

на правах рукописи



Елфимов Алексей Евгеньевич

**Генерация сверхкоротких импульсов гауссовой формы  
и её производных**

1.3.4. «Радиофизика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
Кандидата физико-математических наук

Воронеж 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор  
**Усков Григорий Константинович**

Официальные оппоненты: **Разиньков Сергей Николаевич**  
доктор физико-математических наук, доцент. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. Профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», кафедра электрооборудования (и оптико-электронных систем), профессор.

**Белоусов Антон Олегович**

Кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра телевидения и управления, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Защита состоится «26» июня 2025 г. В 15 часов 10 минут на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, главный корпус, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Воронежского государственного университета по адресу: <http://www.science.vsu.ru/disserinfo&cand=3524>

Автореферат разослан «\_\_» мая 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Степкин В. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы

В настоящее время интерес к использованию сверхширокополосных сигналов (СШП) в различных областях радиотехники постоянно растет. Подобные сигналы применяют в радиолокации и системах связи. Одним, из наиболее распространенных видов СШП-сигнала, является сверхкороткий импульс (СКИ). В радиолокации, все чаще, используют импульсы формы моноцикла, дуплета и других производных от кривой Гаусса. Управление длительностью, амплитудой и скважностью СКИ позволяет осуществлять модуляцию сигнала. Уменьшение длительности сигнала даёт возможность повысить разрешающую способность радиолокационной системы. При реализации современных радиосистем для внедрения различных алгоритмов управления генераторами СКИ используют ЭВМ. Учитывая описанные тенденции, возникает потребность в системах формирования СКИ с возможностью задания их формы при помощи программных средств.

Одним из подходов к формированию СКИ является применение размыкателей тока, таких как диоды с накоплением заряда (ДНЗ). Генераторы, основанные на диодах такого типа, используют свойства накопления и рассасывания заряда из активной области полупроводниковой структуры и способность диода резко восстанавливать своё обратное сопротивление, после полной экстракции заряда. Этот метод позволяет сформировать импульсы формы, близкой к колокольной. Метод, основанный на применении ДНЗ, позволяет формировать импульсы с амплитудой от единиц до нескольких десятков вольт. Импульсы, по форме близкие к моноциклу или дуплету Гаусса, могут быть получены сложением в широкополосном сумматоре нескольких СКИ. Конструкция сумматора должна обеспечивать достаточно высокую степень развязки между входными портами, чтобы свести к минимуму воздействие генераторов друг на друга. В технике СВЧ разработано много различных структур сумматоров, однако, в нашем случае наиболее подходящей, является конструкция, предложенная Уилкинсоном. В данной работе расширение исходной полосы пропускания сумматора достигается увеличением количества его звеньев. Это, естественно, усложняет расчет параметров устройства и требует дополнительного моделирования для изготовления экспериментального образца на печатной плате.

Для управления режимами генераторов при формировании заданных форм сигналов, измерения их параметров и характеристик разработан автоматизированный измерительный комплекс с набором программно-аппаратных средств, позволяющих с высокой скоростью обрабатывать массивы измеренных данных, с целью определения последовательности необходимых решений.

Потребность в совершенствовании моделей генераторов СКИ, а также их практической реализации и составляет актуальность данной работы.

**Целью диссертационной работы** является исследование физических процессов, протекающих в ДНЗ и, определяющих форму сверхкороткого видеоимпульса на выходе генератора. Расширение возможностей формирования различных сигналов и управления их амплитудой и длительностью.

### **Задачи работы**

Задачи диссертационной работы напрямую следуют из цели:

1. Исследовать влияние длительности процесса инжекции и момента начала экстракции заряда из активной области ДНЗ на длительность и амплитуду формируемого СКИ.
2. Провести экспериментальные исследования работы генератора видеоимпульсов с независимым управлением временем накачки и моментом начала рассасывания заряда.
3. Провести теоретические расчеты параметров многозвенных конструкций сумматоров Уилкинсона для сложения СКИ двух и четырёх генераторов.
4. Исследовать процесс формирования импульсов формы моноцикла и дуплета, в основе которого используется методика сложения сигналов нескольких генераторов СКИ.
5. Разработать программно-аппаратный измерительный комплекс для автоматизированного измерения параметров и характеристик видеоимпульсов.
6. Разработать алгоритм управления характеристиками входных сигналов в формирователе с сумматором для генерации видеоимпульсов сложных форм.

