



УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по НРИИ ТУСУРа,

д-р техн. наук, доцент

А.В. Медовник А.В. Медовник

«17» октября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» («ТУСУР»)

Диссертация «Автоматизированное проектирование и разработка интегральных трансимпедансных усилителей для быстродействующих оптических приемников» выполнена на кафедре компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа. В период подготовки диссертации соискатель **Коряковцев Артём Сергеевич** обучался в очной аспирантуре ТУСУРа.

В 2017 г. **Коряковцев Артём Сергеевич** окончил бакалавриат ТУСУРа по направлению подготовки 11.03.01 «Радиотехнические средства передачи, приёма и обработки сигналов», а в 2019 г. – магистратуру ТУСУРа по профилю «Радиоэлектронные устройства передачи информации».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов и диплом об окончании аспирантуры выданы соискателю в 2023 г. ТУСУРОм.

Научный руководитель – **Бабак Леонид Иванович**, д.т.н, профессор кафедры КСУП, ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация **Коряковцева Артёма Сергеевича** является научно-квалификационной работой, в которой представлены методики автоматизированного проектирования одно- и многокаскадных интегральных СВЧ ТИУ, построение математических моделей и исследование усилительных каскадов ТИУ на основе компьютерного символьного анализа и упрощенных малосигнальных ЭС, а также разработка и экспериментальное исследование ИС ТИУ на основе КМОП- и SiGe БиКМОП-технологий для быстродействующих оптических приемников со скоростями передачи данных до 25 Гбит/с.

Личное участие автора в получении результатов

Все результаты, представленные в диссертационном исследовании, получены автором лично либо при его непосредственном участии. В работах, полученных в соавторстве, автором получены существенные теоретические и практические результаты.

Степень достоверности результатов работы

Степень достоверности научных результатов подтверждается: применением современных методов научных исследований, включая математическое моделирование; значительным объёмом экспериментальных данных, полученных с помощью современного измерительного оборудования; хорошим согласованием экспериментальных и расчётных данных.

Научная новизна диссертации

1. Впервые на основе компьютерного символьного анализа с применением классического метода частотной коррекции Г.В. Брауде и малосигнальных моделей транзисторов предложена методика проектирования СВЧ усилительных каскадов интегральных ТИУ, позволяющая определить оптимальные значения корректирующих элементов для обеспечения максимально-плоских частотных характеристик коэффициента усиления или ГВЗ, в том числе с учетом емкости ФД.

2. Впервые предложена методика проектирования СВЧ усилительных каскадов интегральных сверхширокополосных усилителей и ТИУ на основе компьютерного символьного анализа и модифицированного метода Брауде, позволяющая получать семейства АЧХ коэффициента усиления с разными величинами наклона в выбранном частотном диапазоне. Это дает возможность разрабатывать усилительные каскады, корректирующие частотные искажения определенных компонентов приемной или передающей системы (компенсация спада с возрастанием частоты АЧХ длинного входного коаксиального кабеля, влияния емкости фотодиода в оптических приемниках и т.п.).

3. Впервые предложена методика проектирования многокаскадных интегральных ТИУ со взаимной или противозумовой коррекцией на основе компьютерного символьного анализа и модифицированного метода Брауде, позволяющая аналитически рассчитать цепи коррекции каскадов с АЧХ разной формы с целью расширения полосы пропускания, компенсации влияния емкости ФД и обеспечения более низкой величины выходного шумового напряжения.

Практическая значимость

1. В среде математического пакета Mathcad разработан комплект исследовательских программ, реализующий предложенный подход к исследованию и проектированию усилительных каскадов СВЧ ТИУ на основе совместного применения компьютерного символьного анализа, линейных моделей КМОП-транзисторов, классического и модифицированного методов Брауде. Программы позволяют выполнить символьный анализ и численное моделирование комплекса характеристик распространенных типов усилительных каскадов СВЧ КМОП ТИУ с целью исследования, рассчитать цепи коррекции каскадов с различной требуемой формой АЧХ коэффициента усиления, осуществить проектирование ОПРм с многокаскадными ТИУ, в том числе с применением противозумовой коррекции.

