

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.4>

УДК: 621.372.2

ЭКСТРАКЦИЯ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ИЗ ИЗМЕРЕННЫХ S-ПАРАМЕТРОВ

Н.С. Павлов, Е.С. Жечев, А.М. Заболоцкий

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024 г.

Аннотация. Представлен метод экстракции погонных параметров линий передачи из измеренных S -параметров. Метод показывает схожие результаты с другими методами расчета погонных параметров. Максимальное отклонение элементов матриц погонных параметров однопроводных линий передачи составляет 1.37%, при минимальном значении – 0.075%. В случае многопроводных симметричных и несимметричных линий передачи максимальное отклонение не превышает 3.64%. Для подтверждения результатов проведен анализ характеристик во временной области. Показано, что метод стабилен по мере увеличения сложности структур с точки зрения количества проводников и наличия их асимметрии.

Ключевые слова: погонные параметры, линии передачи, S -параметры, экстракция.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Автор для переписки: Павлов Никита Сергеевич. nikitapavlov0804@mail.ru

Введение

Современные радиоэлектронные средства (РЭС) играют важную роль в различных сферах деятельности и обычной повседневной жизни каждого человека [1]. РЭС могут быть различной степени сложности, начиная от простой бытовой и заканчивая сложной космической. Имеют место высокие темпы развития РЭС, непрерывно растущая сложность устройств, увеличение ее количества и плотности компоновки, а также рост производительности устройств за счет увеличения рабочей частоты [2]. Между тем возникает тенденция, которая приводит к нарушениям работы устройств из-за взаимных электромагнитных помех, что сделало необходимым обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) [3]: способности технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых помех другим техническим средствам.

К РЭС относятся различные СВЧ устройства, такие как отрезок линии передачи, транзистор и т.д. [4]. Элементы СВЧ устройств часто удобно представлять в виде многополюсника: описания цепи в виде «черного ящика». При моделировании сложных СВЧ устройств они часто разбиваются на части, каждая из которых описывается как отдельный многополюсник, и в результате, устройство в целом представляется как соединение многополюсников. Внутреннее содержимое можно описать специальными параметрами: S , Z , Y и $ABCD$ параметрами [5]. Они удобны и важны для исследования различных линий передачи (ЛП), которые участвуют в передаче высокочастотных сигналов, защите от помех и обеспечении ЭМС.

При разработке различных устройств на первом этапе создается математическая модель объекта в системе автоматизированного проектирования (САПР) с заданием электрических и геометрических параметров и выполняется его моделирование. На втором этапе изготавливается физическая модель разрабатываемого устройства и проводится экспериментальное исследование ее характеристик.

Результаты моделирования и эксперимента могут отличаться из-за несоответствия геометрических и электрических параметров реального устройства и математической модели. Для выявления причин расхождения результатов анализируются матрицы погонных параметров \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{C} и \mathbf{G} , в том числе необходимые для анализа проблем ЭМС [6]. Для экспериментального определения данных параметров чаще всего используют RLC-метры. Однако такие устройства обладают ограниченным динамическим диапазоном измеряемых величин, что значительно сужает область их применения. Для корректного моделирования задач ЭМС и выявления причин расхождения результатов моделирования и эксперимента требуется точная связь погонных параметров ЛП и S -параметров. Цель данной работы – реализовать алгоритм экстракции погонных параметров ЛП из S -параметров.

1. Теоретические основы методов экстракции погонных параметров ЛП

Погонные параметры ЛП относятся к важным параметрам при изучении вопросов ЭМС и анализе межсоединений печатных плат [7]. ЛП можно представить в виде множества секций $RLCG$, которые будут описываться сопротивлением R (Ом/м), индуктивностью L (Гн/м), емкостью C (Ф/м) и проводимостью G (См/м) (рисунок 1).