### **Научная новизна работы**

В результате проведённых, в рамках диссертационной работы, исследований были достигнуты следующие результаты:

1. Предложена методика управления объёмом накопленного заряда в активной области ДНЗ генератора для задания необходимой формы видеоимпульса на его выходе.
2. Теоретически и экспериментально обоснована возможность реализации сумматора Уилкинсона для сложения сверхширокополосных видеоимпульсов.
3. Разработаны компьютерные модели, схемы и экспериментальные образцы формирователей видеоимпульсов и сигналов в виде моноцикла и дуплета Гаусса, с заданными параметрами.
4. Предложен алгоритм формирования видеоимпульсов заданной формы, основанный на текущем сравнении расчетных и измеренных значений характеристик сигналов.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Значимость диссертационной работы заключается в возможности внедрения следующих результатов:

1. Дана физическая интерпретация зависимости длительности и амплитуды формируемого СКИ от продолжительности процесса инжекции и начала момента экстракции заряда в активной области ДНЗ.

2. Предложенная схема генератора с двумя каналами управления позволяет независимо управлять временем инжекции и началом процесса экстракции заряда. Подход может быть использован для регулирования формы колокольного сигнала в генераторах СКИ, а также при исследовании характеристик ДНЗ.

3. Описана методика построения схемы управляемого генератора с использованием сумматора, которая может быть применена для формирования моноциклов и дуплетов с заданными характеристиками.

4. Программно-аппаратный измерительный комплекс (ПАИК), разработанный в диссертации, использован для изучения характеристик импульсов Гауссовских форм.

5. Рекомендован алгоритм, использующий измеренные характеристики генераторов и суммируемых СКИ для вычисления положения сигналов при формировании моноциклов и дуплетов заданных форм.

#### **Методы исследования**

В диссертации использованы методы компьютерного и математического моделирования, анализ с помощью численных методов, статистические методы для оценки параметров пассивных элементов схемы, метод четных и нечетных мод, а также современные методы исследований с помощью эксперимента. Для практической реализации алгоритмов использовался объектно-ориентированный подход к построению архитектуры ПО на языке Python.

#### **Достоверность результатов**

Полученные в диссертационной работе результаты опираются на фундаментальные теоретические знания в исследуемой области. Результаты также подтверждаются применением известных математических методов к моделированию и аналитическим выкладкам, а также согласованностью полученных экспериментальных данных с результатами моделирования. Необходимая точность экспериментальных данных обеспечена за счет использования сертифицированного измерительного оборудования.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Продолжительность инжекции и момент начала экстракции заряда из активной области ДНЗ (при прочих равных условиях) однозначно определяет длительность и амплитуду генерируемых СКИ.

2. Предложенная двухканальная схема управления генератором СКИ обеспечивает возможность одновременного изменения длительности импульса и его амплитуды.

3. Для уменьшения искажений формируемого сигнала при сложении импульсов с шириной частотного спектра до 5 ГГц достаточно применять сумматор конструкции Уилкинсона в трёхзвенном исполнении, так как такая

структура обеспечивает необходимое расширение рабочей полосы частотного диапазона устройства.

4. Автоматизированные измерения характеристик разрабатываемых генераторов и формируемых ими сигналов, позволяют реализовать на основе объектно-ориентированного подхода, алгоритм, использующий полученные данные при формировании СКИ с заданными параметрами.

#### **Апробация работы**

Основные материалы диссертации были представлены и обсуждались в рамках конференций: XXV, XXVI, XXVIII, XXIX, XXX Международных научно-технических конференций «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2019, 2020, 2022, 2023, 2024 г., соответственно. 32-й и 34-й Международных Крымских конференций «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2022, 2024 г., соответственно. 8-й Всероссийской Микроволновой конференции (8th All-Russian Microwave Conference), г. Москва, 2022 г. XX Всероссийской молодёжной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии», г. Москва, 2022 г. XXX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2023» в секции «Физика», г. Москва, 2023 г. X Международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2023)», г. Тольятти, 2023 г. XX Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов ФИТПВП-2023», г. Казань, 2023 г.

#### **Личный вклад**

Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту и составляющих научную новизну, получены автором диссертационной работы лично. В перечисленных материалах конференций и научных публикациях, созданных в соавторстве, соискатель проводил теоретические изыскания и экспериментальные исследования, а также самостоятельно выполнял анализ результатов.