2. Применительно к ряду типовых схем усилительных каскадов СВЧ КМОП ТИУ предложены простые аналитические выражения для определения оптимальных значений элементов корректирующих цепей, обеспечивающих максимально-плоские частотные характеристики коэффициента усиления и ГВЗ трансимпеданса, что позволяет выполнить быстрый инженерный расчет этих схем.

3. С использованием разработанных методик и комплекта программ проведены исследование и сравнительная оценка характеристик разных типов усилительных каскадов, выполненных на базе отечественной 90 нм РЧ КМОП-технологии АО "Микрон".

4. Разработан и запущен на изготовление комплект отечественных ИС СВЧ ТИУ на базе 180 нм и 90 нм РЧ КМОП-технологий ПАО "Микрон" для скоростей передачи данных от 2,5 Гбит/с до 20 Гбит/с.

5. Разработан и экспериментально исследован ряд ИС ТИУ с полосой частот до 30 ГГц, изготовленных на основе 250 нм SiGe БиКМОП-технологии.

6. Разработан и экспериментально исследован монолитный интегральный оптический приемник со скоростью передачи до 25 Гбит/с на основе 250 нм SiGe БиКМОП-технологии. Характеристики приемника, а также входящего в его состав ТИУ находятся на уровне зарубежных аналогов.

7. Экспериментально исследована СВЧ ИС ТИУ для скоростей передачи данных 2,5 Гбит/с на базе 180 нм КМОП технологии.

8. Экспериментально исследован гибридный оптический приёмник для скоростей передачи данных 2,5 Гбит/с.

Результаты исследований использованы в следующих научных проектах:

1. «Исследование методов построения интегрированных микроэлектронных и радиофотонных устройств на базе гетероструктурных технологий для перспективных межвидовых комплексов локации, навигации и связи с многоканальными фазированными антенными решетками» в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности №8.4029.2017/ПЧ (2017-2020 гг.).

2. «Разработка фотонных интегральных схем и модулей оптических приемников для высокоскоростных систем передачи данных до 25 Гбит/с», хоздоговор № 1/21 от 25.12.2021 г.

3. «Разработка аналого-цифровых, СВЧ и фотонных интегральных схем, приемо-передающих модулей и систем на кристалле, а также их технологий», научный проект в рамках программы развития передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева, 2022 г.

4. «Разработка ключевых элементов отечественных технологий изготовления и моделирования СВЧ, фотонных и фотонно-электронных интегральных схем на базе различных полупроводниковых материалов, а также радиочастотных и оптоэлектронных модулей на этой основе», ФП «ПРИОРИТЕТ 2030», подпроект СП1/1, 2022-2023 гг.

5. «Разработка модуля оптического передатчика на базе радиофотонных интегральных схем для широкополосных систем передачи, приема и обработки радиосигналов» в рамках проектной команды «УМНИК» №54 ГУРЭС 14/72778 от 2021 г.

6. «Разработка комплекта интегральных электронных компонентов и конструкций оптических приемопередающих модулей со скоростями не менее 5, 12 и 20 Гбит/с», РНФ, соглашение № 23-91-06207, 2023-2025 гг.

7. «Комплекс исследований, направленных на разработку на основе отечественных кремниевых и АЗВ5-технологий комплектов сложно-функциональных блоков (СФБ) радиочастотных (РЧ) аналоговых многофункциональных ИС для СВЧ приемопередатчиков в частотных поддиапазонах L, S и Ku для систем связи, радиолокации, АФАР и телекоммуникаций», молодежная лаборатория, г/б 4/22, 2022-2024 гг.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа **Коряковцева Артёма Сергеевича** по своему содержанию соответствует паспорту специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» в рамках областей исследования: 4. Исследование и разработка микроволновых интегрированных схем новых поколений; 9. Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения.