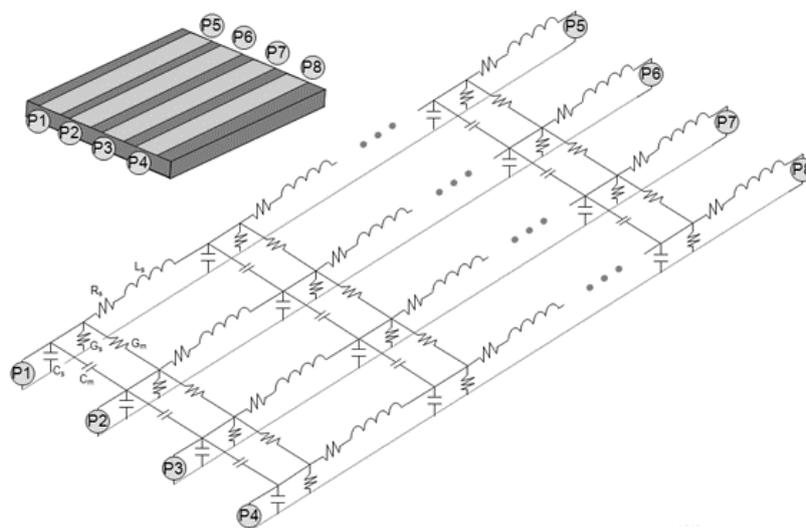


Рис. 1. Многопроводная ЛП в виде множества секция $RLCG$.

Каждая секция представляет собой модель из элементов $RLCG$. Схема стандартного представления модели $RLCG$ представлена на рисунок 2.

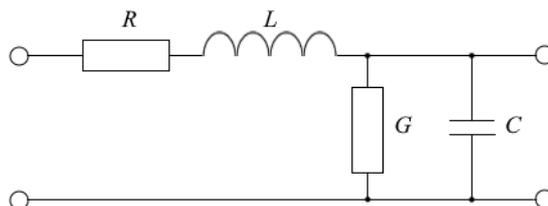


Рис. 2. Схема стандартного представления модели $RLCG$.

Параметры $RLCG$ участвуют в моделировании электромагнитных процессов, связанных с распространением импульсных сигналов в межсоединениях. Параметры обычно представляются в виде матриц, размер которых определяется количеством проводников в ЛП. Параметры $RLCG$ описывают только регулярные ЛП, у которых в продольном направлении неизменны поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющих сред. Данные параметры используются при построении математических моделей и для решения телеграфных уравнений [8-9].

Универсальным методом анализа схем СВЧ является метод, основанный на использовании матриц рассеяния, или S -параметров. Различные виды СВЧ-устройств можно описать с помощью падающих и отраженных волн, которые распространяются в подключенных к ним ЛП. Матрицы S -параметров могут быть получены при помощи моделирования в различном специализированном программном обеспечении, или при проведении реального эксперимента в частотной области с помощью необходимого оборудования. К достоинству S -параметров можно отнести то, что они связывают между собой волны мощности, которые несут информацию о мощности и фазе сигнала. Описание процесса передачи сигнала с помощью S -параметров более просто и наглядно, чем с помощью классических матриц. Элементы матрицы рассеяния можно точно и сравнительно легко измерить.

Экстракция представляет собой процесс извлечения необходимых параметров из других известных. Традиционный метод экстракции погонных параметров однопроводных ЛП рассматривался в работе [10]. Первый этап

метода заключается в вычислении волнового сопротивления Z_C и комплексной постоянной распространения γ :

$$Z_C = \sqrt{Z_0^2 \frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (1)$$

где Z_0 – опорный импеданс S -параметров.

Комплексная постоянная распространения γ вычисляется из следующего выражения:

$$e^{-\gamma l} = \left\{ \frac{(1-S_{11}^2 + S_{21}^2)}{2S_{21}} \pm K \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где:

$$K = \sqrt{\frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)^2 - (2S_{11})^2}{(2S_{11})^2}}. \quad (3)$$

Для вычисления комплексной постоянной распространения γ необходимо прологарифмировать (2) с учетом (3):

$$\gamma = -\frac{1}{l} \ln \left[\left\{ \frac{1-S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \pm \sqrt{\frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)^2}{(2S_{11})^2}} \right\}^{-1} \right], \quad (4)$$

где l – длина ЛП в метрах.

Заключительный этап экстракции погонных параметров ЛП основывается на следующих выражениях:

$$\begin{aligned} R(\omega) &= \operatorname{Re}(Z_C \gamma), \\ L(\omega) &= \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(Z_C \gamma), \\ C(\omega) &= \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}\left(\frac{\gamma}{Z_C}\right), \\ G(\omega) &= \operatorname{Re}\left(\frac{\gamma}{Z_C}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где Im и Re – мнимая и реальная части выражений соответственно, а ω – угловая частота.

