

На правах рукописи



**Труфанова Наталья Сергеевна**

**КОМПОНЕНТЫ И СВЧ-УСТРОЙСТВА, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫЕ НА  
ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ ПРИНТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный руководитель:** **Артишев Сергей Александрович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР.

**Официальные оппоненты:** **Дунаевский Григорий Ефимович,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»;

**Кузьмин Сергей Викторович**  
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиотехнических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

Защита состоится «31» января 2025 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ТУСУР по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/unui6ne1> и в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.415.01  
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Современные тенденции развития антенных систем направлены на расширение рабочей полосы частот, повышение коэффициента усиления антенны и сокращение габаритных размеров. Отдельные узлы антенных систем выполняют на основе микрополосковых линий и резонаторов (микрополосковые антенны, фильтры, импедансные преобразователи, делители мощности, фазовращатели и т.д.).

Существуют различные методы и технологии, которые позволяют создавать более компактные, высокоэффективные и надежные антенные системы и СВЧ-узлы, что крайне важно в современных условиях, когда повышаются требования к функциональности и компактности при сохранении качества связи. Широкое применение в СВЧ-технике получила технология LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic), т.к. позволяет создавать сложные многослойные структуры, которые интегрированы в единую керамическую матрицу, что улучшает их механическую прочность и надежность.

Одним из ключевых аспектов технологии LTCC является применение трафаретной печати, когда функциональные пасты переносят ракелем через сетчатый шаблон для получения топологического рисунка. Трафаретная печать стала важным элементом в производстве электроники, начиная с 1960-х годов и до сих пор продолжает использоваться для создания высококачественных и надежных электронных устройств.

При этом трафаретная печать применяется не только в СВЧ-технике, но и при создании низкочастотных и сильноточных гибридных интегральных схем. Её развитие было результатом коллективных усилий в области науки и технологий, таких авторов, как В.Г. Красов, Г.Б. Петраускас, Ю.С. Чернозубов, М. Топфер, Ю.В. Исаев, В.Я. Подвигалкин, Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский М. Каултон, В.И. Вольман и др. Благодаря их вкладу в развитие толстопленочной технологии созданы конструкции высоконадежных СВЧ-устройств – разработаны новые линии передачи (щелевые и копланарные), новые топологии пассивных и активных элементов. Были получены значительные результаты в области разработки новых типов паст и подложек, композиций на основе металлоорганических и светочувствительных соединений.

Применение трафаретной печати сопряжено с рядом недостатков, таких как, дороговизна подготовки трафаретов и их совмещения; высокая трудоемкость операций; избыточный расход материалов; невозможность одновременного нанесения различных материалов.

Перспективной технологией является прямая печать материалов без применения трафаретов, например, поршневым или шнековым дозированием паст на подложку при помощи специализированных устройств (принтеров) непосредственно по цифровой модели. Применение данной технологии позволит

исключить изготовление трафаретов, снизит потери материала на формирование топологии, обеспечит возможность получения многослойных гибридных интегральных схем (ГИС) в одном технологическом цикле и сократит время изготовления, обеспечит возможность быстрого прототипирования ГИС.

### **Степень разработанности темы исследования**

В настоящее время работы, посвященные аддитивной принтерной технологии нанесения материала, находятся на стадии перехода от научных исследований к практическому внедрению (Sreenilayam S.P., Huang X., Li D., Lee J. и т.д.). Отечественные коллективы демонстрируют результаты за последние 10 лет преимущественно в области использования струйной печати (ink-jet) для формирования проводящих пленок на основе серебросодержащих или графеновых чернил на гибком основании, а также при формировании органических светоизлучающих диодов (Алешин А.Н., Филиппов Е.И., Адамантов И.Е., Гадиров Р.М., Малюгин Н.Д., Туев В.И., Здрок А.Е., и др.). В работах используются струйные принтеры как самостоятельно разработанные и адаптированные для печати функциональными материалами, так и коммерческие принтеры, такие как Dimatix Materials DMP-2850, Sonoplot GIX Microplotter II и т.д. За рубежом активно ведутся работы, направленные на создание оборудования для печати вязкими пастами: разработаны принтеры для изготовления печатных плат Voltera V-One, GPD Global Catalina и др. Изготовление многослойных ГИС по принтерной технологии вызывает ряд вопросов, связанных с совместимостью проводящих и диэлектрических материалов. Развитие принтерной технологии возможно при создании широкой номенклатуры функциональных паст с определенной вязкостью и температурой спекания. В мире лидирующие позиции по созданию подобных композиций занимают компании DuPont, ESL, Cermalloy и др. В России лидирующие позиции по разработке паст для трафаретной печати занимают компании Элма-пасты, Дельта-пасты и др. Однако на отечественном рынке не представлено паст, адаптированных для нанесения без применения трафаретов. Поэтому представляет интерес проведение исследования для создания собственных паст.

Результаты, полученные с использованием наиболее близких технических решений, реализующих печать пастами с высокой вязкостью, представляют собой изготовление одно- и двухсторонних печатных плат. Образцы СВЧ-фильтров и антенн X-диапазона представлены в работах следующих авторов: Naerinia M., Noghianian S., Correia, V., Mitra, K.Y., Correia, V., Mitra, K.Y., Castro, H., Rocha, J.G., Sowade, E., Vaumann, R.R., Лошилов А.Г., Здрок А.Е. В работах использованы низкотемпературные полимерные пасты. Существенным недостатком полученных образцов является слабая адгезия к подложке, а также высокое удельное сопротивление. Данные недостатки могут быть устранены при использовании материалов, предназначенных для трафаретной технологии печати (пасты с

высокой вязкостью), а значит, требуется разработка технологий и оборудования для их прямого нанесения по цифровому файлу.

**Целью работы является** исследование возможности применения аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств для применения в антенных системах.

