

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

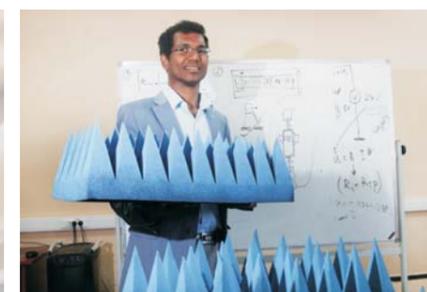
Материалы докладов

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/>).



A. Dounavis // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – April 21, 2011. – Vol. 1. – P. 761–771.

3. Tan X. Time-domain analysis of noise coupling between package and PCB power/ground planes based on WLP-FDTD / X. Tan, X.C. Li, J. Mao // IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – January 10, 2017. – Vol. 7. – P. 269–275.

4. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях и влияний преднамеренных силовых электромагнитных воздействий: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2010. – 357 с.

5. Газизов Р.Р. Методика и алгоритмы для выявления и локализации экстремумов сигнала в многопроводных линиях передачи // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 4. – С. 1–14. – Режим доступа: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-04/01-Gazizov.pdf>

6. Kuksenko S.P. New developments for improved simulation of interconnects based on method of moments / S.P. Kuksenko, T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky et al. // Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2015). – August 23–24, 2015, Phuket, Thailand. – P. 293–301.

7. Baum C. Norms and Eigenvector norms // Mathematics Notes. – 1979. – Vol. 63.

8. Gazizov R.R. Use of evolution strategy in identifying the worst case effects of ultrashort pulse propagation in PCB bus of spacecraft autonomous navigation system / R.R. Gazizov, R.R. Gazizov, T.R. Gazizov // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, Russia, 2018. – P. 1–4.

9. Gazizov R.R., Zabolotsky A.M., Gazizov T.T., Belousov A.O. Influence of ultrashort pulse duration on its peak values localization in PCB of spacecraft autonomous navigation system // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. (Erlagol, Altai. 30 June–4 July). – Erlagol, 2017. – P. 69–74.

Мухамбетжанова Бекзат Сейлхановна

Магистрант каф. ТУ ТУСУРА

Эл. почта: mukhambetjanova.95@gmail.com

Газизов Руслан Рифатович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРА

Эл. почта: ruslangazizov@gmail.com

УДК 621.396.41

И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов

Сравнительный анализ влияния поперечного сечения силовой шины электропитания на её погонные параметры

Выполнено вычисление волнового сопротивления, погонных индуктивности и ёмкости для различных форм поперечного сечения силовой шины электропитания по аналитическим и алгоритмическим моделям. Представлено сравнение значений, полученных аналитическим и численным моделированием.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, аналитическое и численное моделирование, погонные параметры.

Силовые шины электропитания (СШЭП) используются для передачи высоких мощностей на расстоянии. Одним из важных параметров при проектировании подобных СШЭП (рис. 1) является её погонная индуктивность, имеющая две составляющие. Внутренняя индуктивность зависит от частоты (эффект близости, скин-эффект). Внешняя индуктивность определяется геометрией поперечного сечения двух проводников и не зависит от частоты.

На высоких частотах ток концентрируется вблизи поверхности проводника (проявляется скин-эффект), при этом внутренняя индуктивность уменьшается. По этой причине во многих СШЭП учитывают только внешнюю индуктивность. Однако на низких частотах внутренняя индуктивность может оказаться существенной частью общей индуктивности [1].

В работе [2] созданы модели и выполнен квазистатический анализ различных форм поперечного сечения СШЭП. Вычислены погонные индуктивность L и ёмкость C при изменении ширины w и высоты t проводников с сохранением площади поперечного сечения $S = 50 \text{ мм}^2$. Показано, что увеличе-

ние значения w/t приводит к уменьшению L и увеличению C , а следовательно, и уменьшению волнового сопротивления. Минимизация L достигалась за счёт увеличения значения w/t , что приводит к положительному эффекту, но и к отрицательным эффектам: увеличению массы, габаритов и цены СШЭП. Таким образом, особое влияние на погонные параметры СШЭП оказывает форма её поперечного сечения.