Существует традиционный метод экстракции погонных параметров многопроводных ЛП из S -параметров [11]. Первый этап экстракции заключается в преобразовании S -параметров в Z -параметры. Данные параметры представляют собой связь напряжений и токов многополюсника в режиме холостого хода. Преобразование производится с помощью следующего выражения:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = Z_{m0}(I_m + S)(I_m - S)^{-1}, \quad (6)$$

где I_m – единичная матрица, Z_{m0} – эталонная матрица волнового сопротивления (обычно 50 Ом).

Следующим шагом необходимо преобразовать Z -параметры в $ABCD$ -параметры. Данные параметры представляют собой простой набор уравнений, которые связывают напряжение и ток на входе многополюсника с напряжением и током, измеренными на выходе, в режимах холостого хода и короткого замыкания:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} & \frac{Z_{11}Z_{21} - Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}} \\ \frac{1}{Z_{21}} & \frac{Z_{22}}{Z_{21}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Основываясь на вычисленных $ABCD$ -параметрах, можно получить выражения в закрытой форме для вычисления волнового сопротивления Z_c и комплексной постоянной распространения γ , которые являются основными величинами в процессе экстракции погонных параметров ЛП:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{l} \cosh^{-1}(D), \\ Z_c &= \frac{1}{C} \sinh(\gamma l), \end{aligned} \quad (8)$$

где l – длина ЛП в метрах.

Комплексная постоянная распространения γ является мерой изменения ослабления и фазы волны, при распространении волны в определённом направлении. Данный параметр показывает изменение на единицу длины, но в общем случае коэффициент является безразмерным. Заключительный этап экстракции погонных параметров многопроводных ЛП основывается на (5).

2. Алгоритм экстракции погонных параметров ЛП

Начало алгоритма основывается на импорте входных данных, а именно: матрицы S -параметров, соответствующего частотного диапазона, величины опорного импеданса, длины ЛП и массива номеров входных и выходных портов в ЛП. Параметры импортируются в формате файла SnP , где n – количество портов в исследуемой ЛП. Также в данном файле хранится частотный диапазон измеренных S -параметров и значение опорного импеданса. Для экстракции погонных параметров ЛП необходимо указать длину соответствующей линии в метрах. Если величина опорного импеданса не указана, то значение принимается равным 50 Ом.

После импорта необходимых входных данных происходит их проверка. Так, величина длины линии должна быть скалярным значением, количество частотных точек должно быть равным количеству матриц S -параметров, величина опорного импеданса также должна быть скалярным значением и массив частот не должен содержать нулевые значения. Все эти условия должны выполняться, иначе в алгоритме произойдет ошибка. После импорта S -параметров и установки длины ЛП осуществляется выбор процесса экстракции. Для случаев однопроводной и многопроводной ЛП, количество проводников ЛП определяется из входной матрицы S -параметров. Для однопроводной ЛП происходит инициализация коэффициентов передачи и отражения, а именно S_{11} , S_{12} , S_{21} и S_{22} . Следующим шагом происходит вычисление волнового сопротивления Z_c и комплексной постоянной распространения γ . Вычисление данных параметров производится на основе (1) и (4), соответственно. Заключительный этап алгоритма экстракции

однопроводных ЛП заключается в вычислении погонных *RLCG*-параметров. Вычисление данных параметров ЛП осуществляется на основе (5).

Для многопроводной ЛП, необходимо точно знать расположение входных и выходных портов при вычислении *S*-параметров. Это необходимо для точного вычисления собственных и взаимных погонных параметров. На первом этапе происходит преобразование *S*-параметров в *Z*-параметр, с помощью (6). Размер матрицы *Z*-параметров должен соответствовать размеру входной матрицы *S*-параметров. На следующем этапе происходит преобразование в *ABCD*-параметры с помощью выражения (7). Далее происходит вычисление основных параметров, за счет которых происходит процесс экстракции, а именно волновое сопротивление Z_c и комплексная постоянная распространения γ . Последний этап экстракции происходит также за счет (5). В результате образуется структура, в которую входят матрицы погонных сопротивлений **R**, проводимостей **G**, коэффициентов электростатической индукции **C** и коэффициентов электромагнитной индукции **L**. Алгоритм экстракции погонных параметров ЛП представлен на рисунке 3.