**Основные задачи исследования:**

1. Аналитический обзор методов аддитивной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств;
2. Разработка и изготовление полосковых линий по аддитивной принтерной технологии и исследование их характеристик;
3. Численное моделирование процесса экструзии паст поршневым дозатором;
4. Разработка составов паст, пригодных для аддитивной принтерной технологии;
5. Изготовление СВЧ-устройств и компонентов по аддитивной принтерной технологии, экспериментальное исследование их частотных характеристик;
6. Разработка рекомендаций по совершенствованию аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

**Научная новизна**

1. Определено, что при проектировании микрополосковой линии с требуемым характеристическим сопротивлением, следует учитывать растекаемость паст на 50 мкм относительно диаметра используемого сопла.
2. С использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды описана математическая модель процесса экструзии паст, которая позволила определить граничные условия применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых проводников с достаточной однородностью геометрической формы при создании СВЧ-устройств.
3. Получены составы диэлектрических паст, вязкость которых адаптирована для использования в аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств.
4. С определенными технологическими режимами аддитивной принтерной технологии получены пассивные СВЧ-устройства, такие как фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью со средними вносимыми потерями менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот, включая L- и S-диапазоны.

**Теоретическая значимость работы**

Полученная в результате численного моделирования математическая модель процесса экструзии паст позволила определить технологические режимы их нанесения для получения полосковых линий с характеристическим сопротивлением в диапазоне до 97 Ом на керамической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 9,8$  и толщиной 1 мм.

### **Практическая значимость работы**

1. Полученные результаты показывают возможность применения технологии для изготовления СВЧ-устройств с L, S-диапазоном рабочих частот, в том числе с применением низкотемпературной спекаемой керамики (LTCC) без применения трафаретов.

2. Подобранные соотношения связующего материала и функционального порошка позволяют создавать диэлектрические, сегнетоэлектрические, ферритовые и другие пасты, адаптированные для аддитивной принтерной технологии.

3. Прецизионное дозированное нанесение пасты позволяет проводить коррекцию расчетных индуктивных и емкостных параметров распределенных элементов для настройки СВЧ-узлов.

4. Сформулированы рекомендации по применению аддитивной принтерной технологии для однородного нанесения топологии полосковых устройств без применения трафаретов.

5. Полученные технологические режимы, а также рекомендации по оптимизации аддитивной принтерной технологии использованы при разработке опытного образца технологической установки изготовления керамических печатных плат в интересах АО «НПЦ «Полус», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

6. Разработанные и напечатанные образцы планарных компонентов используются в учебном процессе подготовки бакалавров при выполнении лабораторных работ на кафедре конструирования узлов и деталей РЭА Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

### **Методология и методы исследования**

В работе использован комплексный подход, включающий в себя анализ научных и технических источников, охватывающих область исследования, математическое моделирование, экспериментальные исследования, экстракцию параметров по данным измерений с использованием моделей микрополосковых линий.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Получено технологическое ограничение применения аддитивной принтерной технологии для изготовления СВЧ-устройств, которым является скорость линейного перемещения дозатора в диапазоне 300–500 мм/мин с использованием сопла диаметром 100 мкм, что позволяет изготавливать однородные полосковые линии шириной от 150 мкм с обеспечением характеристического сопротивления в диапазоне до 97 Ом и вносимыми потерями не более 1,5 дБ/м на керамической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 9,8$  и толщиной 1 мм.

2. На основе численного моделирования экструзии паст с использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды показана возможность изготовления однородных в поперечном сечении полосковых линий в режиме непрерывного нанесения пасты с вязкостью 50–100 Па·с при расстоянии между соплом и подложкой 0,1 мм.

3. Достигнутое качество нанесения материала позволяет использовать аддитивную принтерную технологию для изготовления как однослойных, так и многослойных компонентов и СВЧ-узлов, рассчитанных на L- и S-диапазоны рабочих частот со средними вносимыми потерями менее 1 дБ и возможностью использования в качестве промежуточных слоев функциональных паст, обладающих магнитными, диэлектрическими или сегнетоэлектрическими свойствами.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов исследования подтверждена применением известных численных методов и согласованностью результатов, полученных в программных средствах и экспериментально. Достоверность измеренных частотных характеристик и первичных параметров подтверждается использованием поверенных средств измерения.

### **Апробация результатов**

Апробация основных результатов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах. Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях: «Научная сессия ТУСУР» 2021–2023; «Электронные средства и системы управления» 2021, 2022; 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).

Результаты диссертации прошли экспертную оценку в составе отчетов по выполнению гос. задания по проекту FEWM-2022-0005 Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Разработка и исследование технологии аддитивного принтерного изготовления функциональных узлов и элементов интегральной электроники».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 28 работ, в т.ч. 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 10 статей индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science, 15 работ, опубликованы в материалах международных конференций. Получено 3 свидетельства регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад**

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, получены автором лично. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем С.А. Артищевым. На основе разработанных автором рекомендаций коллективом инженеров лаборатории печатной электроники разработан макет принтера.

### **Структура и объем диссертации**

В состав диссертации входят введение, 3 раздела, заключение, список литературы, состоящий из 101 наименования. Объем диссертации – 161 с., в т.ч. 127 рис. и 12 табл.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, приведены сведения о научной новизне и практической значимости, а также определены основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** рассмотрены достижения и перспективы применения аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств. Применение данной технологии для изготовления гибридных интегральных схем и устройств набирает популярность за счет снижения временных затрат на прототипирование и получение готовых изделий. Ведутся исследования в области струйной печати, однако при использовании этой технологии возможно формирование только тонкопленочных элементов толщиной до 1 мкм. По технологии струйной печати известны примеры исследований изготовления RFID-меток, антенн разного типа: меандровые, двухдиапазонные, монополюсные, дипольные, сверхширокополосные и др (Kim S., Cook B.S., Fang Y., Tentzeris M.M., Shaker G.).