#### **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 20 печатных работах, 4 из которых в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. 1 индексируемая базами Web Of Science и Scopus. Получены три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 95 наименования. Объём диссертации составляет 130 страниц, включая 57 иллюстраций и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** раскрывается актуальность темы, сформулированы цели и решаемые задачи исследования. Представлена научная новизна работы и описаны основные результаты и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена исследованию физических процессов формирования СКИ колокольной формы при помощи схемы с диодом с накоплением заряда.

В главе анализируются известные аналитические выражения и модели генераторов, рассматриваются принципы и основные стадии формирования импульса. Работа диода начинается с режима накопления заряда в активную область. В это время через диод течет прямой ток, ограниченный сопротивлением резистора в цепи. Объём накапливаемого заряда зависит от силы прямого тока, длительности процесса инжекции, а также задержки начала процесса экстракции, во время которой происходит рекомбинация заряда, что приводит к уменьшению его объёма. На второй стадии осуществляется экстракция заряда из активной области ДНЗ за счет протекания через него обратного тока. По окончании экстракции, третья стадия работы генератора характеризуется резким восстановлением сопротивления ДНЗ. Время перехода диода в это состояние называют временем переключения. Оно зависит от параметров самого диода: коэффициента диффузии носителей заряда; времени диффузии; площади полупроводникового перехода; толщины кристалла полупроводника; концентрации примесей; эффективного времени жизни носителей заряда. Было проведено моделирование схем генераторов разных полярностей СКИ. Для расчета характеристик использованы параметры диода MAVR-044769-12790T из документации производителя MАСOM. Параметры импульсов запуска были выбраны в соответствии с возможностями запускающих генераторов, используемых в эксперименте. В результате моделирования получены следующие значения амплитуды и длительности по полувысоте для положительного импульса 45 В и 280 пс, соответственно, для отрицательного импульса 38 В и 220 пс. На основе этого диода разработан экспериментальный образец генератора сверхкоротких видеоимпульсов. Однако, в приведенных схемах отсутствует возможность управлять длительностью инжекции и задержкой начала экстракции заряда и, тем самым, влиять на форму генерируемого СКИ.

В диссертации предложена методика возможного управления объёмом накопленного заряда за счет изменения длительности процесса инжекции и коррекции начала момента экстракции. С этой целью рассмотрена схема с двумя генераторами запуска, выходы которых подключены к затворам полевых транзисторов, формирующих импульсы управления токами инжекции и экстракции заряда. Схема генератора с двумя каналами управления изображена на рисунке 1.

Работу схемы можно описать, используя временную диаграмму на рисунке 2. По переднему фронту импульса с генератора G2 открывается транзистор VT2. В ДНЗ происходит накопление заряда за счет протекания через него прямого тока, что соответствует промежутку времени  $t_1-t_2$ . По заднему фронту импульса генератора G2 транзистор VT2 закрывается и, вместе с этим, прекращается процесс инжекции заряда. За тем, с генератора G1 на затвор VT1 поступает запускающий импульс, по переднему фронту которого транзистор открывается. Через ДНЗ начинает течь обратный ток, рассасывающий накопленный в нём заряд. По окончании этого процесса, в момент времени  $t_3$ , происходит “обрыв” тока в цепи ДНЗ и на нагрузке  $R_{load}$ , за счет накопленной в индуктивности энергии, формируется СКИ в течение отрезка времени  $t_3-t_4$ . Таким образом, предложенная схема позволяет регулировать объём накапливаемого заряда, за счет изменения длительности процесса инжекции, и задержки процесса начала экстракции.

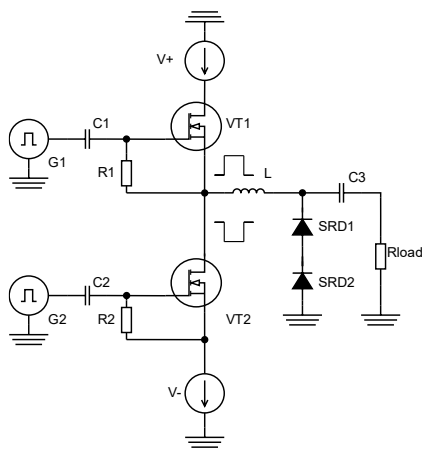


Рис. 1 – Схема генератора с двумя каналами управления.