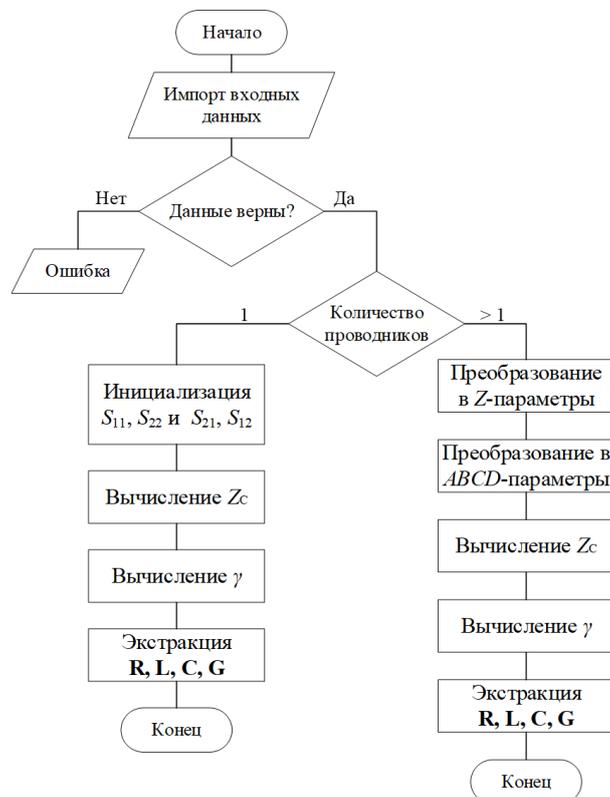


Рис. 3. Алгоритм экстракции погонных параметров ЛП.

3. Анализ и апробация результатов экстракции

Для подтверждения достоверности результатов экстракции выполнен сравнительный анализ. Использован предложенный алгоритм экстракции погонных параметров и экстракция в системе Advanced Design System (ADS). Система ADS представляет собой программное обеспечение для автоматизации электронного проектирования. Для экстракции погонных параметров использовался блок «W-element Extraction». Также для подтверждения достоверности результатов экстракции произведен анализ корреляции S -параметров и полученных погонных параметров на основе вычисления временных откликов исследуемых структур. Для вычисления данных откликов экстракция производилась на разных частотах, чтобы продемонстрировать достоверность предлагаемого алгоритма.

Для начала, произведен анализ экстракции параметров однопроводной ЛП. Геометрические параметры ЛП: длина линии $l = 0.1$ м, высота диэлектрической подложки $h = 500$ мкм, толщина проводников $t = 18$ мкм, ширина проводника $w = 250$ мкм, величина диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 5,5$. Значение резисторов $R1 = R2 = 50$ Ом. Поперечное сечение и схема включения данной ЛП представлены на рисунке 4.

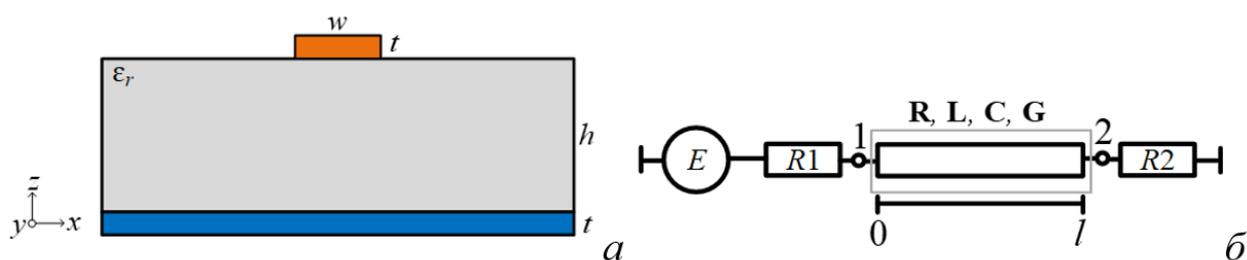


Рис. 4. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) однопроводной ЛП.