Для получения толстопленочных элементов применяются принтеры на основе поршневой, шнековой и пневматической экструзии паст. Состав и характеристики паст для поршневой и шнековой экструзии существенно отличаются от чернил, применяемых для струйной печати, а также от паст для трафаретной печати. Основное отличие заключается в размерах и концентрации твердых частиц, а также в вязкости материала.

Однако, аддитивная технология, как и любое другое направление развития науки и техники, для успешного внедрения требует решения ряда задач. Трудности реализации принтерной технологии изготовления компонентов и устройств в производстве вызваны техническими требованиями, предъявляемыми к готовому устройству: проводимость, химическая и термическая стойкость, адгезионная прочность и др.

**Во втором разделе** приведены исследования применимости аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств. Изготовление СВЧ-устройств и компонентов проводилось с использованием принтера Voltera V-One, принцип работы которого основан на непрерывном поршневом дозировании материала через сопло с малым внутренним диаметром. Перемещение поршневого дозатора системой позиционирования по координатам, заданным цифровым файлом, позволяет создавать рисунок на поверхности подложки.



Исследование полосковых проводников проводилось путем анализа частотных характеристик микрополосковой линии (МПЛ). Для печати использовались проводящая паста ПСП-2 и сопло диаметром 225 мкм. Анализ частотных характеристик МПЛ осуществлялся по следующей методике.

1. Разработка конструкции модели МПЛ в САПР с целью учета влияния параметров материала.
2. Изготовление тестовых образцов по аддитивной принтерной технологии.
3. Измерение частотных характеристик напечатанных образцов и сравнительный анализ измеренных характеристик с результатами моделирования
4. Подбор параметров модели для достижения соответствия с измеренными характеристиками.
5. Анализ полученных зависимостей.

Напечатанная МПЛ и сравнение модуля коэффициента передачи модели и образца МПЛ приведены на рисунке 1.

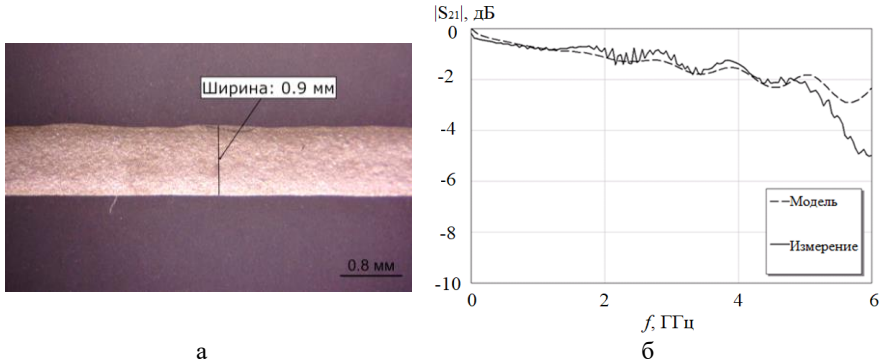


Рисунок 1 – Напечатанная МПЛ (а) и график сравнения коэффициента передачи модели МПЛ и изготовленного образца (б)

Для настройки модели была проведена корректировка таких частотных параметров, как затухание, относительная эффективная диэлектрическая проницаемость и характеристическое сопротивление. На рисунке 1, б представлен график сравнения коэффициента передачи изготовленного образца и модели МПЛ с параметрами, подобранными с учетом свойств пасты, используемой при печати.

Для исследования частотных параметров МПЛ были выбраны проводящие высокотемпературные пасты ПП-17 и ППС-2-2 (ООО «Элма-Пасты», Россия) для трафаретной печати и низкотемпературная проводящая паста Conductor 2 («Voltera», Канада), разработанная для прямой печати (рисунок 2). В соответствии с техническими условиями спекание паст ПП-17 и ППС-2-2 проводилось при температуре 850 °С в течение 7 минут. Спекание Conductor 2 проводилось при температуре 180 °С в течение 30 минут.

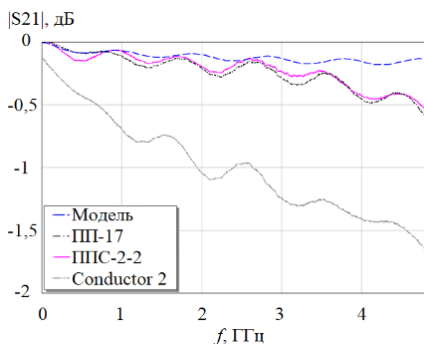


Рисунок 2 – Модуль коэффициента передачи напечатанных МПЛ

Как видно из рисунка 2, для частотных зависимостей модели и образцов МПЛ, напечатанных высокотемпературными пастами, наблюдается совпадение характеристик в диапазоне до 3 ГГц. Коэффициент передачи МПЛ, напечатанной пастой Conductor 2, имеет большее затухание по сравнению с МПЛ, напечатанными высокотемпературными пастами.

По результатам экстракции были получены параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Частотные параметры МПЛ изготовленных из проводящих паст

Параметр	Проводящие пасты		
	ПП-17	ППС-2-2	Conductor 2
Характеристическое сопротивление, Ом	42,8	42,5	46,4
Относительная эффективная диэлектрическая проницаемость	7,9		
Затухание, дБ/м	1,6	1,5	10,4

При сравнении полученных значений можно сделать вывод о том, что наименьшее затухание наблюдается у МПЛ, напечатанной пастой ППС-2-2. Затухание в МПЛ, напечатанной пастой ПП-17, близки к потерям МПЛ, напечатанной пастой ППС-2-2. Наибольшее затухание обнаружено у МПЛ, напечатанной низкотемпературной пастой Conductor 2. Потери в такой пасте составляют 10,4 дБ/м.

Для определения разрешающей способности аддитивной принтерной технологии была разработана тестовая плата. Тестовая плата включает массив проводников для оценки достигаемых минимальных размеров по ширине, зазору между элементами и толщине (рисунок 3). Отдельно на плате располагается область для определения коэффициента перекрытия при формировании полигонов. Также на разработанной плате предусмотрены проводники для оценки толщины при увеличении количества проходов.

