**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ПИШ

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.Г. Лощилов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_ 2024 г.

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ РАБОТА № 1**

**«****Программно-аппаратный комплекс для измерения параметров и построения моделей СВЧ транзисторов»**

реализуемая молодежной проектной командой в рамках программы развития

Передовой инженерной школы

«Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева

Научный руководитель проекта \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Е.Ю. Харитонов

Согласовано:

Заместитель директора ПИШ

по науке \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.В. Медовник

Заместитель директора ПИШ

по образованию \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Ю.В. Шульгина

Томск, 2024

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТЕ**

1. **Аннотация проекта**

Системы и стандарты связи непрерывно развиваются и усложняются. Проектирование узлов таких систем является сложной инженерной задачей, решение которой связано с учетом множества противоречивых условий. Например, к усилителям мощности для современных систем связи предъявляются строгие требования в части линейности, многоканальности, полосы пропускания и т.д. В то же время необходимо обеспечить высокие показатели выходной мощности и КПД, которые достижимы только в нелинейных режимах работы СВЧ транзистора, как базового элемента усилителя. В процессе разработки узлов радиоэлектронных систем широко применяются современные системы автоматизированного проектирования (САПР). Для эффективного использования САПР в процессе проектирования требуется наличие точных моделей всех радиоэлектронных компонентов, а в особенности СВЧ транзисторов. Зарубежные производители транзисторов предоставляют потребителю модели своих транзисторов для САПР, однако в условиях жесткой санкционной политики в отношении Российской Федерации требуется не только развитие технологий производства мощных СВЧ транзисторов, но и технологий создания их высокоточных моделей для САПР.

Основной целью проекта является создание технологии построения моделей СВЧ транзисторов, позволяющей на основе измерений выполнить экстракцию параметров моделей, их интеграцию в САПР, а также последующую верификацию и валидацию. Дополнительной целью проекта является развитие научно-технического задела в области высокоточных измерений параметров элементов электронной компонентной базы (ЭКБ), а также развитие научно-образовательного комплекса, направленного на решение задач, поставленных предприятиями реального сектора экономики.

Для достижения основной цели сформулированы следующие задачи:

1) Провести анализ современных технологий производства СВЧ транзисторов, их особенностей и номенклатуры параметров конечных изделий;

2) Определить оптимальный тип модели и выявить особенности экстракции ее параметров;

3) Определить требования к составу и характеристикам измерительного оборудования для экстракции, верификации и валидации моделей СВЧ транзисторов для САПР;

4) На примере одного или нескольких опытных образцов транзисторов разработать программу и методики измерений для целей экстракции параметров выбранной модели;

5) Выполнить экстракцию параметров модели и интеграцию в одну из наиболее распространенных САПР;

6) Разработать программу и методики верификации и валидации модели.

1. **Описание конечного продукта/результатов проекта**

В результате выполнения проекта будут разработаны:

1) Измерительный комплекс для экстракции, верификации и валидации параметров моделей мощных СВЧ транзисторов;

2) Специальная оснастка для выполнения измерений и калибровки;

3) Методики измерений и калибровки;

4) Программное обеспечение для экстракции параметров модели.

1. **Ключевые слова**

СВЧ транзистор, измерения, система связи, усилитель, модель

1. **Направление исследований и разработок**

|  |  |
| --- | --- |
| Н1. Цифровые технологии |  |
| Н2. Медицина и технологии здоровьесбережения |  |
| Н3. Новые материалы и химические технологии |  |
| Н4. Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии | + |
| Н5. Биотехнологии |  |
| Н6. Ресурсосберегающая энергетика |  |

1. **Классификация работы**

|  |  |
| --- | --- |
| НИР поисковая |  |
| НИР прикладная | + |
| ОКР |  |
| ОТР |  |
| Разработка ПО |  |

1. **Приоритетные направления**

|  |  |
| --- | --- |
| Науки о жизни |  |
| Индустрия наносистем | + |
| Информационно-телекоммуникационные системы |  |
| Рациональное природопользование |  |
| Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика |  |
| Транспортные и космические системы |  |