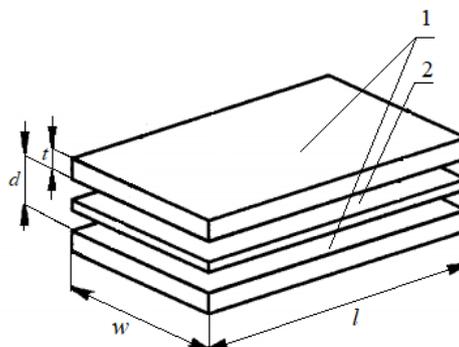


Рис. 1. Внешний вид СШЭП: 1 – проводящие пластины, 2 – изолятор; l – длина; w – ширина; t – толщина; d – расстояние между пластинами

Целью данной работы является вычисление погонных индуктивности и ёмкости, а также волнового сопротивления при помощи аналитического и численного моделирования для проверки вычислений работы [3], а именно сравнения вычислений тремя разными подходами.

Аналитическое и двумерное численное моделирование

Выбраны три конфигурации поперечного сечения СШЭП: несимметричная, симметричная и коаксиальная. Вычисления выполнялись по формулам из работы [1].

Для несимметричной СШЭП (рис. 2) выполнены вычисления L и C (рис. 3) при изменении параметров w (от 100 до 10 мм) и t (от 0,5 до 5 мм) с сохранением площади поперечного сечения $S = 50 \text{ мм}^2$.

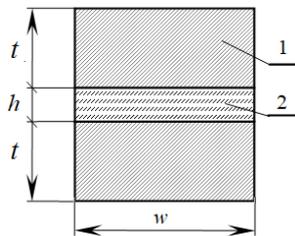


Рис. 2. Поперечное сечение несимметричной СШЭП

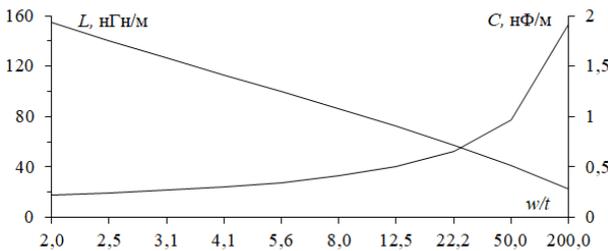


Рис. 3. Значения L и C при изменении w/t для несимметричной СШЭП

Из рис. 3 видно, что при увеличении w/t от 2 до 200 значение L уменьшилось с 154,9 до 22,3 нГн/м, а значение C увеличилось с 219,7 до 1914 пФ/м.

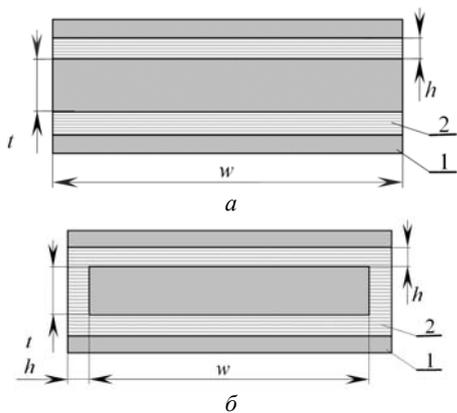


Рис. 4. Поперечное сечение симметричной СШЭП: a – без диэлектрика по краям; b – с диэлектриком по краям

Для симметричной СШЭП (рис. 4) выполнены вычисления L и C (рис. 5) при изменении ширины w

внутреннего проводника (от 100 до 10 мм) и t (от 0,5 до 5 мм) с сохранением площади поперечного сечения $S = 50 \text{ мм}^2$. Вычисления выполнялись по формулам из работы [4].

