СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

ул. Профессора Попова, д.5 литера Ф, Санкт-Петербург, 197022
Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58; e-mail: info@etu.ru; https://etu.ru
ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381; ИНН/КПП 7813045402/781301001

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и инновационной деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
д.т.н., доцент Семенов А.А
«27» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
на диссертационную работу

Степанова Ивана Васильевича

«Снижение шага перестройки частоты оптоэлектронного автогенератора с элементами интегральной фотоники», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

1. Актуальность научной работы

Диссертационная работа Степанова И.В. посвящена разработке методов плавной перестройки рабочей частоты оптоэлектронных генераторов (ОЭГ), построенных на фотонных интегральных схемах. Основным преимуществом ОЭГ по сравнению с традиционными генераторами СВЧ колебаний является преодоление противоречивых требований, состоящих в увеличении частоты генерации и сохранении низкого уровня фазовых шумов. В настоящее время предложены конструкции генераторов, работающих в S-K диапазонах частот и обеспечивающих сверхнизкий уровень фазового шума (менее -140 дБн/Гц при отстройке 10 кГц). Такие генераторы находят применение в радиолокационных и телекоммуникационных системах, навигационных устройствах и измерительном оборудовании. Одной из ключевых задач, возникающих при разработке ОЭГ, является реализация механизма перестройки рабочей частоты. Автором отмечены ограничения существующих подходов для управления спектром генерации. Предложен метод плавной перестройки, основанный на электронном управлении временем задержки (фазой) сигнала в кремниевых фотонных интегральных схемах (ФИС). Применение данной методики продемонстрировано в диссертационной работе путем проведения численного моделирования с использованием современного программного обеспечения, а также с помощью разработанных математических моделей. Результаты, представленные в работе, направлены на совершенствование конструкций ОЭГ и являются важным этапом на пути перехода к интегральному исполнению, что необходимо для внедрения ОЭГ в сверхвысокочастотных системах различного назначения.

Таким образом, тема диссертационной работы Степанова Ивана Васильевича соответствует современным направлениям развития радиолокационных и телекоммуникационных систем, является актуальной и представляет научный и практический интерес.

ВХОД. № 4478-13
«05» 11. 2026г.

2. Состав и содержание диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 99 страниц, включая 46 рисунков и 4 таблицы.

Первая глава посвящена обзору существующих конструкций оптоэлектронных генераторов, а также описанию методов перестройки их рабочей частоты. Проведён сравнительный анализ различных конструкций ОЭГ, выделены их основные компоненты, обеспечивающие управление рабочей частотой, а также представлены математические модели ОЭГ.

Во второй главе разработана математическая модель, описывающая влияние времени задержки в цепи обратной связи на диапазон перестройки рабочей частоты ОЭГ. Предложены конструкции кремниевых интегральных оптических линий задержки на основе интерферометра Маха-Цендера и кольцевого микрорезонатора, а также приведены выражения для расчета времени задержки.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования отдельных компонентов перестраиваемых линий задержки в интегральном исполнении, включая прямоугольный волновод, многомодовый направленный ответвитель, микрокольцевой резонатор. Представлены математические модели для учета влияния электрооптического и термооптического эффектов на время задержки. Представлены результаты расчета зависимости времени задержки от управляющего напряжения для обоих эффектов.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования, демонстрирующие плавную перестройку рабочей частоты ОЭГ в результате приложения управляющего сигнала на вход в интегральную перестраиваемую линию задержки. Предложены способы измерения, а также подстройки рабочей частоты.

3. Соответствие паспорту научной специальности

Область исследования диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций:

п. 1. Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

п. 2. Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

п. 20. Разработка методов совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих систем.

4. Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1) Разработана математическая модель, описывающая электронную перестройку рабочей частоты оптоэлектронного генератора в результате изменения времени задержки в интегральных оптических линиях задержки на основе интерферометра Маха-Цендера и кольцевого микрорезонатора.
2) Предложен метод перестройки рабочей частоты оптоэлектронного генератора, в основе которого лежит управление временем задержки кремниевых интегрально-оптических линий задержки за счет термооптического и электрооптического эффектов.
3) Предложена конструкция перестраиваемого оптоэлектронного генератора, содержащая интегрально-оптические линии задержки.
4) Предложены подходы к подстройке частоты перестраиваемого оптоэлектронного генератора.

5. Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы

Обоснованность и достоверность результатов диссертации подтверждается использованием известных теоретических положений, соответствием используемых математических моделей с реальными физическими процессами и численными методами, апробированными в других

областях, их обсуждением на научных конференциях и внедрением результатов диссертационной работы в рамках инициативных и опытных разработок в АО «БПО «Прогресс».

6. **Личный вклад автора**

Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Вклад автора в получение всех представленных данных, их анализ, обработку и описание является определяющим. Автор принимал непосредственное участие в подготовке докладов по результатам работы и лично представлял их на научных конференциях и семинарах.

