



Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники



РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



РАДИОКОНСТРУКТОРСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ



ФАКУЛЬТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



ФАКУЛЬТЕТ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ



ГУМАНИТАРНЫЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
БЕЗОПАСНОСТИ



ЭКОНОМИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



ЮРИДИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ЗАОЧНЫЙ И ВЕЧЕРНИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ДИСТАНЦИОННОГО  
ОБУЧЕНИЯ



**ВЫБИРАЯ БУДУЩЕЕ,  
ВЫБИРАЙ TUSUR!**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129 E-mail: [onir@main.tusur.ru](mailto:onir@main.tusur.ru)  
Телефон/Факс: (3822) 900-100 Сайт: <http://tusur.ru/>

Информационный центр абитуриента: [magistrant.tusur.ru](http://magistrant.tusur.ru)

## Сборник избранных статей научной сессии TUSUR



ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ TUSUR–2020»

г. Томск, 13–30 мая 2020 г.  
(в двух частях)

**ЧАСТЬ 1**

г. Томск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

# **Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР**

**по материалам  
Международной научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Научная сессия ТУСУР–2020»**

**13–30 мая 2020 г., г. Томск**

**В двух частях**

Часть 1

В-Спектр  
2020

**УДК 621.37/.39+681.518 (063)**

**ББК 32.84я431+32.988я431**

**С 23**

**С 23** Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – 332 с.

**ISBN 978-5-91191-434-9**

**ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)**

ISBN 978-5-91191-436-3 (Ч. 2)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР включает избранные доклады по итогам Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Конференция посвящена различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированных систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанопластики, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности, в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по математическому моделированию в технике, экономике и менеджменте, антикризисному управлению, правовым проблемам современной России, автоматизации управления в технике и образовании, а также работы, касающиеся социокультурных проблем современности, экологии, мониторинга окружающей среды и безопасности жизнедеятельности.

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

**ISBN 978-5-91191-434-9**

**ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)**

© Том. гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2020

<b>Д.И. Дудник</b>	
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАЮЩИХ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР .....	208
<b>М.Н. Гаптарова, Д.К. Романенко, А.В. Шукин, А.С. Перин</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ СВЕТОВОГО ПУЧКА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА .....	211
<b>Т.Л. Григорян</b>	
ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ .....	215
<b>К.В. Короткова, К.П. Мельник</b>	
ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ КТР ..	218
<b>Е.В. Бакаулова, К.Б. Кемелханова, К.М. Мамбетова</b>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ .....	220
<b>П.К. Сафронова</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЕТОК БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ .....	224
<b>А.В. Михайленко, К.Г. Аксёнов</b>	
СПЕКТР ОПТИЧЕСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУРЫ GaN/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	227
<b>В.А. Горончко, М.М. Михайлов</b>	
ИЗУЧЕНИЕ ИК-СПЕКТРОВ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ZrO <sub>2</sub> .....	229
<b>М.М. Михайлов, О.А. Алексеева, А.Н. Лапин,</b>	
<b>С.А. Юрьев, В.В. Каранский</b>	
СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ BaTi <sub>(1-x)</sub> Zr <sub>x</sub> O <sub>3</sub> С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiO <sub>2</sub> .....	232
<b>В.В. Каранский</b>	
ВЛИЯНИЕ КВАНТОВ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА ZnO, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ SiO <sub>2</sub> .....	235

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.6**

### **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ**

*Председатель – Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Куксенко С.П., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

<b>А.А. Дроздова</b>	
СОЗДАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТА СЕТИ ПО MIL-STD-461 G ДЛЯ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ .....	239

<b>А.А. Дроздова</b>	
АНАЛИЗ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА .....	243
<b>С.Х. Карри, Р.С. Суровцев</b>	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЯЧЕЕК ДИСКРЕТИЗАЦИИ МОДЕЛИ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛНОВОЛНОВОГО АНАЛИЗА .....	247
<b>Д.В. Клюкин, А.А. Квасников</b>	
РАСЧЕТ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	251
<b>А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДРОССЕЛЕМ .....	254
<b>И.И. Николаев</b>	
СИЛОВАЯ ШИНА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С КОАКСИАЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ .....	257
<b>Р.С. Суровцев, А.В. Носов, Е.А. Сердюк</b>	
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ ПО АНАЛИТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ .....	260
<b>А.Е. Максимов, И.А. Онищенко</b>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ.....	263
<b>А.А. Синельников, А.В. Чуб, Е.С. Жечев</b>	
КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КОНЦАХ ПАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ .....	266
<b>И.А. Скорняков</b>	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА АМПЛИТУДУ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПАРЕ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ.....	269
<b>Е.С. Варзин, А.В. Носов</b>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.....	273

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.7**

### **СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

*Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;*

*зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент. каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

#### **К.Н. Афонин**

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО НАПРЯЖЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ НИТИ .....	277
--	-----

*Научное издание*

## **Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР**

**По материалам  
Международной научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Научная сессия ТУСУР–2020»**

**13–30 мая 2020 г., г. Томск**

**В двух частях**

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**  
Верстка **В.М. Бочкаревой**

---

Издательство «В-Спектр».  
Сдано на верстку 15.04.2020. Подписано к печати 15.05.2020.  
Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Печать трафаретная. Печ. л. 20,75  
Тираж 100 экз. Заказ 7.