Сравнение результатов экстракции погонных параметров однопроводной ЛП с помощью предлагаемого алгоритма и системы ADS представлено в таблице 1. Также приведено общее отклонение матриц предлагаемого алгоритма экстракции и системы ADS. Расчет отклонений матриц погонных

параметров осуществлялся на основе норм Фробениуса с помощью следующего выражения:

$$\Delta_{\%} = \frac{\|P_{Ext}\| - \|P\|}{\|P_{Ext}\|} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где P_{Ext} – норма Фробениуса матриц погонных параметров предложенного алгоритма экстракции, P – норма Фробениуса матриц погонных параметров системы ADS.

Таблица 1. Сравнение вычисленных погонных параметров однопроводной ЛП при $f = 10$ МГц.

Параметр экстракции	Предлагаемый алгоритм	Система ADS
R , Ом/м	4,265	4,268
L , мкГн/м	0,538	0,539
C , пФ/м	80,212	80,267
G , мСм/м	0,103	0,103
Общее отклонение, %		0,069

Из таблицы видно, что вычисленные матрицы имеют практически идентичные значения. Отклонение от системы ADS составляет около 0,069%. Также для подтверждения экстракции погонных параметров однопроводной ЛП произведен анализ корреляции временного отклика. Временные отклики были рассчитаны в системе ADS с помощью блока «W_element», в который загружались матрицы погонных параметров и длина ЛП. В качестве входного воздействия выбран сверхкороткий импульс (СКИ). Его параметры: длительности нарастания, спада и плоской вершины по 100 пс, амплитуда ЭДС 1 В. Временные отклики, полученные на основе экстракции погонных параметров с помощью предлагаемого алгоритма и системы ADS приведены на рисунке 5.

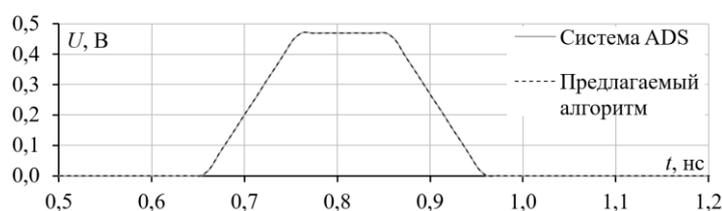


Рис. 5. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) однопроводной ЛП.

Из графиков видно, что временные отклики, полученные на основе экстракции погонных параметров с помощью предлагаемого алгоритма и системы ADS имеют схожий характер. Время прихода выходного импульса примерно одинаково и составляет около 0,66 нс. Амплитуда импульсов составляет около 0,47 В.

Следующим шагом произведен анализ более сложной структуры: симметричной связанной линии передачи (СЛП). Геометрические параметры СЛП: длина линии $l = 500$ мм, высота диэлектрической подложки $h = 500$ мкм, толщина проводников $t = 35$ мкм, ширина проводника $w = 600$ мкм, величина диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 4,5$, расстояние между проводниками $s = 400$ мкм. Значение резисторов $R1 = R2 = R3 = R4 = 50$ Ом. Поперечное сечение и схема включения симметричной СЛП представлены на рисунке 6.

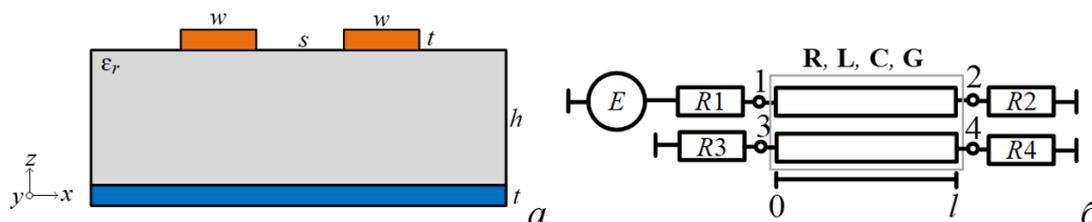


Рис. 6. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) симметричной СЛП.

Сравнение результатов представлено в таблице 2. Также в таблице приведено общее отклонение матриц в процентах, рассчитанное по (9).

Таблица 2. Сравнение вычисленных погонных параметров симметричной СЛП при $f = 1$ ГГц.