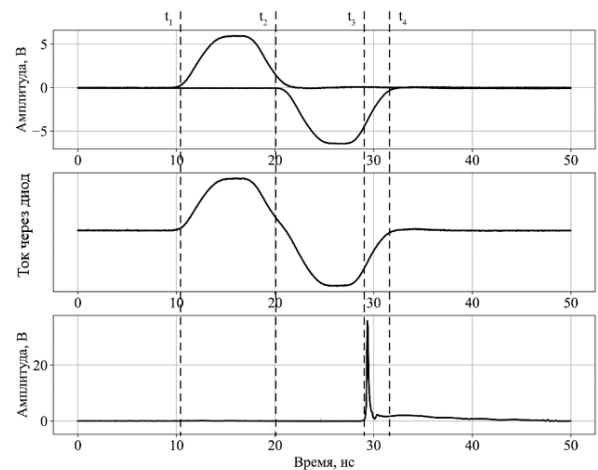


Рис. 2 – Временная диаграмма процесса формирования импульса на нагрузке.

**Вторая глава** посвящена исследованию физических процессов, протекающих в двухканальной схеме. Для этого разработаны модель генератора и его экспериментальный образец. В модели управления генератором предусмотрены импульсы разных длительностей с возможностью изменять порядок их следования и задержки между ними. Изменение порядка следования положительных и отрицательных управляющих импульсов необходимо для формирования СКИ разной полярности, а изменение длительности и задержки между импульсами позволяет управлять объёмом заряда в активной области ДНЗ.

В ходе моделирования продемонстрирована возможность управления объёмом накопленного заряда в активной области ДНЗ. Показано, что увеличение длительности инжекции увеличивает объём накопленного заряда, что в свою очередь, приводит к увеличению длительности процесса экстракции (рисунок 3).

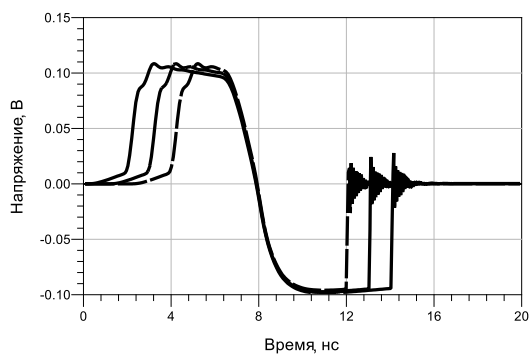


Рис. 3 – Импульсы напряжения при разных длительностях инъекции.

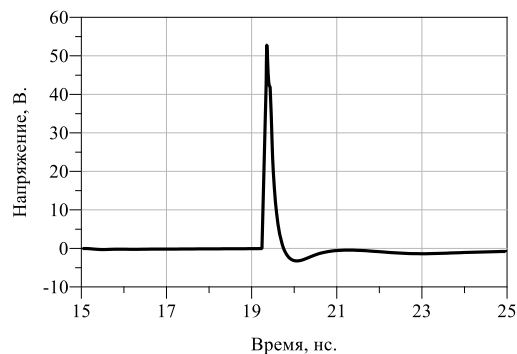


Рис. 4 – Форма импульса, полученная в ходе моделирования.

На рисунке 4 показан импульс, формируемый на нагрузке. Амплитуда полученного СКИ, в отсутствие возможных потерь, составляет 52,8 В, а длительность, рассчитанная по полувысоте, 170 пс. Также удалось значительно снизить уровень послеимпульсных искажений за счет выбора режима питания генератора.

Представлены результаты экспериментального исследования схемы генератора. Был реализован макет устройства (фото на рисунке 5). Регулирование процессов инъекции и экстракции осуществляется за счет последовательного открытия/закрытия каналов управляющих транзисторов VT1, VT2. С этой целью использовались генераторы Agilent 81104A (на рисунке 1 – G1, G2), синхронизированные между собой, выходы которых подключены к входам макета 1 и 2. Блоки питания обеспечивали подачу напряжения 5 В и минус 3 В, значения которых определяют токи инъекции и экстракции. К выходу 3 через аттенюатор 46 дБ подключен осциллограф Agilent DCA-X 86100D с входным сопротивлением равным 50 Ом.

В ходе проведения эксперимента на экране осциллографа наблюдался импульс колокольной формы, который изображен на рисунке 6. Полученный СКИ, имеет амплитуду, равную 50,8 В и длительность на полувысоте – 200 пс, меньшую в сравнении с расчетной, ввиду наличия затухания в макете сумматора.

Исследование зависимости формы СКИ от длительности процесса инъекции заряда в активную область ДНЗ заключалось в регулировании длительности импульсов генератора G2. Длительность этого импульса, очевидно, определяет длительность отрицательного импульса на стоке управляющего транзистора VT2, и вместе с тем, время протекания прямого тока через диод. Изменение длительности импульса осуществлялось в пределах 6–16 (нс), с шагом 1 нс. Синхронно менялось и положение импульса генератора G1 так, чтобы рассасывание заряда в ДНЗ начиналось сразу после окончания накопления.