7. **Значимость полученных в диссертации результатов**

Значимость диссертации заключается в возможности использования полученных результатов для создания оптоэлектронных генераторов, плавное управление частотой которых осуществляется с помощью фотонных интегральных схемах. Это обеспечивает возможность миниатюризации конструкции генераторов и повышение их быстродействия. Предложенные методы расчета могут быть расширены и применены для генераторов, построенных на линиях задержки различных конструкций, в том числе выполненных на других технологических платформах.

8. **Недостатки диссертационной работы**

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:

1) Как было показано в первой главе, для достижения низких значений фазового шума в конструкции оптоэлектронных генераторах используются длинные (1000 м и более) волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ). В предложенной конструкции генератора нет волоконных линий задержки. Из текста диссертации неясно, какой фазовый шум ожидается получить и какие методы для его снижения можно предложить.

2) Известно, что увеличение длины линии задержки приводит к уменьшению расстояния между собственными частотами (т.е. частотами, удовлетворяющими условию баланса фаз). Как изменение длины линий задержки влияет на диапазон перестройки предложенной конструкции ОЭГ?

3) Время задержки в ВОЛЗ составляет единицы микросекунд, что значительно превышает значения характерные для предложенных управляемых интегральных линий задержки (доли нс). Применима ли разработанная модель для описания генераторов, содержащих ВОЛЗ?

4) Для выполнения условия баланса амплитуд коэффициент передачи управляемых линий задержки должен быть постоянным во всем диапазоне перестройки времени задержки. Однако в диссертации отсутствуют результаты расчета амплитудно-частотных характеристик предложенных интегрально-оптических линий задержки. Из диссертации неясно, как меняется коэффициент передачи линий задержки на интерферометре Маха-Цендера и микрокольцевом резонаторе при изменении времени задержки. Каким образом это учтено в модели?

5) В подписи к рис. 3.21 сказано, что расчет зависимости времени задержки от напряжения выполнен на длине волны 1550,4 нм. Однако в тексте отсутствует информация о резонансной длине волны для данного резонатора. Время задержки определяется в первую очередь расстоянием ($\Delta\lambda$) между резонансной длинной волны и длиной волны рабочего сигнала, а не ее абсолютным значением. Какая величина $\Delta\lambda$ использована в расчете? Как она изменялась при приложении управляющего напряжения? Кроме того, в тексте диссертация отсутствует информация о величине потерь в оптических волноводах, а также о собственной и нагруженной добротности кольцевых резонаторов, использованных в оптическом тракте генератора.

6) При описании линий задержки, перестраиваемых за счет термооптического эффекта, автор приводит графики зависимости времени задержки от управляющего напряжения. При этом отсутствует информация о сопротивлении нагревательного элемента. Это не позволяет оценить мощность, затрачиваемую на нагрев. Кроме того, из карт распределения температуры, представленных на рис. 3.12, неясно, как меняется температура волновода при изменении управляющего напряжения от 0 В до 0,3 В (для рис. 3.20) и от 0,18 В до 0,21 В (для рис. 3.21).

7) В главе 3 особое внимание уделено выбору шага дискретизации. Однако результаты приведены только для двух значений 1,8 ТГц и 50 ТГц. Чем обусловлен выбор этих двух значений? Из рис. 3.18 и 3.20 видно, что при частоте 1.8 ТГц модель не позволяет корректно описывать зависимость времени задержки от управляющего напряжения. При 50 ТГц результаты численного расчета оказываются близкими к значениям, получаемым из аналитических выражений. Как влияет дальнейшее увеличение частоты на точность и какое значение является достаточным для проведения расчетов? Кроме того, требует обоснования выбор третьего значение частоты дискретизации 2.048 ТГц для расчета временной реализации, представленной на рис. 4.6.

8) В тексте диссертационной работы встречаются опечатки, а также стилистические ошибки и неточности.

Перечисленные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

9. Заключение

Считаем, что диссертация на тему: «Снижение шага перестройки частоты оптоэлектронного автогенератора с элементами интегральной фотоники», соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 с последующими изменениями и дополнениями, а её автор Степанов Иван Васильевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 4 в научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 5 публикаций в других изданиях. Получены 2 свидетельства на результат интеллектуальной деятельности: 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

Доклад Степанова Ивана Васильевича по материалам диссертации был заслушан и обсужден на заседании кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) 26 октября 2026 года. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы. На этом же заседании был рассмотрен и одобрен отзыв ведущей организации (протокол № 10 от 26.10.2026).

Заведующий кафедрой физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
кандидат физико-математических наук, доцент Никитин Андрей Александрович
«26» 10 2026 г.

Даю согласие на обработку персональных данных.

Ученый секретарь кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
кандидат физико-математических наук, доцент Медведева Наталья Юрьевна
«26» 10 2026 г.

Даю согласие на обработку персональных данных.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф, тел. +7 (812) 234-46-51, e-mail: info@etu.ru, сайт: etu.ru