---

Издано ТУСУР, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24  
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Издательство «В-Спектр».  
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24, т. 8 905 089 92 40  
E-mail: [bvm@sibmail.com](mailto:bvm@sibmail.com)

## РАСЧЕТ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Д.В. Клюкин, студент каф. ТУ;  
А.А. Квасников, аспирант каф. ТУ*

*Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, yuhoo11@mail.ru*

Расчет параметров линий передач является одним из важнейших этапов проектирования радиоэлектронных систем. В данной работе рассматривается один из методов расчета этих параметров – метод конечных элементов.

**Ключевые слова:** линии передачи, метод конечных элементов, погонные параметры.

С увеличением сложности радиоэлектронных средств (РЭС) увеличиваются затраты на их проектирование. Ключевыми элементами РЭС являются линии передачи. При их проектировании используются различные подходы и методы. В данной работе использован метод конечных элементов (МКЭ), являющийся одним из основных численных методов решения электромагнитных задач [1].

Цель данной работы – реализация алгоритма вычисления погонных параметров линии передачи.

Ранее авторами разработана программа для триангуляции двумерных структур произвольной сложности [2]. Для достижения поставленной цели функционал этой программы был доработан. Так, работа программы начинается с построения поперечного сечения линии передачи с использованием геометрических параметров и булевых операций. Пользователь выбирает одну из доступных фигур и строит её на графической сцене. После чего задаются граничные условия и, при необходимости, уточняется геометрия структуры. По окончании построения модели задаются параметры сетки и производится её триангуляция. Полученные треугольники, их вершины и заданные граничные условия используются для нахождения полной энергии модели, на основании которой вычисляются погонные параметры линии передачи. При этом емкостная матрица является первичной. Так, для однопроводных линий передачи погонная емкость вычисляется как

$$C = 2 \cdot W / U^2,$$

где  $W$  – полная энергия модели,  $U$  – потенциал проводника.

Для многопроводных линий передач полная энергия считается несколько раз, исходя из количества проводников, при этом формиру-



ется емкостная матрица. Элементы на главной диагонали вычисляются по формуле

$$C_{ii} = 2 \cdot W_{ii},$$

где  $W_{ii}$  – энергия, рассчитанная при установленном на  $i$ -м проводнике потенциале в 1 В и заземленных остальных проводников. Элементы матрицы  $C_{ij}$  ( $i \neq j$ ) вычисляются как

$$C_{ij} = W_{ij} - \frac{C_{ii} + C_{jj}}{2},$$

где энергия  $W_{ij}$  вычисляется при задании потенциала 1 В на  $i$ -м и  $j$ -ом проводниках [1].

Для тестирования программной реализации рассмотрены коаксиальная и двухпроводная микрополосковая линии передачи. Полученные результаты сравнены с результатами из работ [3–5] и результатами вычислений в программе ELCUT [6]. Геометрия моделей представлена на рис. 1.

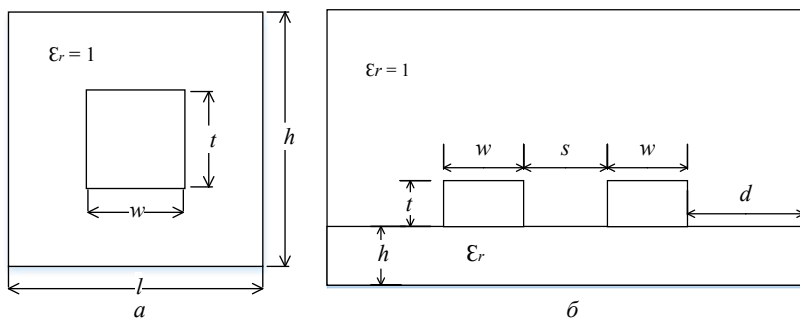


Рис. 1. Поперечные сечения коаксиальной (а) и двухпроводной микрополосковой (б) линий передач

Вначале выполнено сравнение на примере коаксиальной линии передачи, рис. 1, а (структура 1), при следующих параметрах:  $w$  и  $t$  – ширина и толщина проводника 1 мм;  $l$  и  $h$  – ширина и высота экрана 3 мм. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Для двухпроводной линии передачи (рис. 1, б) вначале выполнено сравнение на примере структуры с параметрами (структура 2): относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 2$ ,  $h$  – высота диэлектрического материала 1 мм,  $w$  – ширина проводника 3 мм,  $s$  – расстояние между проводниками 2 мм,  $t$  – толщина проводника 0,01 мм,  $d$  – расстояние до удаленных границ 16 мм. Результаты сведены в табл. 2.