Полнота изложенных материалов в печатных работах, опубликованных автором

По результатам проведённых исследований опубликованы 27 научных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК, 5 в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 11 статей в сборниках международных конференций, 6 свидетельства о регистрации топологий интегральных микросхем, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭМВ.

Диссертация «**Автоматизированное проектирование и разработка интегральных трансимпедансных усилителей для быстродействующих оптических приемников**» **Коряковцева Артёма Сергеевича** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Заключение принято на совместном заседании кафедр КСУП, СВЧиКР, ТУ, ЭП, РСС. Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 59 от «16» октября 2024.

Председатель,

профессор кафедры КСУП., д.т.н., доцент

Секретарь,

доцент кафедры КСУП к.т.н., доцент



Ганджа Т.В.



Черкашин М.В.

Список публикаций соискателя Коряковцева Артёма Сергеевича

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Коряковцев А.С., Бабак Л.И., Коколов А.А. Компьютерный символьный анализ и исследование сигнальных характеристик СВЧ-интегрального трансимпедансного усилителя на КМОП-транзисторах // Доклады ТУСУР. – 2023. – № 26. – С. 7–15.

2. Коколов А.А. Фотонно-электронная интегральная схема на основе SiGe БиКМОП-технологии и модуль оптического приемника для систем передачи данных до 25 Гб/с / А.С. Коряковцев, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Конкин // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14. – № S7. – С. 438-439.

3. Коряковцев А.С. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКТА ИС ТРАНСИМПЕДАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ 90-НМ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ДО 25 ГБИТ/С / Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И. // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16. – № S9-1 (119). – С. 161-165.

4. Миненко Д.Е., Коряковцев А.С., Помазанов А.В. РАЗРАБОТКА КОРПУСА ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОФОТОННОГО ПЕРЕДАТЧИКА ДО 25 ГГЦ, МОНТИРУЕМОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА // Техника радиосвязи. – 2023. – № 1 (56). – С. 74-83.

Статья в журнале, входящем в Q2 Scopus

5. Kokolov A.A., Konkin D.A., Koryakovtsev A.S., Sheyerman F.I., Babak L.I. Microwave photonic ICs for 25 Gb/s optical link based on SIGE BiCMOS technology // Symmetry. – 2019. – Т. 11. – № 12. – С. 1453.

Статьи в изданиях, индексируемых WoS и Scopus

6. Kokolov A.A. Experimental Study and Modeling of High-Frequency Performances of Ge-Photodiode for Microwave Optical Receiver Integrated Circuits / A. A. Kokolov, F. I. Sheyerman, L. I. Babak, D. A. Konkin, A. V. Ubaichin, A. S. Koryakovtsev, E. A. Shutov // Journal PHOTONICS RUSSIA. – 2024.

7. Kokolov A.A. Differential transimpedance amplifier for 25 Gb/s optical links in a 0.25 μm SiGe BiCMOS technology / A.S. Koryakovtsev, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 233-236.

8. Koryakovtsev A.S. A DC-20 GHz integrated linear photonic receiver in a 0.25 μm BiCMOS SIGE:C technology / A.A. Kokolov, D.A. Konkin, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // Dynamics. – 2019.

9. Koryakovtsev A.S. Design of Integrated Photonic Receiver with 20 GHz Bandwidth Based on 0.25- μm SiGe BiCMOS technolog / A.A. Kokolov, F.I. Sheyerman, L.I. Babak // EWDTs. – 2018.

Доклады в трудах международных и всероссийских конференций

10. Коряковцев А.С. Монолитный трансимпедансный усилитель диапазона DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии / А.В. Помазанов, Е.А. Шутов, А.А. Коколов // Научная сессия ТУСУР-2018: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2018.

11. Коряковцев А.С. Монолитный трансимпедансный усилитель диапазона DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS технологии / А.В. Помазанов, А.А. Коколов // 28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2018.

