrics. *Radiotekhnika*. 2014;6:100–104.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; одобрена после рецензирования 17.06.2023; принята к публикации 05.09.2023.

The article was submitted 09.06.2023; approved after reviewing 17.06.2023; accepted for publication 05.09.2023.

Информация об авторах:

ИЩЕНКО
Евгений Алексеевич

аспирант кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

ПАСТЕРНАК
Юрий Геннадьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0002-2031-5531>

ПЕНДЮРИН
Владимир Андреевич

кандидат технических наук, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи»

 <https://orcid.org/0000-0002-4697-5976>

ПРОСКУРИН
Дмитрий Константинович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0009-0004-0569-6737>

ФЁДОРОВ
Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронных устройств и систем» Воронежского государственного технического университета

 <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>