1. **Направление в рамках Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации**

|  |  |
| --- | --- |
| а) переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта | + |
| б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии |  |
| в) переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, в том числе за счет рационального применения лекарственных препаратов (прежде всего антибактериальных) |  |
| г) переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработку и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания |  |
| д) противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства |  |
| е) связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики |  |
| ж) возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук |  |
| з) исследования в области понимания процессов, происходящих в обществе и природе, развития природоподобных технологий, человеко-машинных систем, управления климатом и экосистемами, а также исследования, связанные с этическими аспектами технологического развития, изменениями социальных, политических и экономических отношений |  |
| и) фундаментальные исследования, обусловленные внутренней логикой развития науки, обеспечивающие готовность страны к большим вызовам, еще не проявившимся и не получившим широкого общественного признания, возможность своевременной оценки рисков, обусловленных научно-технологическим развитием |  |

1. **Срок реализации проекта**

С 01.10.2024 по 30.06.2026

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ УЧАСТНИКАХ ПРОЕКТА**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **ФИО сотрудника** | **Должность** | **Организация** | **Опыт и квалификация** | **Основные функции в проекте** |
| 1 | Харитонов Евгений Юрьевич | начальник научно-исследовательской лаборатории | ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России | к.т.н. по специальности 6.2.6. «Системы контроля и испытания вооружения и военной техники, военная метрология»,  инженер по специальности «Средства радиоэлектронной борьбы»  Опыт работы более 16 лет. | Научный руководитель |
| 2 | Савин Александр Александрович | инженер | ФГАОУ ВО «ТУСУР» | д.т.н. по специальности 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (2.2.8), инженер по специальности «Радиоэлектронные системы».  Опыт работы более 20 лет. | Куратор проекта |
| 3 | Колдомов Александр Сергеевич | инженер | - | Магистр по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».  Опыт работы более 10 лет. | Консультант |
| 4 | Калентьев Алексей Анатольевич | директор | ООО «50ом Тех.» | к.т.н. по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»  Инженер по специальности «Системы автоматизированного проектирования».  Опыт работы более 14 лет. | Консультант |

**ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА**

1. **Обоснование актуальности и востребованности проекта**

В рамках Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. № 20-р, важная роль отведена развитию технологий производства электронной компонентной базы (ЭКБ) СВЧ-диапазона. В то же время эффективное применение отечественных изделий электронной компонентной базы без интеграции их высокоточных моделей в САПР невозможно. Привязанность российских предприятий электронной промышленности к зарубежной ЭКБ и средствам автоматизации процесса проектирования привела к отсутствию отработанных технологий построения и разработки программных библиотек моделей отечественных СВЧ транзисторов. Таким образом, актуальной задачей становится отработка технологии получения на основе измерений высокоточных моделей отечественных СВЧ транзисторов и их последующей интеграции в САПР, которая позволит на порядок снизить сроки проектирования и значительно улучшить качество выдаваемой продукции. Потребителями разрабатываемой технологии и предоставляемых на ее основе услуг станут такие предприятия, как АО «НИИПП», АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «Cветлана Электронприбор», АО «НИИЭТ», АО «Микроволновые системы» и многие другие.

1. **Предмет разработки/ исследования**

Требования к измерительному комплексу и способы его построения, методы и методики измерений, алгоритмы обработки измерительной информации, модели для САПР.

1. **Способы и методы реализации проекта**

Реализация проекта подразумевает использование комплексного подхода, включающего:

1) Анализ отечественного и мирового опыта решения задач моделирования таких элементов ЭКБ, как СВЧ транзисторы;

2) Поиск оптимальных путей достижения поставленной цели исследования на основе имеющегося научного задела и материальной базы;

3) Проведение экспериментальных исследований;

4) Анализ полученных на этапах НИР результатов исследований с оформлением отчетов и результатов интеллектуальной деятельности в виде патентов и/или свидетельств о регистрации программных продуктов.

1. **Новизна предлагаемых в проекте решений**

Новизна предлагаемых в проекте решений заключается в комплексном использовании передовых методов калибровки и измерений для построения новых методик измерений параметров СВЧ транзисторов, учитывающих возникающие в них эффекты, такие как саморазогрев и влияние ловушек в буферном слое и на границах разделов.

1. **Задел по тематике проекта**

Опыт создания СВЧ измерительной техники: векторные анализаторы цепей для тестирования пассивных и активных устройств, в том числе устройств с преобразованием частоты, с переменным импедансом по входу и выходу в СВЧ и КВЧ диапазонах частот в различных волноведущих системах (коаксиальный тракт, печатные платы, волноводы, копланарные устройства на полупроводниковых подложках); разработка методик (методов) измерений радиотехнических величин; разработка методов повышения точности измерений и калибровки; разработка моделей элементов ЭКБ для САПР.