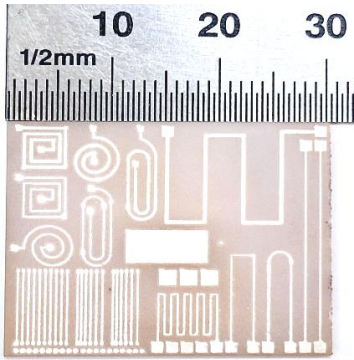


Рисунок 3 – Напечатанный образец

Для печати разработанной платы использовались сопла с внутренним диаметром 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм и керамическая подложка со шлифованной поверхностью ВК-100. В результате было определено, что при использовании сопла диаметром 100 мкм минимальная ширина составляет 150 мкм и толщина 15 мкм. При этом было установлено, что растекание пасты составляет 50 мкм и коэффициент перекрытия при формировании полигонов должен быть 50%. При измерении геометрических размеров проводников

было выявлено, что разброс по ширине проводника составляет не более  $\pm 10$  мкм. При этом отклонение характеристического сопротивления составляет не более  $\pm 1,5$  Ом.

Для формирования структуры напечатанных проводников необходимо понимать процесс образования непрерывного и равномерного потока пасты, ее выхода из сопла и распределение по подложке. На качество проводников влияет давление, создаваемое в шприце, скорость перемещения дозатора и расстояние между соплом и подложкой. Скорость экструзии паст зависит от реологических характеристик, таких как: вязкость, плотность, смачивание, и т.д. На изменение вязкости паст может влиять температура окружающей среды или высокие импульсы давления, которые могут изменить скорость вытекания в процессе экструзии.

Скорость перемещения дозатора должна согласовываться с линейной скоростью вытекания пасты из сопла. Слишком высокая скорость потока, по сравнению со скоростью перемещения дозатора, приведет к чрезмерным деформациям формируемых проводников и, наоборот, к разрывам проводника. При этом псевдопластичный характер поведения пасты усложняет процесс подбора режимов печати, поскольку при экструзии на некотором расстоянии от сопла вязкость пасты повышается, вследствие чего растекание по подложке ухудшается. Таким образом, необходимо понимать от каких параметров системы зависит процесс экструзии. Исследование данного процесса можно проводить экспериментально, или с помощью численного моделирования. Как правило, экспериментальное получение зависимостей печатающей системы от ее параметров и внешних характеристик является трудоемким, в первую очередь, с точки зрения времени, поэтому оно осуществляется для получения необходимых характеристик (таких как зависимости вязкости пасты от скорости сдвига) и проверки результатов численного моделирования.

При проведении численного моделирования процесса экструзии паст использовалось уравнение Навье-Стокса для двухфазной среды.

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_\theta \quad (1)$$

где  $\vec{v}$  – скорость жидкости в точке пространства (поле скоростей),  $\rho$  – плотность,  $\nabla$  – оператор Набла,  $p$  – давление,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\mathbf{K}$  – тензор вязких напряжений,  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения,  $\vec{F}_\sigma$  – объемная сила, соответствующая поверхностному натяжению,  $\vec{F}_\theta$  – сила, направленная по нормали к поверхности паста-воздух.

С помощью данного уравнения были получены зависимости вязкости, скорости и избыточного давления от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты (рисунок 4, а–в) и от радиальной координаты для различных значений расстояний до сопла (рисунок 5, а–в) для пасты при ее экструзии из сопла со скоростью подачи пасты  $\vec{v} = 1,3$  мкм/с.

