

Результаты расчета GDM для данного набора данных представлены на рис. 4. Из результатов расчета видно, что фильтрация с 5 общими точками также наиболее эффективна.

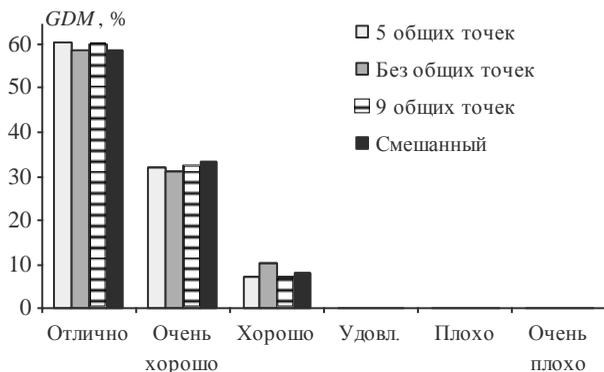


Рис. 4. Гистограмма GDM для второго тестового набора данных

В результате выполнено сравнение эффективности 4 видов фильтрации, используемых при сравнении наборов данных методом FSV. Результаты показали, что наиболее достоверные результаты можно получить при использовании фильтрации с 5 общими точками.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martin A.J.M. Quantitative data validation (automated visual evaluations): thesis BSc Lester. – 1999. – 196 p.
2. Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations // IEEE 1597.2. – 2010. – 62 p.
3. Duffy A.P. Review of the feature selective validation method (FSV). Part I-theory / A.P. Duffy, A. Orlandi, G. Zhang // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – № 99. – P. 1–8.

УДК 621.315

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Н.Ю. Шайманов, магистрант

Научный руководитель А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»

г. Томск, ТУСУР, vishado1@mail.ru

Разработано программное обеспечение (ПО) для расчета параметров линий передачи. ПО протестировано путем расчета характери-

стического импеданса и эффективной диэлектрической проницаемости для двух структур линий передачи. Показано, что результаты, полученные с помощью разработанного ПО и программ AppCAD и TX-Line, хорошо согласуются. Среднее расхождение в результатах составило 2–3%, а максимальное – не превысило 5%.

Ключевые слова: печатная плата, монолитная СВЧ интегральная схема, линии передачи, электрические параметры, программное обеспечение.

Линии передачи (ЛП) являются одним из основных элементов печатных плат (ПП) и монолитных микроволновых интегральных схем (ММИС). Некорректное проектирование ЛП может приводить к нарушениям целостности сигналов и питания [1]. Поэтому в процессе создания ПП и ММИС важно анализировать параметры ЛП.

В настоящее время существует множество программ для расчета параметров ЛП, например [2–5]. Одни из них являются коммерчески и недоступными широкому кругу разработчиков, другие же устарели или ограничены в своих функциональных возможностях. Поэтому возникает необходимость в разработке нового некоммерческого программного обеспечения (ПО) для расчета параметров ЛП.

Разработка программного обеспечения. Для разработки ПО для расчета параметров ЛП использовалась среда Matlab. Перед началом разработки проанализированы программы TX-Line [2] и AppCAD [3], являющиеся аналогами будущего ПО. В результате анализа составлен минимально необходимый перечень структур ЛП.

Создана библиотека материалов, в которую включены 5 материалов для проводников ЛП с разной удельной электропроводностью σ . Также добавлены 5 материалов диэлектриков с разной относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ_r) и тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$). Названия материалов и их электрофизические параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Библиотека материалов для ЛП

Проводники		Диэлектрики		
Название	σ , МС/м	Название	ϵ_r	$\text{tg } \delta$
Медь	58,8	Воздух	1	0
Алюминий	35,3	FR4 (Стеклотекстолит)	4,5	0,035
Золото	41	Керамика	9,8	0,0005
Никель	14,7	Арсенид галлия	12,9	0,0005
Серебро	61,4	Германий	16	0,0005

На рис. 1 представлен графический интерфейс пользователя (ГИП) разработанного ПО. В верхней части интерфейса располагают-

ся переключатели между вкладками, с помощью которых можно выбрать структуру ЛПП для анализа. В каждой вкладке располагаются графическое изображение выбранной ЛПП, а также окна для ввода геометрических размеров и вывода рассчитанных параметров.

