

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

XIV Международная научно-практическая конференция

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

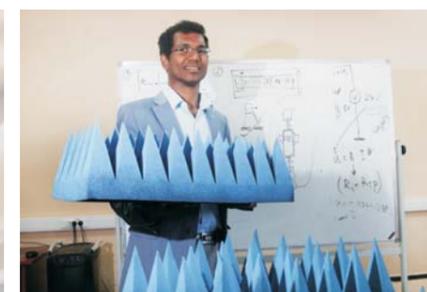
Материалы докладов

г. Томск

28–30 ноября 2018 г.

В двух частях

ЧАСТЬ 1



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

XIV Международная научно-практическая конференция

28–30 ноября 2018 г.

Материалы докладов

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
Томск – 2018

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965
Э 45

Э 45 **Электронные средства и системы управления:** материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – 348 с.
ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)
ISBN 978-5-91191-403-5 (Ч. 2)

Сборник содержит материалы докладов, представленных на XIV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 28–30 ноября 2018 г.), по следующим направлениям: радиотехнические и телекоммуникационные системы; наноэлектроника СВЧ; нанотехнологии в электронике; антенны и микроволновые устройства СВЧ; нелинейная оптика; интеллектуальная силовая электроника и преобразовательная техника; плазменная электроника; биомедицинская электроника; автоматизация и оптимизация систем управления и обработка информации; интеллектуальные системы проектирования, автоматизация проектирования электронных устройств и систем; информационная безопасность; информационные технологии в управлении и принятии решений; информационные технологии в обучении; инновации в сфере электроники и управления; оптоэлектроника и фотоника; видеоинформационные технологии и цифровое телевидение.

Для студентов, преподавателей и специалистов, интересующихся проблемами систем управления.

УДК 621.37/39 + 681.3
ББК (Ж/О) 32.84.85.965

*Конференция проводится при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).
Проект № 18-07-20094*

*Часть статей секций 2–22 направлена для публикации
в журнале «Доклады ТУСУРа»*

ISBN 978-5-91191-401-1
ISBN 978-5-91191-402-8 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2018
© Коллектив авторов, 2018

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «КЕЙСАЙТ ТЕКНОЛОДЖИЗ»



ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Россия, 115054, г. Москва,
Космодамианская наб., 52, стр. 3.

Тел.: 495 797 39 00
Факс: 495 797 39 02
www.keysight.ru

Keysight Technologies – мировой технологический лидер на рынке контрольно-измерительных решений для электронной, оборонной, аэрокосмической и телекоммуникационной промышленности.

Как самостоятельная компания Keysight Technologies была образована в 2014 г. в результате стратегического разделения компании Agilent Technologies, которая, в свою очередь, до 1999 г. входила в корпорацию Hewlett-Packard. Первый измерительный прибор под маркой Hewlett-Packard был выпущен более 75 лет назад.

В настоящий момент компания Keysight Technologies предоставляет самый широкий на рынке спектр лабораторных, модульных и портативных контрольно-измерительных приборов, в том числе оборудование для радиоизмерений (генераторы сигналов, анализаторы сигналов, анализаторы цепей), осциллографы и приборы общего назначения (мультиметры, источники питания, генераторы импульсов, системы сбора данных, логические анализаторы, ручные приборы), решения для тестирования телекоммуникаций, а также системы автоматизированного проектирования и моделирования электронных устройств.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent, используются уже более 45 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Российский офис компании Keysight Technologies предлагает своим клиентам локальную техническую и сервисную поддержку, техническую документацию на русском языке. Для серий малогабаритных осциллографов, генераторов сигналов и анализаторов спектра разработаны русскоязычные интерфейсы пользователя. На большинство приборов есть сертификаты об утверждении типа средств измерений. На постоянной основе ведется работа по включению в Госреестр новых приборов Keysight Technologies.

Среди крупнейших заказчиков Keysight Technologies в России ведущие научно-исследовательские институты, конструкторские бюро, вузы, крупнейшие операторы связи.