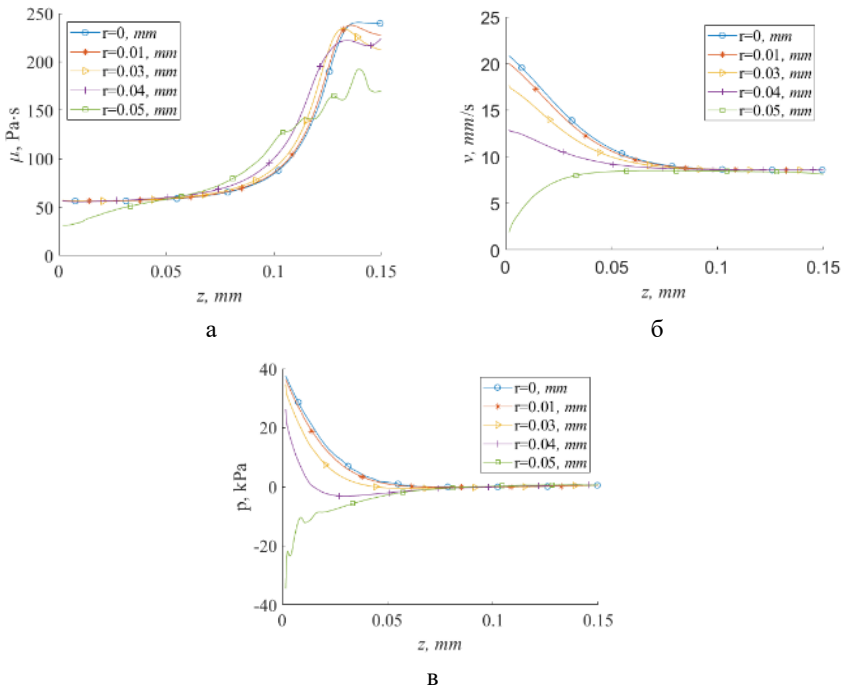


Рисунок 4 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты

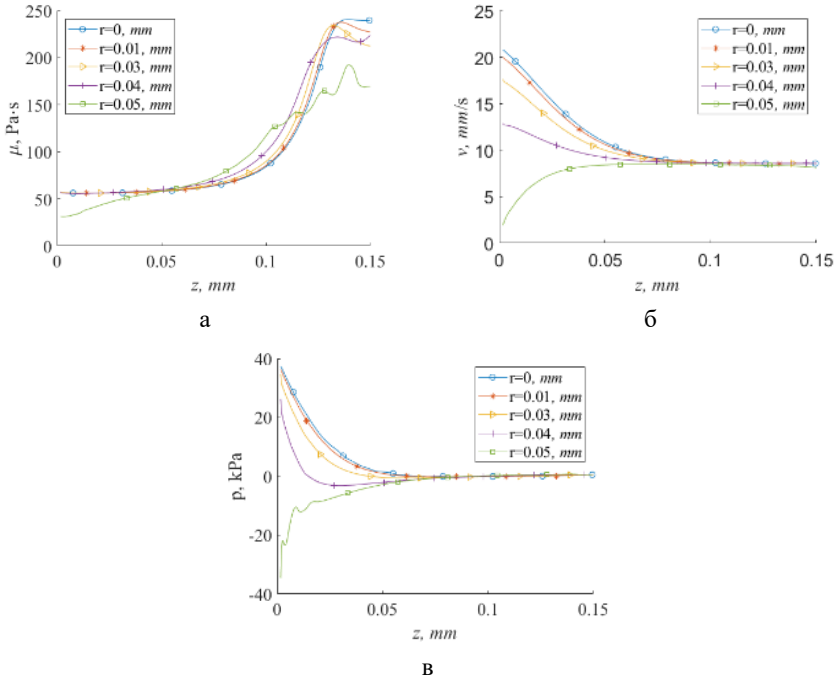


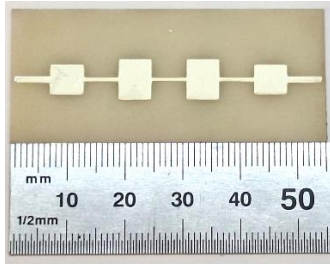
Рисунок 5 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от радиальной координаты для различных значений расстояний до сопла

Полученные зависимости показывают, что для достижения непрерывного и однородного потока необходимо печатать пастой с вязкостью 50–100 Па·с при скорости 300–500 мм/мин и при расстоянии 0,1 мм между соплом и подложкой.

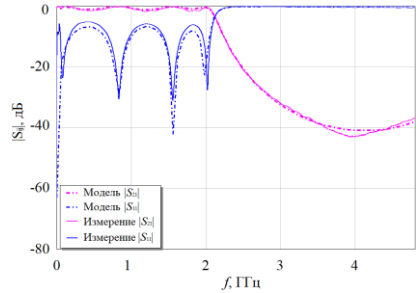
**В третьем разделе** представлены исследования компонентов и полосковых устройств, изготовленных по аддитивной принтерной технологии. Полученные значения затухания были применены при расчете микрополосковых фильтров. Микрополосковые фильтры представляют собой систему взаимодействующих резонаторов, каждый из которых, в свою очередь, представляет собой отрезок полосковой или микрополосковой линии. Наибольшее применение нашли открытые (неэкранированные) микрополосковые резонаторы. Для изготовления фильтров была выбрана паста ППС-2-2, которая обладает наименьшим затуханием.

Были проведены расчеты фильтров разного назначения – фильтр нижних частот (ФНЧ), фильтр верхних частот (ФВЧ) и полосно-пропускающий фильтр (ППФ). На рисунке 6, а показан напечатанный микрополосковый ФНЧ со ступенчатым импедансом. При сравнении результаты измерения оказались схожи с результатами моделирования. Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 1,5 дБ. Однако наблюдается незначительное смещение по

частоте. Предположительно это может быть связано с изменением геометрических размеров при печати за счет растекания пасты. Для подтверждения данного заключения были проведены измерения ширины резонансных элементов топологического рисунка. В результате ширина изменилась на 0,1 мм. Полученные значения были внесены в модель и результат скорректированной модели приведен на рисунке 6, б.



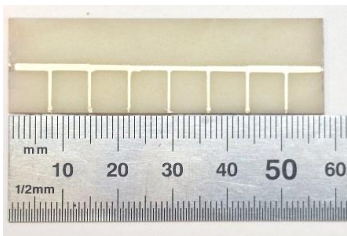
а



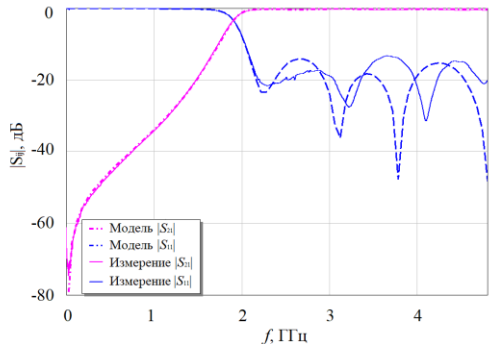
б

Рисунок 6 – Напечатанный ФНЧ (а) и сравнение частотных характеристик модели и напечатанного образца (б)

Далее был изготовлен ФВЧ в микрополосковом исполнении, выполненный в виде резонансных элементов, на концах которых предусмотрены переходные отверстия на заземляющее основание (рисунок 7, а). Для упрощения технологии изготовления и для получения ФВЧ в одном технологическом цикле было принято решение исключить переходные отверстия, а связь между резонаторами и заземляющим основанием обеспечить путем нанесения пасты на торце подложки.



а



б

Рисунок 7 – Напечатанный ФВЧ (а) и сравнение частотных характеристик модели и напечатанного образца (б)

Измеренные частотные характеристики отличаются от характеристик, полученных при проектировании фильтра. Данное отличие связано с тем, что при

проектировании не было учтено увеличение длины резонаторов. Растекание пасты также привело к увеличению ширины резонаторных элементов. Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 0,3 дБ. Результат корректировки модели показан на рисунке 7, б. Как видно из рисунка 7, б, корректировка геометрических размеров позволила добиться совпадения экспериментальных и расчетных характеристик.

Для проектирования ППФ была выбрана структура с краевой связью. Фильтр был спроектирован на центральную частоту 2,4 ГГц и ширину полосы пропускания 0,2 ГГц (рисунок 8).