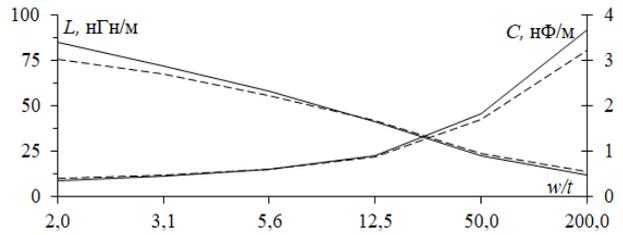


Рис. 5. Значения L и C при изменении w/t для моделей на рис. 4: a – (—); b – (---)

Из рис. 5 видно, что увеличение w/t от 2 до 200 для варианта с диэлектриком по краям приводит к уменьшению L с 85 до 12 нГн/м и увеличению C от 360 до 3682 пФ/м. Для варианта без диэлектрика по краям увеличение w/t приводит к уменьшению L с 76 до 14 нГн/м и увеличению C от 400 до 3224 пФ/м.

Для коаксиальной линии передачи (рис. 6) выполнены вычисления L , C и волнового сопротивления Z . Вычисления выполнялись по формулам из работы [5].

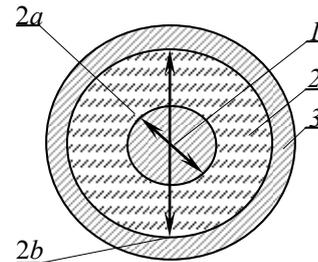


Рис. 6. Поперечное сечение коаксиальной линии передачи: 1 – внутренний проводник, 2 – диэлектрик, 3 – внешний проводник

Исходные данные для аналитической модели: $a = 3,99 \text{ мм}$, $b = 5,99 \text{ мм}$, $\epsilon_r = 4,3$. Выполнены вычисления и получены следующие значения: $L = 81,2 \text{ нГн/м}$, $C = 588,5 \text{ пФ/м}$, $Z = 11,74 \text{ Ом}$.

Таким образом, в результате увеличения w/t значение Z для несимметричной СШЭП уменьшилось с 26,55 до 3,41 Ом, для симметричной СШЭП без диэлектрика по краям уменьшилось с 15,4 до 1,8 Ом, а с диэлектриком по краям уменьшилось с 13,8 до 2 Ом (рис. 6).

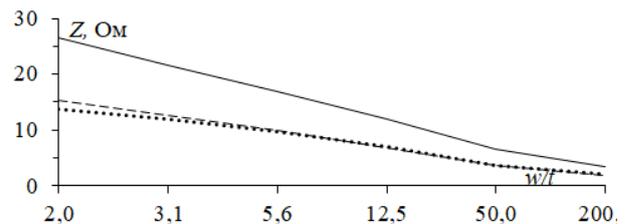


Рис. 7. Значения Z при изменении w/t для СШЭП: несимметричной (—), симметричной без диэлектрика по краям (---), симметричной с диэлектриком по краям (····)

В табл. 1 выполнено сравнение погонных параметров, полученных аналитическим и численным двумерным моделированием в системе TALGAT, модуле MOM_2D при минимальном и максимальном значениях w/t .

Таблица 1
Сравнение параметров при разных формах поперечного сечения СШЭП

Поперечное сечение	Параметры моделирования	C, пФ/м		L, нГн/м		Z, Ом	
		2	200	2	200	2	200
	w/t	2	200	2	200	2	200
	Численное моделирование	398,1	3419,2	87,7	13,9	15,5	2,1
	Аналитическое моделирование	400	3224	76	14	13,8	2
	$\sigma, \%$	0,2	2,9	7	0,3	8	2,4
	w/t	2	200	2	200	2	200
	Численное моделирование	219	1938	153	23,3	26,4	3,5
	Аналитическое моделирование	219,7	1914	154,9	22,31	26,6	3,4
	$\sigma, \%$	0,16	0,6	0,6	2	0,4	1
	w/t	2	200	2	200	2	200
	Численное моделирование	410	3823	95,07	12,33	15,2	1,7
	Аналитическое моделирование	390	3682	85	12	15,4	1,8
	$\sigma, \%$	2,5	1,9	5,6	1,4	0,5	4
	Численное моделирование	545,6		82,9		12,3	
	Аналитическое моделирование	588,5		81,2		11,74	
	$\sigma, \%$	3,8		1		2,3	