1. I.M. Malay and E.U. Kharitonov, "Local Polynomial Regression as Adaptive Windowing Function in Complex-Valued Reflection Coefficient Measurements," 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510145

2. Харитонов Е.Ю., Вышлов В.А. Метод калибровки однопортового векторного анализатора цепей и определения параметров калибровочных мер на основе анализа откликов во временной области // Вестник метролога. – 2020. – № 4. – С. 9-16.

3. A.A. Savin, V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxon, D. Schubert, and U. Arz Adaptive Estimation of Complex Calibration Residual Errors of Wafer-Level S-Parameters Measurement System // 84th ARFTG Microwave Measurement Conference, Boulder, USA, 2014, pp. 1-4.

4. Kokolov A.A., Savin A.A., Babak L.I. Technique and Accuracy Appraisal of Extraction of mHEMT Small-Signal Equivalent Circuit // 20th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». 13-17 September, 2010, Sevastopol, Crimea, Ukraine, pp. 210-211.

5. Савин А.А., Губа В.Г., Быкова О.Н. Измерение параметров полупроводниковых приборов на пластине // Измерительная техника, № 7, 2016, С. 56-61. Пер. на англ. яз.: A.A. Savin, V.G. Guba, O.N. Bykova Measurement of the Parameters of On-wafer Semiconductor Devices // Measurement Techniques, Vol. 59, No. 7, October, 2016, pp. 765-772.

6 Попов А.А., Билевич Д.В., Сальников А.С., Калентьев А.А. Исследование влияния электрофизическими характеристик на параметры компактных моделей компонентов сверх высокочастотных монолитных интегральных схем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. — 2020. — № 2(257). — С. 37-46. - DOI: 10.36845/2073-8250-2020-257-2-37-46

7. Калентьев А.А., Сальников А.С., Попов А.А., Билевич Д.В., Добуш И.М., Горяинов А.Е., Файль Т.Н. Алгоритм автоматического построения малосигнальной модели GaAs pHEMT-транзистора и его реализация в САПР // Наноиндустрия. — 2020. — № S96-1. — С. 330-336. - DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.330.336

8. Popov A.A., Bilevich D.V., Metel A.A., Salnikov A.S., Dobush I.M., Goryainov A.Е., Kalentyev A.A. Small-signal and noise GaAs pHEMT modeling for low noise amplifier design // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1499. — P. 012033.

1. **Конкурентные преимущества создаваемого продукта/ технологии, сравнение технико-экономических характеристик с основными аналогами, в том числе мировыми**

Внедрение технологии построения моделей СВЧ транзисторов за счет высоких показателей точности и достоверности позволит на порядки снизить сроки разработки устройств СВЧ электроники на основе отечественных транзисторов и финансовые затраты на них.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**

1. **Цель проекта**

1. Создание технологии построения моделей СВЧ транзисторов и ее программно-аппаратной реализации.

2. Сокращение временных и финансовых затрат на проектирование и разработку узлов радиоэлектронной аппаратуры на основе мощных СВЧ транзисторов.

3. Развитие научно-технического задела в области высокоточных измерений параметров элементов ЭКБ.

1. **Ожидаемые результаты, форма их представления, предполагаемое использование результатов**

В результате выполнения работы будут сформулированы требования к составу и основным характеристикам программно-аппаратного комплекса для экстракции, верификации и валидации параметров моделей мощных СВЧ транзисторов, разработан опытный образец комплекса, специальная оснастка для выполнения измерений и калибровки, методики измерений и калибровки, а также программное обеспечение для экстракции параметров модели.

Сопутствующие результаты: 1. Отчёт о патентных исследованиях. 2. Промежуточные и итоговый научно-технические отчеты. 3. Специальное программное обеспечение. 4. Статьи в периодические издания, рекомендованные ВАК. 5. Участие в тематических научно-технических конференциях. 6. Патенты и/или свидетельства о регистрации программных продуктов. 7. Утвержденные методики измерений.

Результаты проекта будут реализованы на научно-производственной базе промышленного партнера (АО «НИИПП») с последующим внедрением на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «Cветлана Электронприбор», АО «НИИЭТ», АО «Микроволновые системы» и других предприятий – разработчиков и потребителей СВЧ транзисторов.