Матрица	Предлагаемый алгоритм	Система ADS
R , Ом/м	$\begin{bmatrix} 13,592 & 1,347 \\ 1,347 & 13,592 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 13,601 & 1,347 \\ 1,347 & 13,601 \end{bmatrix}$
L , мкГн/м	$\begin{bmatrix} 0,368 & 0,084 \\ 0,084 & 0,368 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,369 & 0,084 \\ 0,084 & 0,369 \end{bmatrix}$
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 98,022 & -12,709 \\ -12,709 & 98,022 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 98,091 & -12,717 \\ -12,717 & 98,091 \end{bmatrix}$
G , См/м	$\begin{bmatrix} 0,013 & -0,001 \\ -0,001 & 0,013 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,013 & -0,001 \\ -0,001 & 0,013 \end{bmatrix}$
Общее отклонение, %		0,149

Из таблицы видно, что вычисленные погонные матрицы СЛП также имеют схожие значения. Видно, что отклонение с системой ADS составляет 0,149%. Также для подтверждения экстракции погонных параметров симметричной СЛП произведен анализ корреляции временного отклика. Временные отклики, полученные на основе экстракции погонных параметров с помощью предлагаемого алгоритма в системы ADS приведены на рисунке 7.

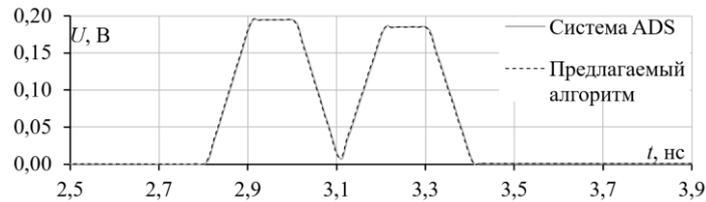


Рис. 7. Временной отклик симметричной СЛП.

Из графиков видно, что временные отклики имеют схожий характер. Время прихода импульсов составляет около 2,8 нс для предлагаемого алгоритма и 2,81 нс для системы ADS. Максимальные амплитуды импульсов для предлагаемого алгоритма и системы ADS составляют около 0,19 В.

Следующим шагом произведен анализ несимметричных СЛП. Для анализа выбрана структура несимметричной СЛП. Геометрические параметры СЛП: длина линии $l = 50$ мм, высота диэлектрической подложки $h = 400$ мкм, толщина проводников $t = 35$ мкм, ширина проводников $w_1 = 200$ мкм и $w_2 = 450$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 5,4$, расстояние между проводниками $s = 300$ мкм. Значение резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 50$ Ом. Поперечное сечение и схема включения несимметричной СЛП представлены на рисунке 8.

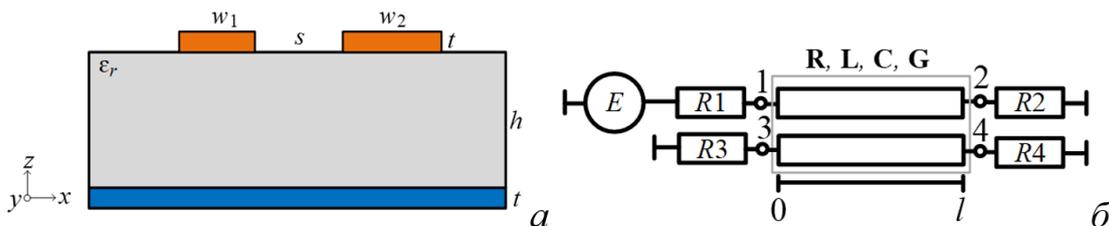


Рис. 8. Поперечное сечение (а) и схема включения (б) несимметричной СЛП.

Сравнение результатов вычисления погонных параметров несимметричной СЛП с системой ADS представлено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение вычисленных погонных параметров несимметричной СЛП при $f = 10$ ГГц.

Матрица	Предлагаемый алгоритм	Система ADS
R , Ом/м	$\begin{bmatrix} 92,171 & 6,429 \\ 6,429 & 53,517 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 92,235 & 6,433 \\ 6,433 & 53,554 \end{bmatrix}$
L , мкГн/м	$\begin{bmatrix} 0,503 & 0,113 \\ 0,113 & 0,377 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,503 & 0,112 \\ 0,112 & 0,377 \end{bmatrix}$
C , пФ/м	$\begin{bmatrix} 75,717 & -13,848 \\ -13,848 & 108,271 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 75,769 & -13,857 \\ -13,857 & 108,342 \end{bmatrix}$
G , См/м	$\begin{bmatrix} 0,103 & -0,014 \\ -0,014 & 0,153 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,103 & -0,014 \\ -0,014 & 0,153 \end{bmatrix}$
Общее отклонение, %		0,075

Из таблицы видно, что матрицы несимметричны, отклонение от системы ADS составляет около 0,075%. Также для подтверждения экстракции погонных параметров несимметричной СЛП произведен анализ корреляции временного отклика (рисунок 9).