В 2012 г. компания Keysight Technologies открыла два дополнительных региональных офиса в России – в Приволжском и Сибирском федеральных округах. В 2013 г. дополнительный офис открыт в Ростове-на-Дону, в 2014 г. – в Санкт-Петербурге.

Информация о компании Keysight Technologies доступна в сети Интернет по адресу: www.keysight.ru

*Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз»
Смирнова Галина Владимировна*

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ – ООО «ЛЕКРОЙ РУС»



ООО «ЛеКрой РУС»
119071, г. Москва, 2-й Донской
проезд, д. 10, стр. 4, 2-й этаж

Тел.: 495 777-5591
Факс: 495 640-3023
<https://prist.ru/>

Компания «ПриСТ» основана в 1994 г. Сегодня АО «ПриСТ» один из крупнейших российских поставщиков приборов для электроизмерений, радиоизмерений и измерений параметров окружающей среды (<https://prist.ru/>).

В компании работает более 80 высококвалифицированных сотрудников, открыты представительства в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге, имеется дилерская сеть по всей территории России, дилеры в Белоруссии и Казахстане.

Основные виды деятельности:

- Поставки измерительного оборудования.
- Технические консультации по подбору средств измерения и вариантам замен приборов, снятых с производства или морально устаревших.
- Услуги по поверке и калибровке СИ.
- Услуги по техническому обслуживанию СИ, включая закрытую калибровку.
- Услуги автоматизации процессов поверки и калибровки.
- Испытания для целей утверждения типа СИ.
- Сервисная поддержка, гарантийное и послегарантийное обслуживание.
- Предоставление СИ в арендное пользование.

Компания «ПриСТ» является эксклюзивным поставщиком на территории России и СНГ продукции таких компаний, как APPA, Center, Good Will Instrument, SEW, Tabor Electronics, Teledyne LeCroy и Wayne Kerr Electronics. Дистрибьюторские и партнерские соглашения связывают компанию со всемирно известными производителями: Anritsu, Fluke, Keysight, National Instruments, Rohde&Schwarz, Pendulum, Spectracom, TDK-Lambda, Pico Technology.

С 2004 г. АО «ПриСТ» представляет на российском рынке компанию LeCroy (с 2012 г. Teledyne LeCroy) – одного из мировых лидеров в разработке и производстве цифровых осциллографов. Осциллографы высочайшего класса помогают инженерам-конструкторам и учёным осуществлять наблюдение, измерение и анализ сигналов в электронных цепях и трактах различных устройств. Компания «Teledyne LeCroy» является одним из технологических лидеров на рынке цифровых осциллографов. Это подтверждают ее достижения, например, в 2013 г. компания представила многоканальную систему с полосой пропускания 100 ГГц в режиме реального времени. В том же 2013 г. были представлены осциллографы высокого разрешения (HDO) с 12-битным АЦП и полосой пропускания 1 ГГц. Семейство осциллографов HDO существенно изменило представление о точности измерений, доступной цифровым осциллографам. 2018 год ознаменовался выходом новой серии осциллографов высокого разрешения WavePro HDR, которая обеспечивает теперь высокоточные измерения в полосе до 8 ГГц. Кроме цифровых осциллографов, компания «Teledyne LeCroy» выпускает анализаторы протоколов. Это широкий класс приборов для тестирования устройств передачи данных как на физическом, так и на логическом уровне. В этой области «Teledyne LeCroy» также занимает лидирующие позиции и предоставляет решения для всех современных протоколов передачи последовательных данных (<http://lecroy-rus.ru/>).



3. Комнатнов М.Е. Полосковая линия для оценки устойчивости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитного излучения в диапазоне частот до 3 ГГц / М.Е. Комнатнов, С.А. Тернов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2017. – № 3(62). – С. 44–59.

4. Фельдштейн А.Л. Проектирование полосковых устройств СВЧ: учеб. пособие. – 2001. – С. 1–129.

5. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sci.sernam.ru/book_svf.php?id=1 (дата обращения: 16.05.2018).