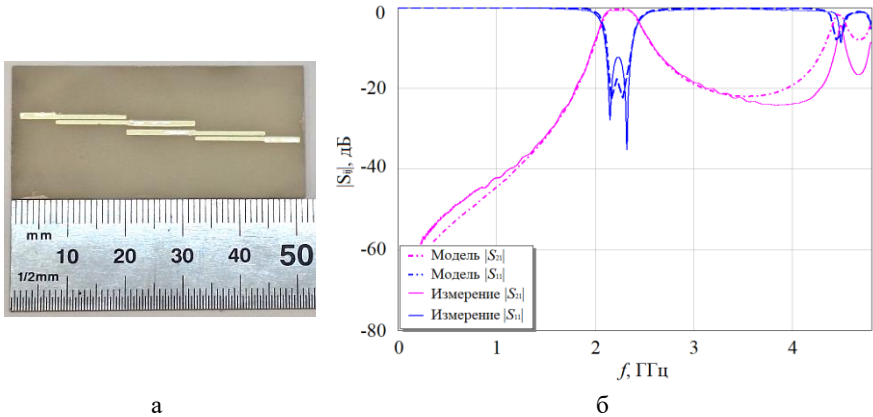
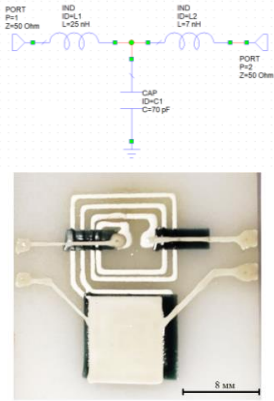


Рисунок 8 – Напечатанный ППФ (а) и сравнение частотных характеристик модели и напечатанного образца (б)

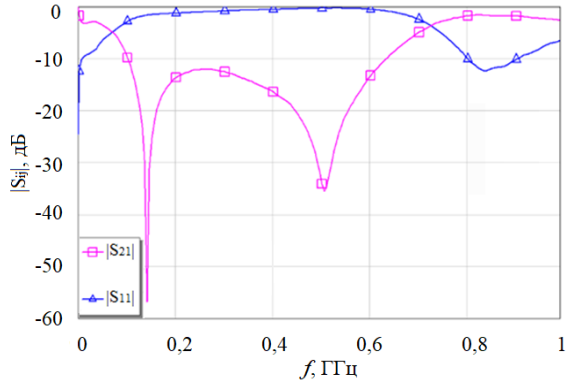
Результаты сравнения показывают, что частотная зависимость напечатанного фильтра имеет смещение центральной частоты на 0,1 ГГц. Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 0,5 дБ. При анализе геометрических размеров напечатанного ППФ было выявлено, что растекание пасты привело к увеличению ширины резонаторов, что соответственно повлияло на зазор между ними. При корректировке геометрических размеров в модели получилось добиться схожести графиков экспериментальных и расчетных характеристик (рисунке 8, б).

При сравнении напечатанных фильтров выявлено, что измеренные частотные характеристики показывают расхождение и смещение относительно расчетной центральной частоты на 0,1 ГГц. Анализ геометрических размеров показал, что данное расхождение обусловлено растеканием пасты.

Были проведены экспериментальные исследования ФНЧ на основе Т-образного звена с использованием сосредоточенных компонентов в планарном исполнении (рисунок 9). При расчете ФНЧ задавалась частота среза 0,1 ГГц.



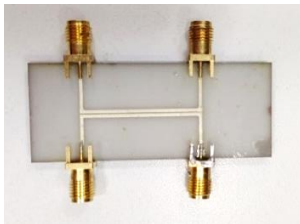
а



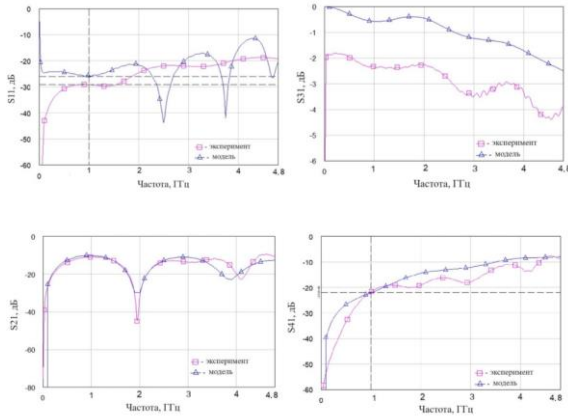
б

Рисунок 9 – Напечатанный LC-фильтр (а) и его частотные характеристики (б)

С помощью аддитивной технологии изготовлен направленный ответвитель (НО) на микрополосковых связанных линиях (СЛ) передачи с боковым типом связи. На рисунке 10 представлен внешний вид изготовленного НО.



а



б

Рисунок 10 – Напечатанный НО (а) и его частотные характеристики (б)

Результаты сопоставления экспериментальных частотных зависимостей с расчетными показывают удовлетворительное совпадение графиков частотных характеристик полученного направленного ответвителя.

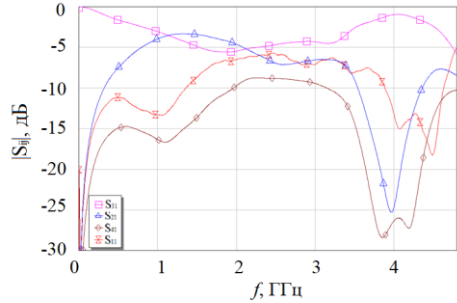
Также интерес представляет изготовление широкополосного НО. Для реализации такого НО в конструкции использованы связанные линии с переменной боковой связью в сочетании с сильной лицевой связью, обеспеченной



размещением проводников друг над другом через диэлектрик толщиной 30 мкм. Напечатанный НО и его частотная характеристика показана на рисунке 11.