Далее использована еще одна структура двухпроводной линии передачи (структура 3) с параметрами:  $\epsilon_r = 5,18$ ,  $h = 1,5$  мм,  $w = 2,35$  мм,  $s = 0,65$  мм,  $t = 0,035$  мм,  $d = 25$  мм. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Из представленных таблиц видно, что полученные результаты в целом согласуются с результатами из других источников. При вычислении емкостной матрицы поэлементная погрешность составила менее 3% для диагональных элементов и 8% для внедиагональных. По сравнению с экспериментальными данными из [5] погрешность составила 5,9%.

Таблица 1

**Погонная емкость ( $C$ , пФ/м), индуктивность ( $L$ , нГн/м)  
и волновое сопротивление ( $Z$ , Ом) структуры 1**

Источник	$C$	$L$	$Z$
Наш	56,315	0,197	59,19
[3]	55,057	0,202	60,63
ELCUT	54,809	0,203	60,81

Таблица 2

**Элементы емкостной матрицы (пФ/м) структуры 2**

Источник	$C_{11} = C_{22}$	$C_{12} = C_{21}$
Наш	96,45	-8,82
[4]	94,82	-8,26
ELCUT	94,30	-8,57

Таблица 3

**Элементы емкостной матрицы (пФ/м) структуры 3**

Источник	$C_{11} = C_{22}$	$C_{12} = C_{21}$
Наш	138,02	-22,36
ELCUT	135,40	-20,91
Метод моментов [5]	130,30	-22,7
Метод конформных отображений [5]	131,30	-23,60
Эксперимент [5]	136,15	-22,85

Таким образом, реализован алгоритм расчета матриц погонных параметров линий передачи на основе программы триангуляции двумерных структур. Полученные различия в результатах объясняются, по всей видимости, различием в использованных сетках (в указанных источниках отсутствуют сведения о качестве сетки, что затрудняет корректное сравнение). В дальнейшем планируется разработать алгоритм для построения неравномерной сетки, а также реализовать отображение напряженности электрического поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Özgün Ö., Kuzuoğlu M. MATLAB-based Finite Element Programming in Electromagnetic Modeling. – CRC Press, 2018. – 428 p.
2. Клюкин Д.В. Программа триангуляции двухмерных структур произвольной сложности // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2019: матер. VIII регион. науч.-практ. конф. – Томск, 2019. – Т. 2. – С. 540–542.
3. Musa S.M., Sadiku M.N.O Computation of electrical parameters for different conducting bodies using finite element method // COMSOL [Электронный ресурс]. Научные статьи и публикации. – URL: <https://www.comsol.ru/paper/computation-of-electrical-parameters-for-different-conducting-bodies-using-finit-5502> (дата обращения: 04.03.2020).
4. Musa S.M., Sadiku M.N.O. Using finite element method to calculate capacitance, inductance, characteristic impedance of open microstrip lines // Wiley Periodicals, Inc. Microwave Opt Technol Lett 50: 611–614, 2008.
5. Стручков С.М. Методика конформных отображений для моделирования полосковых линий передачи и проектирование устройств на их основе: дис. ... канд. тех. наук. – Томск, ТУСУР, 2016. – 148 с.
6. ELCUT – программа моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://elcut.ru/> (дата обращения: 04.03.2020).

УДК 621.396.669.8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДРОССЕЛЕМ

*А.М. Лакоза, магистрант каф. ТУ;*

*В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, аспиранты каф. ТУ*

*Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н., доцент  
г. Томск, ТУСУР, alexandrakoza@mail.ru*

Представлены частотные характеристики и конфигурации фильтров с разной компоновкой индуктивных элементов схемы. Выполнен сравнительный анализ.

**Ключевые слова:** гибридный дроссель, кондуктивные помехи, помехоподавляющий фильтр, балансные измерения.

Современная радиоэлектронная аппаратура восприимчива к электромагнитным помехам. Это связано с уменьшением расстояния между функциональными узлами и большим разнообразием модулей разного назначения, что ухудшает электромагнитную обстановку [1]. Одним из опасных факторов являются кондуктивные синфазные и дифференциальные помехи. Для их ослабления применяются помехоподавляющие фильтры на основе пассивных компонентов с сосредоточенными параметрами [2]. Синфазный и дифференциальные дроссели занимают большое пространство в схеме помехоподавляю-