Николаев Илья Игоревич

Магистрант, инж. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Эл. почта: ukitaki369@gmail.com

Комнатнов Максим Евгеньевич

Ст. науч. сотр. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Эл. почта: maxmek@mail.ru

УДК 621.37

К.П. Малыгин, А.В. Козин, А.В. Носов, Р.С. Суровцев

Однокритериальная оптимизация защитных меандровых линий генетическим алгоритмом

Рассмотрена однокритериальная оптимизация простым генетическим алгоритмом параметров меандровой микрополосковой линии (МПЛ) и линии с лицевой связью. Сформулирована однокритериальная целевая функция, обеспечивающая равенство среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод (Z) сопротивлению 50 Ом. При оптимизации меандровой МПЛ выявлено, что при увеличении числа поколений сходимость значений Z улучшается, а сходимость параметров w и s не наступает. При оптимизации параметров меандровой линии с лицевой связью выявлено аналогичное улучшение сходимости значений Z при увеличении количества поколений, однако при этом сходимость значений w и h также улучшаются. Дополнительно сформулирована многокритериальная целевая функция для дальнейших исследований.

Ключевые слова: меандровая линия, параметрическая оптимизация, генетический алгоритм, сверхкороткий импульс.

Сегодня радиоэлектронная аппаратура (РЭА) активно используется практически во всех отраслях: военная, атомная, транспортная, космическая и т.д. Одним из важнейших требований, предъявляемых к РЭА в этих сферах, является ее бесперебойная работа. Наряду с этим неуклонно растёт темп развития РЭА: уменьшаются массогабаритные показатели (увеличивается плотность трассировки печатных плат) и рабочие напряжения, а также увеличиваются рабочие частоты.

Таким образом, развитие РЭА приводит к росту чувствительности ее компонентов к различным электромагнитным воздействиям (ЭМВ), которые могут быть как природными (электростатический разряд, проявление молниевое разряда), так и преднамеренными (ПД ЭМВ) [1]. Опасными для РЭА представляются импульсы наносекундного и субнаносекундного диапазонов [2].

Наиболее известными средствами защиты от таких сверхкоротких импульсов (СКИ) являются ограничители помех, электромагнитные экраны, различные фильтры, устройства развязки и газоразрядные устройства. Однако эти устройства имеют недостатки [3]: малая мощность, недостаточное быстродействие, а также паразитные параметры. Все это затрудняет бесперебойную работу РЭА. В этой связи примечателен подход к защите РЭА, основанный на использовании искажений в простых печат-

ных структурах – витках меандровых линий задержки [4–6]. Достоинством предложенного подхода является то, что его реализация может не требовать устройства защиты как такового. Вместо него могут быть использованы уже имеющиеся на печатной плате меандровые линии. Подход основан на разложении СКИ в одном витке меандровой линии на последовательность импульсов меньшей амплитуды за счет обеспечения простых условий оптимизацией параметров линии.

Однако остаются не исследованными более сложные структуры меандровых линий для защиты от СКИ (многокаскадные и многослойные), у которых можно оптимизировать много параметров. В таком случае оптимизация эвристическим поиском потребует много времени и не даст наилучшего результата. В этой связи необходимо использовать методы глобальной оптимизации, среди которых примечательны генетические алгоритмы (ГА), поскольку они довольно просты в использовании и имеются в системе TALGAT [7]. Задача оптимизации обычно представляется в виде минимизации или максимизации целевой функции, состоящей из одного (однокритериальная оптимизация) или нескольких критериев (многокритериальная оптимизация). Сначала целесообразно отработать методологию однокритериальной оптимизации на примере простых структур.

Цель работы – выполнить однокритериальную оптимизацию генетическими алгоритмами параметров меандровой микрополосковой линии (МПЛ) и линии с лицевой связью. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи: построить геометрические модели этих линий; сформулировать целевую функцию; выполнить оптимизацию посредством ГА и проанализировать полученные данные.