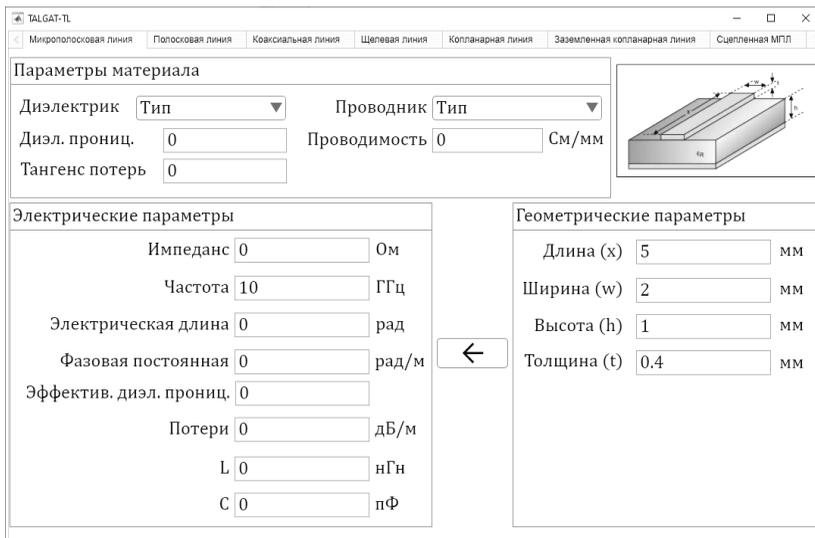


Рис. 1. Графический интерфейс пользователя разработанного ПО

Тестирование. Для проверки ПО выполнен расчет параметров для двух тестовых структур ЛПП. Структура 1 (рис. 2, а) является микрополосковой линией на диэлектрической подложке высотой $H = 1$ мм с сигнальным проводником шириной $W = 2$ мм и толщиной $T = 0,4$ мм. В качестве материалов использовались керамика и медь. Структура 2, представленная на рис. 2, б, выполнена в виде симметричной полосковой ЛПП. Толщина проводников соответствует структуре 1 при $H = 2$ мм, а $W = 1$ мм. В качестве материалов выбраны арсенид галлия и серебро.

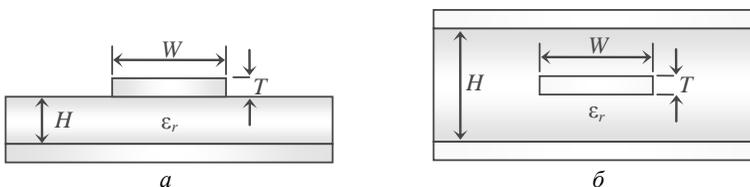


Рис. 2. Тестовые структуры: микрополосковая (а) и полосковая (б) ЛПП

При тестировании ЛП вычислялись только импеданс Z и эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} . Результаты, полученные в разработанном ПО, сравнивались с TX-Line и AppCAD. Результаты вычислений Z и ϵ_{eff} для двух тестовых структур представлены в табл. 2.

Таблица 2

Рассчитанные параметры ЛП

Параметры ЛП	Микрополосковая ЛП			Полосковая ЛП		
	TX-Line	ПО	AppCAD	TX-Line	ПО	AppCAD
Z , Ом	32,8197	33,59	32,5	19,89	19,89	20,2
ϵ_{eff}	7,42	7,034	7,212	12,9	12,9	12,9

Из табл. 2 видно, что значения Z и ϵ_{eff} , полученные в разработанном ПО, TX-Line и AppCAD, хорошо согласуются. Максимальное различие в значениях Z не превышает 2%, а в значениях ϵ_{eff} – 3%. При этом для полосковой ЛП значения ϵ_{eff} , полученные в разных программах, полностью совпадают, поскольку $\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_r$.

Заключение. Разработаны ПО для расчета параметров ЛП, его ГИП, а также библиотека материалов ЛП. На примере двух структур ЛП выполнено сравнение разработанного ПО с программами TX-Line и AppCAD. Показано, что отклонения результатов расчета с помощью разработанного модуля составляют 2–3%.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogtain E. Signal and power integrity. – Simplified, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2009. – 757 p.
2. TX-Line (2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-tx-line.html, свободный (дата обращения: 15.12.2023).
3. AppCAD (2002) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hp.woodshot.com>, свободный (дата обращения: 15.12.2023).
4. Polar Si8000 PCB Controlled Impedance Field Solver (2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.polarinstruments.com/products/cits/Si8000.html>, свободный (дата обращения: 05.02.2024).
5. LearnEMC – Transmission line parameters (2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://learnemc.com/EXT/calculators/TL_Calculator/index.html, свободный (дата обращения: 05.02.2024).