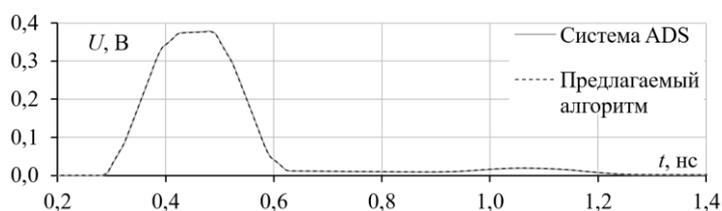


Рис. 9. Временной отклик симметричной СЛП.

Из графиков видно, что временные отклики, полученные на основе погонных параметров ЛП и S -параметров, также имеют схожий характер. Время прихода первого импульса составляет 0,3 нс. Время прихода второго импульса составляет 0,09 нс. Амплитуда первого импульса составляет 0,37 В, а второго — 0,02 мВ.

Заключение

В результате разработан алгоритм экстракции погонных параметров ЛП на основе измеренных S -параметров. Алгоритм производит экстракцию параметров однопроводных и многопроводных ЛП. Для проверки достоверности алгоритма произведено сравнение с результатами экстракции в системе ADS. Отклонение для однопроводной ЛП с системой ADS составило около 0,069%. Для симметричных и несимметричных СЛП, отклонения матриц погонных параметров немного увеличились, составив 0,149% и 0,075%. Также из матриц погонных параметров видно, что значения схожи для симметричных и несимметричных структур. Анализ откликов во временной области показал схожий характер.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

1. Zaliskyi M. и др. Algorithms of Technical Condition Monitoring for Radio Equipment //2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). – IEEE, 2023. – С. 187-190.
2. Kakde S., Khan N. Testing Significance of Layout Dependent Impacts on Silicon Chips Performance //2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT). – IEEE, 2023. – С. 1-6.
3. Zhang D. и др. Prediction of electromagnetic compatibility for dynamic datalink of UAV //IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2018. – Т. 61. – №. 5. – С. 1474-1482.
4. Раевский А. С. Интегральные представления в краевых задачах о расчете устройств СВЧ-и КВЧ-диапазонов //Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2020. – Т. 23. – №. 4. – С. 8-18.
5. Батюков С. В., Иваницкая Н. А., Шилин Л. Ю. Теория электрических цепей. В 2 ч. – 2014.

6. Chang F. Y. Waveform relaxation analysis of RLCG transmission lines //IEEE transactions on circuits and systems. – 1990. – Т. 37. – №. 11. – С. 1394-1415.
7. Тюрнев В. В. Теория цепей СВЧ. – Красноярский государственный технический университет, г. Красноярск, 2003.
8. Захар-Иткин М. Х. Теорема взаимности и матричные телеграфные уравнения для многопроводных линий передачи //Радиотехника и электроника. – 1974. – №. 11. – С. 2338-2348.
9. Гипсман А. И., Красноперкин В. М., Силин Р. А. Расчёт многополосковых линий и устройств //Антенны/Под ред. АА Пистолькорса. М.: Радио и связь. – 1986. – №. 34. – С. 52-68.
10. Chaturvedi S., Bozanic M., Sinha S. Extraction of transmission line parameters and effect of conductive substrates on their characteristics //Rom. J. Inf. Technol. – 2016. – Т. 19. – С. 199-212.
11. Sampath M. K. On addressing the practical issues in the extraction of RLGC parameters for lossy multiconductor transmission lines using S-parameter models //2008 IEEE-EPEP Electrical Performance of Electronic Packaging. – IEEE, 2008. – С. 259-262.

Для цитирования:

Павлов Н.С., Жечев Е.С., Заболоцкий А.М. Экстракция погонных параметров линий передачи из измеренных S-параметров. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.4>