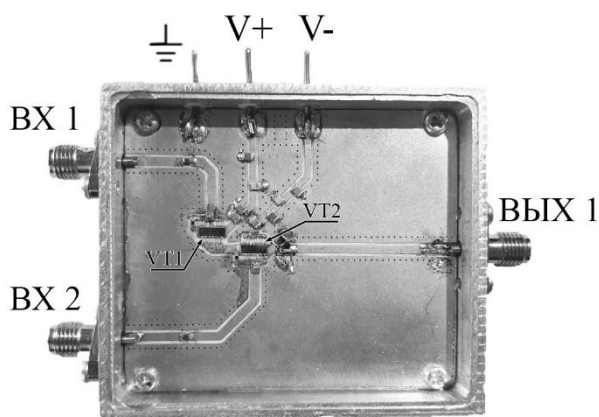


Рис. 5 – Макет генератора с независимым управлением временем накачки и рассасывания.

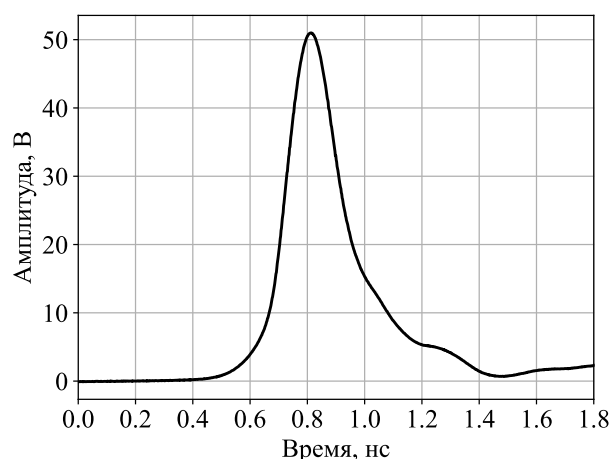


Рис. 6 – СКИ на выходе генератора с двумя каналами управления.

Вследствие изменения длительности импульса, управляющего инжекцией, меняется амплитуда и длительность СКИ на выходе генератора. Диапазон перестройки амплитуды составил величину порядка 19%, а длительности, порядка 31%. Дальнейшее увеличение длительности управляющего импульса не приводило к значительным изменениям амплитуды СКИ, что связано с насыщением количества накопленного заряда в активной области ДНЗ.

Привлечение к управлению генератором второго канала, отвечающего за момент начала рассасывания заряда, позволило расширить диапазон перестройки амплитуды и длительности СКИ до значений 44% и 97%, соответственно. Важным преимуществом такого генератора является наличие возможности одновременного изменения амплитуды и длительности выходного сигнала, при использовании его, например, в различных системах связи.

**В третьей главе** рассмотрен способ формирования СКИ в виде моноцикла и дуплета Гаусса. Спектр таких сигналов не содержит значительных составляющих на нулевой и низких частотах, что уменьшает потери при их излучении. В главе анализируются известные способы формирования таких СКИ и определяются их недостатки. В результате проведенного анализа предложен подход, позволяющий получать импульсы заданной формы, основанный на сложении нескольких колокольных видеоимпульсов. Основным элементом предложенного формирователя СКИ является сумматор Уилкинсона. Показано, чтобы обеспечить развязку между его входами и их согласование с подключенными генераторами в диапазоне частот СКИ, исследуемых в данной работе, достаточно использовать трёхзвенную конструкцию сумматора. Для расчета параметров топологии такого сумматора был применён итерационный алгоритм расчета, опирающийся на метод четных и нечетных мод. На основе вычисленных значений реализована модель устройства в пакете CST Studio. Проведено

электромагнитное моделирование, которое позволило учесть потери в диэлектрике и размеры микрополосковых линий. Подтверждена достаточность использования трёхзвенной структуры для сложения СКИ с шириной полосы спектра до 5 ГГц. Рассчитанные параметры топологии и экспериментальный образец сумматора представлены в таблицах 1, 2 и на рисунке 7, соответственно.