Исходные данные для оптимизации

Поперечные сечения витка меандровой МПЛ и линии с лицевой связью представлены на рис. 1. Линии состоят из двух параллельных проводников, соединенных между собой на дальнем конце. Первый из проводников на ближнем конце линии соединен с источником импульсных сигналов с внутренним сопротивлением, а второй – с приемным устройством. Важным является согласование линии с трактом, в который она включена (50 Ом). В этой связи известно условие согласования двух связанных линий с сопротивлениями R на их концах. Оно определяется как среднее геометрическое волновых сопротивлений четной (Z_e) и нечетной (Z_o) мод линии

$$Z = (Z_e Z_o)^{0,5} = R. \quad (1)$$

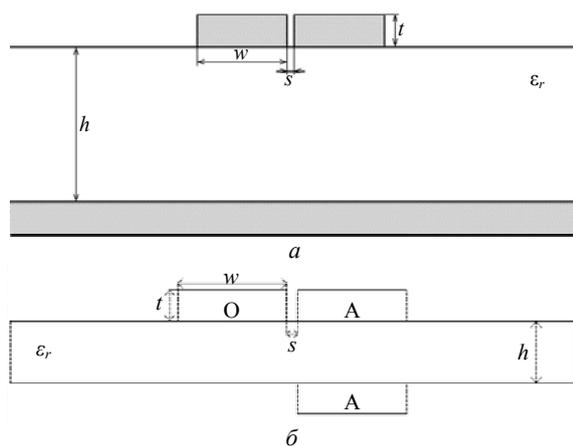


Рис. 1. Поперечные сечения меандровой МПЛ (а) и линии с лицевой связью (б)

Тогда задача оптимизации параметров поперечного сечения меандровой МПЛ и линии с лицевой связью представляется как

$$Z = f(x, b) \rightarrow 50 \text{ Ом}, \quad (2)$$

где x – ширина проводников w в случае меандровой МПЛ и линии с лицевой связью; b – расстояние между проводниками s в случае меандровой МПЛ или толщина диэлектрической подложки h в случае меандровой линии с лицевой связью. Диапазоны поиска параметров: $50 \leq w \leq 400$ мкм; $1 \leq s \leq 400$ мкм; $50 \leq h \leq 400$ мкм.

Неизменяемые параметры меандровой МПЛ: толщина проводников $t = 35$ мкм, толщина диэлектрической подложки $h = 500$ мкм, длина линии $l = 45$ мм, диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$. Неизменяемые параметры меандровой линии с лицевой связью: $t = 35$; 200 мкм, $l = 45$ мм; $\epsilon_r = 4,5$.

Результаты для меандровой МПЛ

Простой ГА запускался по 5 раз с числом особей в популяции 30 при количестве поколений 10, 20, 40 и 80. Результаты работы ГА представлены в табл. 1–4, показывающих улучшение сходимости значения Z к 50 Ом при увеличении количества поколений до 80. Так, для 10 поколений достигается отклонение 5,3%, для 20 – 3,1%, для 40 – 0,7%, а для 80 – 0,3%. Что касается значений w и s , то они сильно различаются для запусков 1–5 при увеличении поколений от 10 до 80. Максимальное отклонение достигает 200%. Это объясняется тем, что в структуре меандровой МПЛ имеется много наборов параметров w и s , обеспечивающих равенство $(Z_e Z_o)^{0,5} = 50$ Ом, так как сходимости полученных значений Z при увеличении числа поколений улучшается (рис. 2). Полученные значения w и s показаны на рис. 3, из которого также видно, что с ростом числа поколений до 80 сходимость значений w и s не улучшается.