Из табл. 1 видно, что при увеличении w/t значительно уменьшаются значения L и Z и увеличивается C , что является положительным результатом при проектировании СШЭП. При сравнении результатов вычислений видно, что относительная погрешность составила не более 8%.

Двумерное и трёхмерное численное моделирование

Созданы трёхмерные модели длиной один метр и выполнено моделирование СШЭП (рис. 8). При моделировании использовался модуль MOM_3D ПО TALGAT 2017.

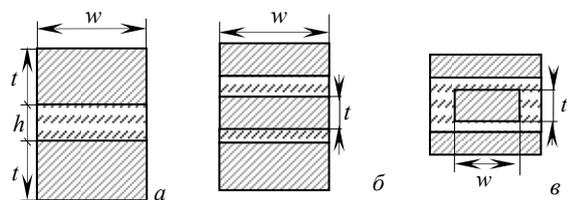


Рис. 8. Поперечные сечения СШЭП

Для всех моделей вычислена погонная ёмкость C (пФ/м), при изменении параметров w (от 100 до 10 мм) и t (от 0,5 до 5 мм) с сохранением площади поперечного сечения $S = 50 \text{ мм}^2$. На рис. 9 представлено сравнение зависимостей C от w/t . Видно, что увеличение w/t приводит к увеличению значения C с 219 до 3812,6 пФ/м.

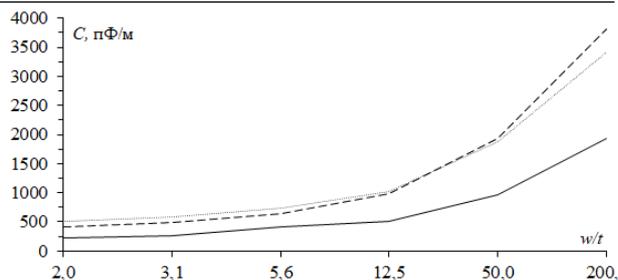


Рис. 9. Зависимость погонной ёмкости (C , пФ/м) от w/t для рис. 8: a – (—); b – (---); c – (···)

Таблица 2
Сравнение погонной ёмкости при разных формах поперечного сечения СШЭП

Поперечное сечение	w/t	MOM_2D	MOM_3D	$\sigma, \%$
	2	219	219,5	0,1
	200	1938	1926,3	0,3
	2	410	404,9	0,6
	200	3823	3812,6	0,13
	2	398,1	400,8	0,33
	200	3419,2	3425,3	0,1

В табл. 2 представлено сравнение погонной ёмкости, полученной тремя подходами при минимальном и максимальном значениях w/t . При численном моделировании использовались модули MOM_2D и MOM_3D ПО TALGAT 2017. Видно, что при увеличении w/t значительно увеличивается C .

Вычислено относительное отклонение MOM_3D относительно MOM_2D. Оно не превышает 0,6%.

Заключение

Выполнено вычисление погонных параметров СШЭП для разных форм поперечного сечения различными подходами. Представлены результаты вычисления погонных параметров и их зависимостей от отношения толщины и ширины. При сравнении с аналитическим моделированием погрешность составила не более 8% (тк как это приблизительные вычисления, погрешность считается нормальной), при сравнении погонных ёмкостей MOM_2D и MOM_3D, погрешность составила не более 0,6%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Литература

1. Dorneles A.C. Bus bar design for high-power / A.C. Dorneles, J. Guo // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2018. – P. 2354–2367.
2. Ternov S.A. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters / S.A. Ternov, A.V. Demakov // NWENT. – 2018. – P. 1–4.

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.