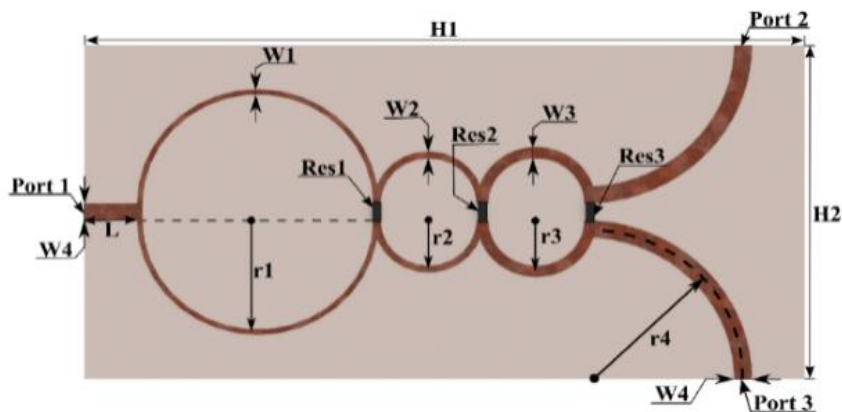


Рис. 7 – Топология трёхпортового сумматора

Таблица 1.  
Параметры топологии

Параметр	Значение, мм
H1	68
H2	33.6
r1	11.2
r2	4.9
r3	5.1
r4	15
W1	0.9
W2	1.3
W3	2.2
W4	3.5
L	5

Таблица 2.  
Сопротивления резисторов.

Резистор	Сопротивление, Ом
Res1	132
Res2	185
Res3	250

Трёхпортовый сумматор позволяет сложить сверхкороткие видеоимпульсы двух генераторов, что оказывается вполне достаточным для формирования моноцикла Гаусса. При этом необходимо иметь в наличии два генератора видеоимпульсов разной полярности. Для получения моноцикла необходимо обеспечить запаздывание отрицательного импульса относительно положительного. В этом случае моноцикл имеет вид, изображенный на рисунке 8б. При другом порядке следования положительного и отрицательного импульса, в результирующем моноцикле максимум и минимум поменяются местами. В данной главе проведено моделирование процесса формирования моноцикла в трехпортовом сумматоре, а также поставлен эксперимент по сложению СКИ с двух генераторов. Для проведения эксперимента был разработан формирователь, состоящий из двух генераторов СКИ разной

полярности и сумматора трёхзвенной конструкции. Как указывалось ранее, генератор отрицательного импульса срабатывает с задержкой, равной длительности видеоимпульса положительной полярности (рисунке 8а). Оба генератора подключены к каждому из входов сумматора. Результирующий импульс, сложенный из двух, формируется на его выходе и поступает на вход осциллографа. Осциллограмма полученного в эксперименте моноцикла изображена на рисунке 8б. Как видно, размах моноцикла составляет 38.8 В, а длительность, вычисленная от максимального до минимального значения – 290 пс. При этом уровень послеимпульсных искажений составил 11%. Формирование моноциклов различной длительности осуществляется выбором задержек запускающих импульсов, относительно друг друга. На рисунке 9 приведены осциллограммы моноциклов для трех значений задержек 100 пс, 50 пс и 0 пс, (т.е. ее отсутствия), а на рисунке 10 их частотные спектры. По графикам можно оценить величину возможной перестройки длительности моноцикла в диапазоне порядка 60%. В процессе моделирования получены аналогичные результаты.

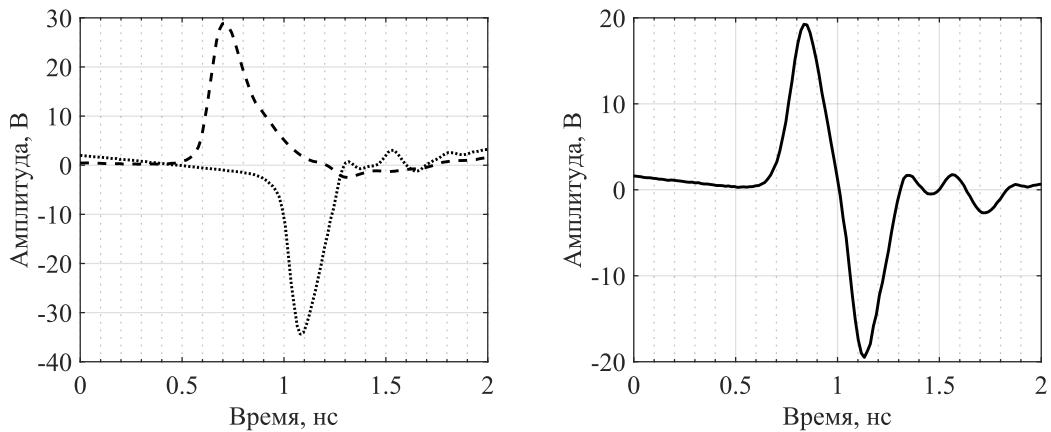


Рис. 8 – Осциллограммы импульсов с генераторов СКИ (а) и на выходе трёхзвенного сумматора (б).