Таблица 1

Результаты работы ГА для 30 особей и 10 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	s , мкм
1	52,2948	68,204	233,275	8,76265
2	50,4177	71,119	250,381	8,22687
3	50,7484	70,367	366,455	14,6257
4	49,6649	70,435	375,748	13,7368
5	49,8772	70,51	306,175	10,1934

Таблица 2

Результаты работы ГА для 30 особей и 20 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	s , мкм
1	50,0223	134,589	194,059	6,09595
2	49,8508	137,128	262,649	8,3182
3	49,7408	142,776	383,001	14,2909
4	51,19	152,581	235,508	8,15381
5	49,6485	150,704	199,704	6,10813

Таблица 3

Результаты работы ГА для 30 особей и 40 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	s , мкм
1	49,934	269,562	149,422	4,85393
2	49,5891	307,628	395,391	14,9241
3	49,9535	318,334	309,946	10,4309
4	49,822	343,409	257,885	8,12946
5	49,8101	350,245	235,23	7,31971

Таблица 4

Результаты работы ГА для 30 особей и 80 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	s , мкм
1	50,0231	533,891	214,407	6,72305
2	50,0118	537,763	371,481	13,9195
3	50,1776	581,344	167,868	5,42623
4	50,0124	587,742	398,179	15,9956
5	50,064	710,302	392,085	15,612

Дополнительно оценено время оптимизации. Общее время вычисления при количестве поколений 10, 20, 40 и 80 при запусках 1–5 отражено на рис. 4. Максимальное время вычисления для 10 поколений составило 1,2 мин, а для 80 – 11,8 мин.

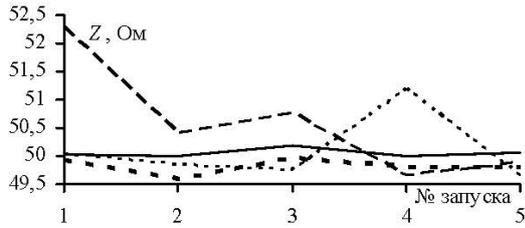


Рис. 2. Полученные значения Z для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

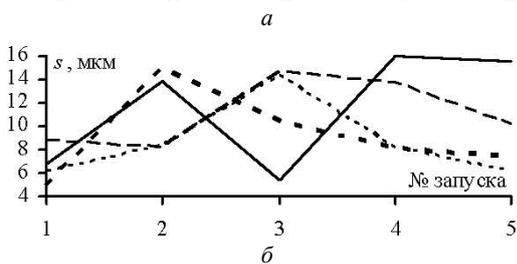
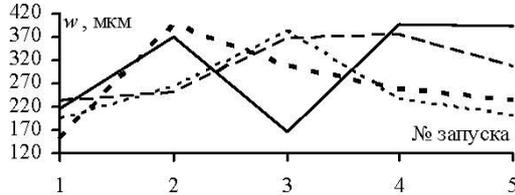


Рис. 3. Полученные значения w (а) и s (б) для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

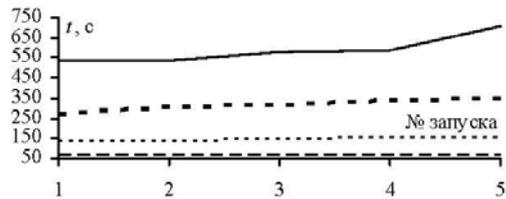


Рис. 4. Время оптимизации для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

Результаты для линии с лицевой связью

Результаты аналогичных запусков ГА представлены в табл. 5–8. Видно увеличение сходимости значения Z к 50 Ом с ростом числа поколений до 80: отклонение уменьшается от 5,9 до 1,1% (рис. 5).

Таблица 5
Результаты работы ГА для 30 особей и 10 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	h , мкм
1	53,1958	402,109	397,693	56,7506
2	53,026	337,284	376,506	52,2204
3	54,4799	358,661	373,671	55,2125
4	55,3866	363,353	372,789	57,6745
5	56,158	343,548	346,188	54,3152

Таблица 6
Результаты работы ГА для 30 особей и 20 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	h , мкм
1	55,235	725,542	380,966	59,1272
2	53,2948	776,653	398,12	57,1084
3	53,1163	709,085	366,37	50,4005
4	52,4522	816,072	386,323	52,4674
5	53,5311	774,791	366,178	51,4633

Таблица 7
Результаты работы ГА для 30 особей и 40 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	h , мкм
1	51,5735	1633,91	398,622	52,2431
2	53,3632	1516	377,911	53,2418
3	52,4491	1795,05	397,549	54,5556
4	51,1771	1401,46	399,631	51,2924
5	51,1248	1777,24	397,052	50,8064