12. Коколов А.А. Разработка и экспериментальное исследование дифференциального трансимпедансного усилителя DC-20 ГГц на основе SiGe BiCMOS-технологии / А.С. Коряковцев, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман, Д.А. Конкин // 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». – 2018.

13. Коряковцев А.С. Разработка ИС-трансимпедансного усилителя на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии для 2,5 гбит/с оптических линий связи / А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2022. – № 1-1. – С. 38-41.

14. Коряковцев А.С. Разработка и экспериментальное исследование интегрального оптического приемника на основе 0,25 мкм SIGE-БИКМОП-технологии для линий передачи со скоростью 25 гб/с / А.А. Коколов, Д.А. Конкин, Ф.И. Шеерман, Ю.С. Жидик // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2019. – № 1-1. – С. 53-56.

15. Бабак Л.И. Модифицированный метод Брауде для проектирования ВЧ и СВЧ сверхширокополосных усилителей / А.С. Коряковцев // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2023.

16. Коряковцев А.С. Проектирование многокаскадных СВЧ трансимпедансных усилителей с противозумовой коррекцией на основе символьного анализа и модифицированного метода Брауде / Л.И. Бабак, А.А. Коколов // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – 2023.

17. Коряковцев А.С. Символьный анализ и расчет входного каскада СВЧ трансимпедансного усилителя по схеме КМОП-инвертора с обратной связью / Л.И. Бабак, А.А. Коколов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т. 1. – С. 145-150.

18. Коколов А.А. Дифференциальный трансимпедансный усилитель DC-20 ГГц на основе SIGE BiCMOS технологии для интегрального оптического приемника / А.С. Коряковцев, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман, Д.А. Конкин, Ю.А. Светличный // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 218-223.

19. Коколов А.А. Экспериментальное исследование интегрального оптоэлектронного приемника на основе кремниевой технологии / А.С. Коряковцев, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Конкин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. –2021. – № 3. – С. 413-414.

20. Коряковцев А.С. Разработка комплекта ИС трансимпедансных усилителей на основе отечественной 90-нм КМОП-технологии для высокоскоростных оптических линий связи до 25 гбит/с / А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак // Микроэлектроника 2022. – 2022. – С. 249-250.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭМВ

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685659 «Программа для символьного анализа СВЧ-трансимпедансных усилителей "Трансимпеданс"» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И. – Заявка № 2023683602. Дата поступления 08.11.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.11.23.

Свидетельства о государственной регистрации топологий интегральных микросхем

22. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2018630181 «Монолитная интегральная схема SiGe BiCMOS трансимпедансного усилителя диапазона DC-20 ГГц с дифференциальным выходом и компенсацией постоянной составляющей» // Коряковцев А., Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2018 г.

23. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2019630215 «Монолитная интегральная схема SIGE BiCMOS оптоэлектронного приемника диапазона DC-20 ГГц со встроенным трансимпедансным усилителем с дифференциальным выходом и компенсацией постоянной составляющей» // Коряковцев А., Коколов А.А., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., Конкин Д.А., 2019 г.

24. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2021630178 «Монолитная интегральная схема однокаскадного трансимпедансного усилителя диапазона DC-35 ГГц на основе 250 нм SIGE БИКМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2021 г.

25. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2022630155 «Монолитная интегральная схема трансимпедансного усилителя для линий связи 25 Гб/с на основе 90 нм КМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Шеерман Ф.И., Бабак Л.И., 2022 г.

26. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2023630274 «Монолитная интегральная схема трансимпедансного усилителя для линий связи 2,5 Гб/с на основе 180 нм КМОП технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., 2023 г.

27. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2024630158 «Монолитная интегральная схема

однокаскадного трансимпедансного на основе 0,5 мкм GaAs РНЕМТ технологии» // Коколов А.А., Коряковцев А.С., Бабак Л.И., 2024 г.