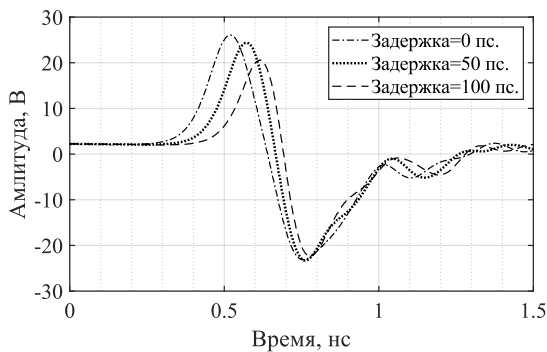


Рис. 9 – Осциллограммы моноциклов разной длительности

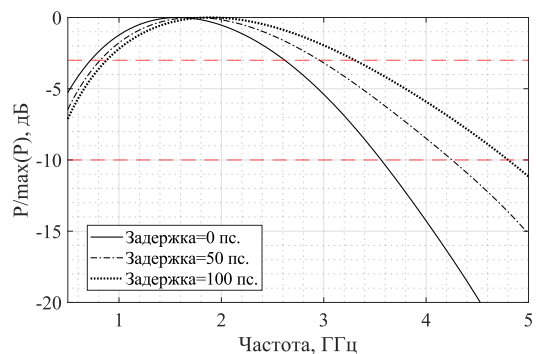


Рис. 10 – Спектры моноциклов разной длительности

Для получения импульса в виде дуплета Гаусса необходимо сложить, как минимум, три колокольных сигнала. Для решения этой задачи разработана пятипортовая конструкция, топология которой включает в себя три трёхпортовых сумматора. Выходы двух из них, подключены к входам третьего (рисунок 11). На основе этой топологии был изготовлен экспериментальный макет, представляющий собой устройство с четырьмя входами для подключения генераторов сверхкоротких видеоимпульсов разной полярности и одним выходом, подключенным к осциллографу.

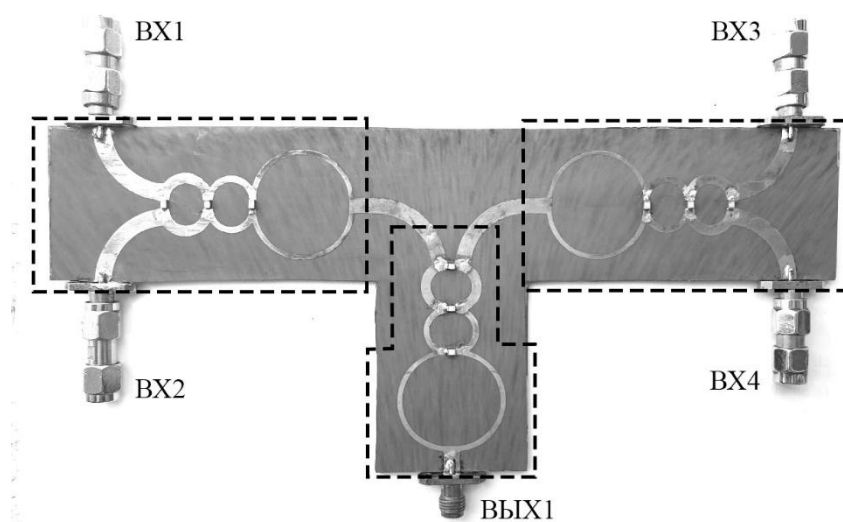


Рис. 11 – Конструкция пятипортового сумматора.