Таблица 8
Результаты работы ГА для 30 особей и 80 поколений

Запуск	Z , Ом	t , с	w , мкм	h , мкм
1	51,4555	3437,66	390,381	50,3311
2	51,7427	3213,16	386,445	50,5661
3	51,5296	3971,44	387,054	50,0801
4	51,2835	3674,16	398,083	51,3725
5	51,8625	3569,29	396,149	52,7077

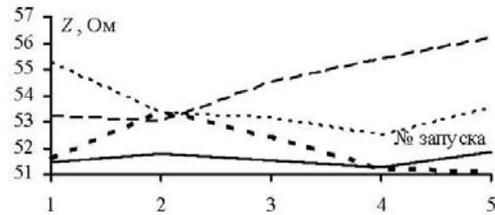


Рис. 5. Полученные значения Z для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

Общее время вычисления при количестве поколений 10, 20, 40 и 80 при запусках 1–5 отражено на рис. 6. Максимальное время вычисления для 10 поколений составило 6,7 мин, для 80 – 66,2 мин.

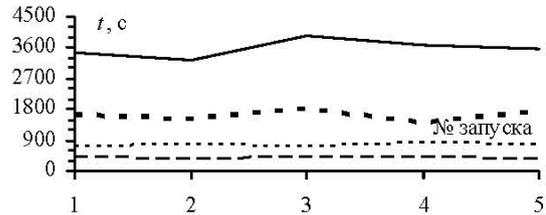


Рис. 6. Время вычисления для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

Что касается полученных значений w и h , то, как видно из табл. 5–8, они отличаются все меньше и меньше для запусков 1–5 при увеличении поколений от 10 до 80, варьируясь от 386,4 до 398,1 и от 50,1 до 52,7, с отклонениями 3,03 и 5,19% соответственно.

Полученные значения на w и h показаны на рис. 7, из которого хорошо видно, что при увеличении поколений до 80 сходимость значений w и h улучшается.

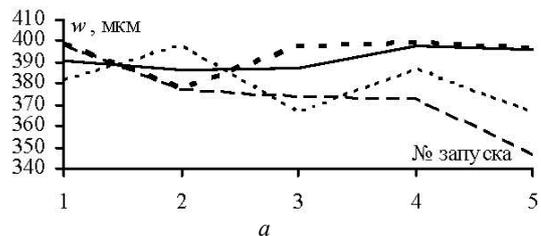


Рис. 7 (начало)

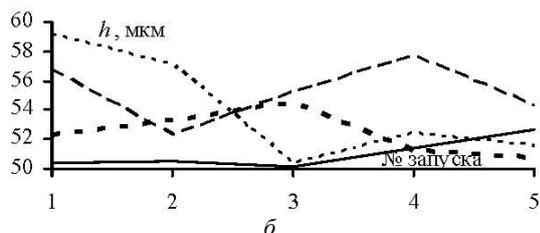


Рис. 7 (окончание). Полученные значения w (a) и h (b) для 10 (---), 20 (- -), 40 (- · -) и 80 (—) поколений

Многокритериальная целевая функция

При формулировке многокритериальной целевой функции (F) необходимо привести отдельные критерии к одной задаче минимизации или максимизации. Выполним это, следуя работе [8]. Для определенности далее будем рассматривать минимизацию суммы:

$$F = \sum_i F_i, \quad (3)$$

где

$$F_i = M_i \frac{f_i}{K_i}, \quad (4)$$

где для i -го критерия f_i – целевая функция; K_i – нормировочный коэффициент; M_i – весовой коэффициент; $i = 1, 2, \dots, N_C$, где N_C – число критериев оптимизации. Нормировочные коэффициенты K_i выбирают равными максимально возможному значению i -й целевой функции так, чтобы величина f_i/K_i стала безразмерной и принимала значения от 0 до 1 в ходе оптимизации.