1. **Основные экономические требования**

С учетом затрат на оплату труда исполнителей и на проведение НИР, стоимость готового измерительного комплекса должна быть не выше имеющихся на рынке аналогов. При этом требования к конечной себестоимости разработки предъявляются на уровне среднерыночных, которая будет уточнена после проведения испытаний и тестирования комплекса.

1. **Основные требования, предъявляемые к результатам работы:**
2. **Функции, выполнение которых должен обеспечивать разрабатываемый научно-технический продукт**

4.1.1 Измерение параметров СВЧ транзисторов.

4.1.2 Анализ и обработка результатов измерений с последующей экстракцией параметров модели для САПР.

4.1.3 Возможности измерения параметров СВЧ транзисторов различной структуры определяются в процессе выполнения данной НИОКР.

1. **Количественные параметры, определяющие выполнение научно-техническим продуктом своих функций**

4.2.1 В части измерений S-параметров:

- диапазон частот от 10 МГц до 18 ГГц;

- погрешность измерений с использованием разработанных методов и измерительной оснастки не должна превышать аналогичные показатели погрешности измерений при калибровке в плоскости измерительного порта более чем на 5 %;

4.2.2 В части измерений ВАХ:

- диапазон установки/измерений напряжений затвора ± 20 В;

- диапазон установки/измерений напряжений стока ± 220 В;

- диапазон установки/измерений тока в цепи затвора от 0 до 0,1 А;

- диапазон установки/измерений тока в цепи стока от 0 до 2 А;

- пределы допускаемой относительной погрешности измерения силы тока/напряжения не более ± 1 %;

- режимы измерений: статический/динамический (импульсный).

4.2.3 Технические и метрологические характеристики комплекса уточняются в процессе выполнения НИР;

4.2.4 Модели СВЧ транзисторов должны быть подготовлены для применения в САПР электронных устройств типа AWR DE.

4.2.5 При разработке моделей транзисторов должен учитываться целевой класс проектируемых СВЧ интегральных схем или устройств.

4.2.6 При интеграции моделей транзисторов в САПР должно устанавливаться взаимное соответствие условно-графического отображения, эквивалентной схемы и топологического чертежа.

1. **Конструктивные требования к научно-техническому продукту**

4.3.1 Конструктивные требования уточняются в процессе выполнения данной НИОКР.

1. **Перечень научной, технической и другой документации, представляемой по окончанию этапов работы и работы в целом**

Промежуточные научно-технические отчеты (по этапам 1-3), итоговый научно-технический отчет (этап 4). Методика измерений параметров СВЧ транзисторов. Описание специального программного обеспечения, инструкция для пользователя.

1. **Требования к материалам, комплектующим изделиям**

Не предъявляются.

1. **Требования по патентной охране**

7.1 При выполнении НИОКР должны быть проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

7.2 При создании измерительного комплекса должна быть обеспечена патентная чистота разрабатываемых решений.

7.3 Патентная чистота на разработанные решения должна быть обеспечена в отношении Российской Федерации и стран СНГ.

7.4 Исполнитель осуществляет необходимые работы по патентованию принципиально новых решений, разработанных в ходе выполнения данной НИОКР.

1. **Показатели, выполняемые в рамках проекта**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№ п/п** | **Наименование показателя** | **Единицы измерения** | **Значение показателя** |
| 1 | Количество статей, соответствующих научной тематике проекта опубликованных в журналах категорий К1, К2, К3 (письмо ВАК № 02 1198 от 06.12.2022) | ед. | 4 |
| 2 | Количество заявок на РИД (изобретение, полезная модель, промышленный образец, топология интегральных микросхем, программа для ЭВМ) | ед. | 2 |

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование этапа | Работы, выполняемые на этапе | Результаты выполнения этапа | Продолжи-тельность этапа, мес. | Стоимость, руб. |
| 1 | Обоснование требований к составу и характеристикам измерительного комплекса | Обзор подходов, патентный поиск, изучение имеющихся решений для реализации комплекса | Состав и характеристики измерительного комплекса | 3 | 571 428,00 |
| 2 | Разработка специальной оснастки для измерений и калибровки | Моделирование и проектирование элементов оснастки для измерений и калибровки | Оснастка для измерений и калибровки | 6 | 1 142 857,00 |
| 3 | Разработка и апробация методик измерений и калибровки | Выбор типа моделей транзисторов, разработка и апробация методик измерений для экстракции их параметров, верификации и валидации моделей | Методики измерений и калибровки | 6 | 1 142 857,00 |