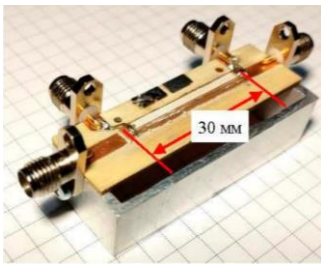
а



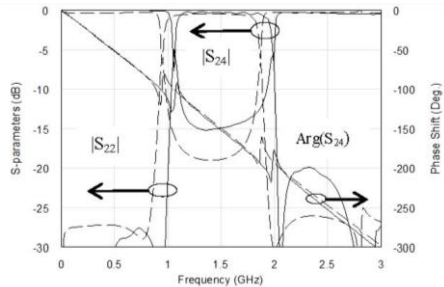
б

Рисунок 11 – Напечатанный НО с боковой и лицевой связью (а) и его частотные характеристики (б)

Были проведены экспериментальные исследования поперечно-направленного ответвителя на связанных линиях. Конструкция исследуемого поперечно-направленного ответвителя (ПоНО) на СЛ изображена на рисунке 12. На рабочих частотах сигнал не доходит прямо до конца (порт 4) возбуждаемой опорной линии (порт 2), а уходит поперек во вторую верхнюю линию – на ее ближний и дальний концы (порты 1 и 3); отсюда и название «поперечно-направленный». Это достигается только в структурах с сильно неоднородным диэлектриком, где проницаемости различаются более чем в 10–16 раз и обеспечивается трехкратное отношение скоростей нормальных волн.



а



б

Рисунок 12 – Фото макета ПоНО на СЛ (а). Рассчитанные (штриховые) и измеренные (сплошные) частотные зависимости возвратных  $|S_{22}|$  и вносимых  $|S_{24}|$  потерь и вносимой фазы  $\arg(S_{24})$  опорной линии при ненагруженной верхней линии (б)

Были проведены исследования по применению аддитивной принтерной технологии для изготовления керамических печатных плат. Была проведена печать керамической печатной платы (КПП). Топология платы имеет несколько

элементов, в том числе монтажные контакты для микросхемы и чип-резисторов, меандровые линии с различной шириной, ряды внешних контактных площадок с двух сторон платы. На рисунке 13, представлен результат изготовления тест-платы с использованием пасты ПСП-2.

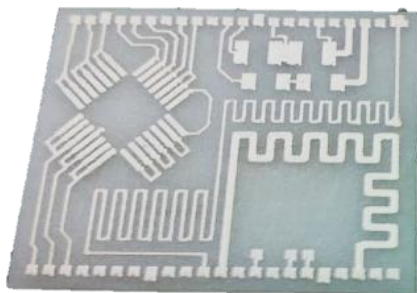


Рисунок 13 – Напечатанная тест-плата

Далее были проведены испытания изготовленной тест-платы на соответствие техническими требованиями на КПП, используемым на предприятии АО «НПЦ «Полюс». Результат сопоставления представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Результат испытаний тест-платы

Параметр	Технические требования	Значение фактическое
Удельное поверхностное сопротивление, мкОм/□	2,5–7,0	~2
Электрическое сопротивление между проводниками, Ом	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^8$
Адгезия проводников, кГС/мм <sup>2</sup>	1,2	1,8

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что полученные КПП соответствуют техническим требованиям.

Для исследования возможности изготовления многослойных структур была разработана двуслойная тестовая плата, в которой два проводящих слоя разделены диэлектрическим слоем. При этом в топологии предусмотрены переходы электрических проводников с одного слоя на другой. Общий вид платы представлен на рисунке 14.

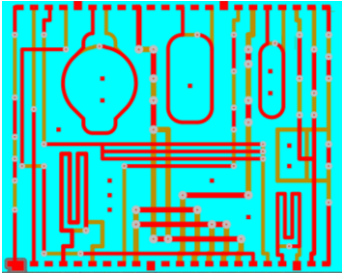


Рисунок 14 – Двухслойная плата

Для изготовления многослойной платы на первый напечатанный слой после спекания необходимо наносить промежуточный диэлектрический слой. При этом существует перепад высоты из-за толщины пленки первого слоя, который может приводить к появлению дефектов нанесения диэлектрического слоя. При печати было выявлено, что после нанесения диэлектрического слоя необходимо отдельной итерацией наращивать контактные площадки для выравнивания толщины.

При печати второго проводникового слоя растекание пасты по диэлектрику увеличилось по сравнению с подложкой, что связано с меньшей шероховатостью диэлектрического слоя после спекания. Исходя из этого предложено корректировать алгоритм нанесения последующих слоев.

На основе сформулированных рекомендаций по нанесению проводниковых и диэлектрических паст был разработан макет технологической установки для изготовления как отдельных компонентов, так и СВЧ-узлов, в том числе многослойных, для применения в антенных системах.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе содержится решение проблемы получения однородных и непрерывных полосковых линий по аддитивной принтерной технологии для создания компонентов и узлов антенных систем. Получены следующие основные результаты.

Определено, что при проектировании микрополосковой линии с требуемым характеристическим сопротивлением следует учитывать растекаемость паст на 50 мкм относительно диаметра используемого сопла.

С использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды описана математическая модель процесса экструзии паст, которая позволила определить граничные условия применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых проводников с достаточной однородностью геометрической формы при создании СВЧ-устройств.

Получены составы диэлектрических паст, вязкость которых адаптирована для использования в аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

Показано, что применение параметров, полученных при экстракции, а также учитывая растекание пасты при проектировании СВЧ-устройств, позволило обеспечить совпадение частотных характеристик модели и напечатанных фильтров нижних/верхних частот и полосно-пропускающих.

Предложена и реализована новая структура, совмещающая функции квадратурного моста и трансформатора импеданса, построенная на импеданс-трансформирующем поперечно-направленном ответвителе на основе несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком. Многослойная структура состоит из микрополосковой линии на органической подложке ( $\epsilon_r=3,4$ ) с накладным керамическим бруском, имеющим высокую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_r=46$ ), на котором линии с горизонтальной лицевой связью, имея трехкратное отношение скоростей нормальных волн, поддерживают режим поперечной направленности и двукратную трансформацию импеданса.