Весовыми коэффициентами M_i задается значимость i -го критерия. Если критерии равнозначны для пользователя, то эти коэффициенты одинаковы и могут задаваться единицами или как

$$M_i = \frac{1}{N_C}. \quad (5)$$

Как отмечалось ранее, одним из важных критериев при оптимизации меандровой линии является критерий согласования. Перейдем к его формулировке. Так как приведение всех критериев целевой функции сводится к задаче минимизации, то выражения для f_i и K_i сформулированы как:

$$f_1 = 50 - Z, K_1 = Z_{\max}, \quad (6)$$

где Z_{\max} – максимально возможное значение среднего геометрического волновых сопротивлений четной и нечетной мод исследуемой линии. Z_{\max} получено (178,374 Ом) в результате моделирования для крайних значений параметров w и h ($50 \leq w \leq 400$ мкм, $50 \leq h \leq 400$ мкм).

Вторым не менее важным критерием оптимизации является амплитудный. Для защиты от СКИ актуален анализ формы сигнала $U(t)$ на выходе меандровой линии. Если опасность представляет максимальный уровень сигнала $U(t)$ на выходе меандровой линии, можно сформулировать выражения для f_i и K_i как:

$$f_2 = \max|U(t)|, K_2 = \max|E(t)|, \quad (7)$$

где $E(t)$ – ЭДС источника.

Последним критерием является стоимостный. Известно, что стоимость печатной платы зачастую определяется её площадью. Поэтому данный критерий может быть получен с помощью простой формулы площади

$$S = a \cdot b, \quad (8)$$

где $a = l + 6w$ – длина платы, $b = 8w + s$ – ширина платы (с учетом отступа $3w$ по краям платы). Так как известна максимально возможная площадь (S_{\max}) исследуемого устройства (из диапазона параметров, участвующих в оптимизации: $w = 400$ мкм в случае меандровой МПЛ и линии с лицевой связью, $s = 400$ мкм в случае меандровой МПЛ, $s = 200$ мкм в случае меандровой линии с лицевой связью), можно сформулировать выражения для f_i и K_i :

$$f_3 = S, K_2 = S_{\max}. \quad (9)$$

В результате задача многокритериальной оптимизации сформулирована в виде целевой функции

$$F = \frac{\max(U(t))}{\max(E(t))} + \frac{S}{S_{\max}} + \frac{(50 - Z_{\text{cp}})}{Z_{\max}}. \quad (10)$$

Заключение

Таким образом, с помощью ГА выполнена однокритериальная оптимизация параметров поперечного сечения витка меандровой МПЛ и линии с лицевой связью. Для этого сформулирована однокритериальная целевая функция, обеспечивающая равенство $(Z_e Z_o)^{0.5} = 50$ Ом. При оптимизации параметров меандровой МПЛ выявлено, что при увеличении числа поколений сходимость значений Z улучшается, а сходимость параметров w и s не наступает. При оптимизации параметров меандровой линии с лицевой связью выявлено аналогичное улучшение сходимости значений Z при увеличении количества поколений, при этом сходимости значений w и h также улучшаются. Сформулирована многокритериальная целевая функция для дальнейших исследований.

Программная реализация выполнена в рамках государственного задания № 8.9562.2017/БЧ Минобрнауки России. Оптимизация выполнена за счет гранта РФФИ №18-37-00339 в ТУСУРе.

Литература

- Газизов Т.Р. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий. – Томск: ТГУ, 2002. – С. 206.
- Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев и др. // Технологии ЭМС. – 2006. – №3 (18). – С. 36–45.
- Гизатуллин Р.М. Помехоустойчивость и информационная безопасность вычислительной техники при электромагнитных воздействиях по сети электропитания: монография / Р.М. Гизатуллин, З.М. Гизатуллин. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – 142 с.
- Surovtsev R.S. Pulse decomposition in a turn of meander line as a new concept of protection against UWB pulses / R.S. Surovtsev, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky // Proc. of Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk, Russian Federation, May 2015. – 5 p.

5. Surovtsev R.S. Protection against ultrashort pulses based on a turn of meander microstrip line. X International IEEE Scientific and Technical Conference / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, Russian Federation, November 15–17, 2016. – P. 151–154.