С определенными технологическими режимами аддитивной принтерной технологии получены пассивные СВЧ-устройства, такие как фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью со средними вносимыми потерями менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот, включая L, S-диапазоны. Показана возможность применения аддитивной принтерной технологии для изготовления однослойных и многослойных печатных плат.

Вышесказанное позволяет утверждать, что в работе решена задача обеспечения возможности применения аддитивной принтерной технологии для создания, прототипирования и топологической настройки толсто пленочных компонентов и СВЧ-узлов, что вносит существенный вклад в развитие сферы аддитивного производства электроники и СВЧ-техники для применения в антенных системах.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Труфанова Н.С. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления многослойных печатных плат / Н.С. Труфанова, Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, А.Г. Лошилов // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2022. – Т. 14. – № 4.– С. 37–44.
2. Сычев А.Н. Поперечно-направленный ответвитель на связанных линиях с накладным керамическим бруском / А.Н. Сычев, С.А. Артищев, Н.Ю. Рудый, Н.С. Труфанова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. – Vol. 7. – № 3. – pp. 473–484.
3. Михайлов М.М. Оптические свойства и радиационная стойкость печатного покрытия на основе серебра. М.М. Михайлов, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, С.А. Артищев, В.А. Горончко, Н.С. Труфанова, Д.С. Федосов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2023. – Т. 66. – № 10. – С. 23–30

### **Публикации, индексируемые в Scopus и WoS**

4. Trufanova N.S. Technique for extraction of electric frequency parameters of conductive ink / N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, E.R. Ragimov, A.G. Loschilov,

A.M. Malyshenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2291. – №. 1. – pp. 012015.

5. Loschilov A.G. Expanding the horizon of additive printing technologies application in the technique of coupled strip lines with heterogeneous dielectric filling / A.G. Loschilov, T. T. Thanh, G. A. Malyutin, N. S. Trufanova et al. // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – pp. 256–261.

6. Trufanova N.S. Manufacturing of Hybrid Integrated Circuits Using Additive Printer Technology / N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, A.G. Loschilov, E.R. Ragimov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – pp. 1–5.

7. Mikhailov M.M. On the possibility of obtaining thermal control coatings for spacecraft by printing / M.M. Mikhailov, A.N. Lapin, S.A. Yuryev, V.A. Goronchko, S.A. Artishchev, N.S. Trufanova, O.A. Mikhailova, D.S. Fedosov // *Materials Chemistry and Physics*. – 2023. – Vol. 310. – pp. 128472.

8. Gadirov R.M. Numerical modeling of the process of extrusion of high-viscosity pastes / R.M. Gadirov, A.V. Borisov, N.S. Trufanova, E.R. Ragimov, S.A. Artishchev // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2024. – V. 21. – № 1(47). – pp. 114–123.

9. Gadirov R.M. Simulation of extrusion of high-viscosity pastes by a piston dosing mechanism / R.M. Gadirov, A.V. Borisov, N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, A.G. Loschilov // *Russian Physics Journal*. – 2024. – V. 67. – pp. 179–187.

10. Trufanova N.S. Focusing of a paste flow upon exposure to an external electromagnetic field / N.S. Trufanova, A.V. Borisov, R.M. Gadirov, S.A. Artishchev, E.R. Ragimov // *Russian Physics Journal*. – 2024. – V. 67. – № 2. – P. 229–235.

#### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669436 Российская Федерация. Программа для управления блоком питания гальванической ванны: № 2022668144: заявл. 07.10.2022: опубл. 20.10.2022 / С.А. Артищев, И.Г. Ковалев, Н.С. Труфанова, С.А. Айрих.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688146 Российская Федерация. Программное обеспечение для управления инфракрасной камерой спекания печатных плат, изготовленных аддитивным методом: № 2023687527: заявл. 13.12.2023: опубл. 20.12.2023 / Э.Р. Рагимов, Н.С. Труфанова, С.А. Артищев, Р.М. Гадиров.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665740 Российская Федерация. APCB Printer v. 2.1.1: № 2024662982: заявл. 10.06.2024: опубл. 05.07.2024 / С.А. Артищев, И.М. Макаров, К. Логинов, Н.С. Труфанова, Э.Р. Рагимов.

**Материалы конференций**

14. Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Определение пропускной способности поршневого дозатора проводящих паст // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №. 1-1. – С. 157–160.

15. Труфанова А.С., Труфанова Н.С. Исследование технологии изготовления диэлектрической пасты // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2021». – Томск: Издательство "В-Спектр". – 2021. – Ч. 1. – С. 165–168.

16. Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Исследование возможности изготовления планарных компонентов методом принтерной печати // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2020». – Томск: Издательство "В-Спектр". – 2021. – Ч. 1. – С. 162–164.

17. Труфанова Н.С., Артищев С.А. Методика экстракции электрических частотных параметров проводящих чернил // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции, Брянск, 21–22 октября 2021 года. – Брянск: Новый формат, 2021. – С. 54–57.

18. Чепко Т.А., Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Изготовление диэлектрических паст с заданными характеристиками // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2021. – С. 154–157.

19. Труфанова Н.С. Переходные отверстия многослойных печатных плат по аддитивной принтерной технологии / Н. С. Труфанова, С.А. Артищев, А.В. Черкашин // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2023. – С. 199–203.

20. Рагимов Э.Р. Оценка производительности двухэкструдерной системы дозирования вязких паст / Э.Р. Рагимов, Н.С. Труфанова, А.Т. Игнатьева, С.А. Артищев // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2023. – С. 203–206.

21. Рагимов Э.Р., Труфанова Н.С., Артищев С. А. Разработка принтера для изготовления печатных плат аддитивным методом с применением прецизионного устройства дозирования материалов // Сборник статей XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – 2023. – С. 257–259

Тираж 100. Заказ № \_\_\_\_.  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822)533180.