6. Суровцев Р.С. Экспериментальное подтверждение возможности защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкороткого импульса за счет его разложения в С-секции с лицевой связью / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, А.В. Носов // Доклады ТУСУР. – 2016. – № 3 (19). – С. 47–50.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611481. TALGAT 2017. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., и др. Всего 23 чел. – Заявка № 2017663209. – Дата поступления 13.12.2017 г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018 г.

8. Belousov A.O. Systematic approach to optimization for protection against intentional ultrashort pulses based on multiconductor modal filters / A.O. Belousov, T.R. Gazizov //

Complexity. – URL: <http://downloads.hindawi.com/journals/complexity/2018>. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–15.

Малыгин Константин Петрович

Магистрант ТУСУРа

Эл. почта: frizi2012@gmail.com

Козин Александр Витальевич

Магистрант ТУСУРа

Эл. почта: aleksandrkozin.7@gmail.com

Носов Александр Вячеславович

Инж., м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Эл. почта: alexns2094@gmail.com

Суровцев Роман Сергеевич

Канд. техн. наук, м.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа

Эл. почта: surovtssevr@gmail.com

УДК 621.391.825

М.А. Самойличенко

Моделирование модального фильтра с пассивным проводником в опорной плоскости при разной толщине подложки

Рассматривается структура, полученная за счет вырезания проводника в опорной плоскости микрополосковой линии. Выполнено моделирование распространения сверхкороткого импульса в такой структуре. Для разных значений толщин диэлектрика приведены зависимости амплитуд импульсов разложения от значения сопротивлений на концах активного и пассивного проводников. Получены оптимальные значения сопротивлений и толщины диэлектрика, при которых импульсы имеют минимальную амплитуду.

Ключевые слова: модальная фильтрация, кондуктивные помехи, сверхкороткий импульс.

С бурным развитием электроники обостряется проблема электромагнитной совместимости. Особо опасны подаваемые по проводникам кондуктивные помехи, в частности, сверхкороткие импульсы (СКИ) [1], которые могут проникать в оборудование и выводить его из строя. Все это вызывает необходимость соответствующей защиты.

Новым средством защиты от СКИ является модальный фильтр (МФ) [2, 3], в котором происходит разложение СКИ на импульсы меньшей амплитуды вследствие разных скоростей мод сигнала в связанной линии с неоднородным диэлектрическим заполнением. МФ обладают радиационной стойкостью, малой массой и дешевизной, а в случае кабеля [4] и массовым применением. Между тем любой МФ требует наличия пассивного проводника, который требует дополнительного места и имеет массу. Поэтому актуален поиск новых конструкций МФ, свободных от этих недостатков. Так, предложено сформировать пассивный проводник в вырезе опорной плоскости и найдено оптимальное значение сопротивлений, при котором выполняется разложение исходного сигнала на два импульса с одинаковой и минимальной амплитудой [5]. Однако это исследование выполнено

при одном и очень малом значении толщины подложки (0,1 мм).

Цель работы – исследовать данную структуру при больших толщинах диэлектрической подложки.

При многократных изменениях в диапазоне параметров целесообразно использовать моделирование. Для этого необходимо построить геометрическую модель поперечного сечения исследуемого МФ и составить его эквивалентную схему.

Вычисление параметров и форм сигнала выполнялось в программном продукте TALGAT [6]. Допускалось, что в рассматриваемой линии распространяются только квази-Т-волны. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.

Поперечное сечение исследуемой структуры представлено на рис. 1, а: ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, w , w_1 , w_2 и t – ширина и толщина проводников, h – толщина диэлектрика, s – расстояние между проводниками. Значения параметров: $w = w_1 = w_2 = 0,5$ мм, $s = 0,4$ мм, $t = 0,105$ мм, $h = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 2$ мм. Диэлектрический материал стеклотекстолит ($\epsilon_r = 5$) выбран из-за его широкого применения. На рис. 1, б приведена эквивалентная схема МФ. Она состоит из