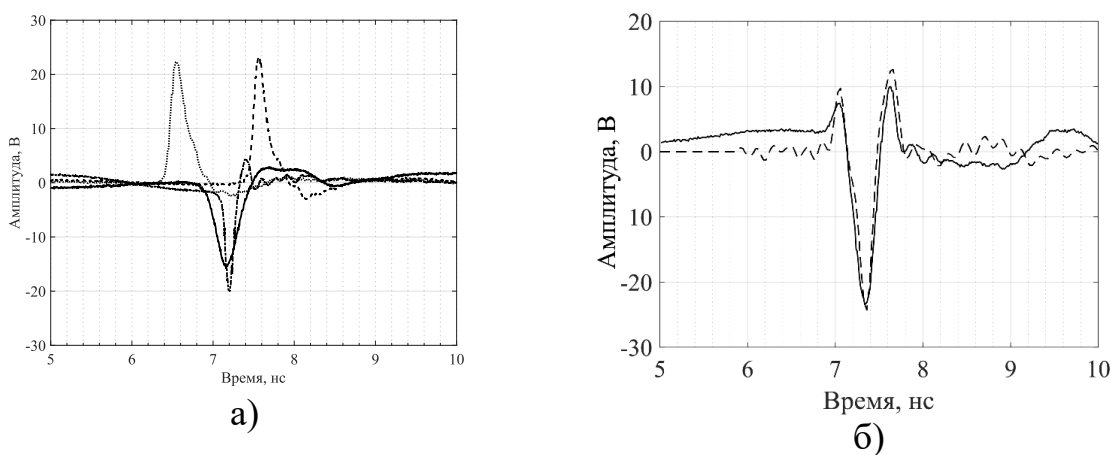


Рис. 12 – СКИ на выходе генераторов (а); сформированный дуплет (б): сплошной линией – эксперимент, пунктирной – моделирование.

Принцип формирования дуплета Гаусса заключается в следующем: на первый вход левого сумматора макета поступал положительный СКИ; с задержкой, равной его длительности, на третий и четвертый входы правого сумматора поступали СКИ отрицательной полярности и складывались в правом сумматоре; на второй вход левого сумматора поступал СКИ положительной полярности с задержкой, равной сумме длительностей первого

положительного импульса и суммарного отрицательного (рисунок 12а). В результате сложения четырех СКИ на выходе верхнего сумматора макета формируется импульс в виде дуплета Гаусса (рисунок 12б). Для сравнения с экспериментом, на рисунке 12б пунктирной линией представлен результат моделирования.

Пятипортовый экспериментальный макет позволяет формировать все виды импульсов, рассматриваемые в работе и другие импульсы, более сложных форм. Для достижения результатов использовались различные задержки видеоимпульсов, подаваемых на вход сумматора. Для получения моноцикла на входы 1, 2 сумматора поступали два отрицательных импульса, а на входы 3, 4 с задержкой, равной длительности отрицательного импульса, два положительных. Таким образом, положительные и отрицательные СКИ попарно складывались в правом и левом сумматорах, а результирующие импульсы подавались на входы верхнего сумматора. Этот подход позволил увеличить размах итогового моноцикла по сравнению с импульсом, сформированным трёхпортовым сумматором. На осциллографе наблюдали сигнал, изображенный на рисунке 13. Параметры полученного видеоимпульса: размах — 43.6 В, длительность от пика до пика — 210 пс, относительный уровень послеимпульсных искажений — 12%. Размах в таком случае на 118% выше относительно амплитуды исходных складываемых импульсов, тогда как в эксперименте с трёхпортовым сумматором этот показатель составил 63%.

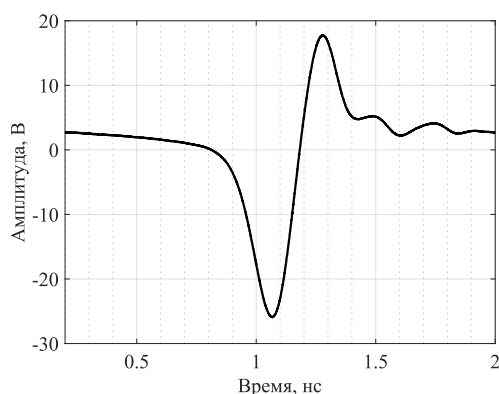


Рис. 13 – Моноцикл, полученный с помощью формирователя с пятипортовым сумматором.

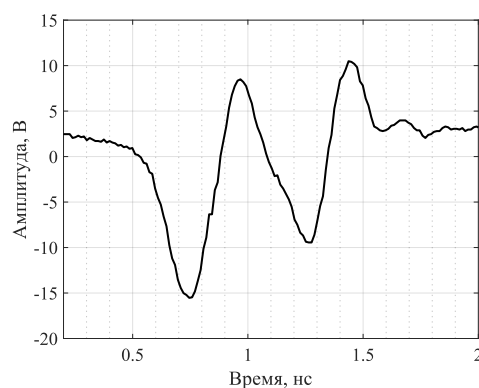


Рис. 14 – Двухпериодный импульс, сформированный при помощи управляемого формирователя.

С помощью предложенного макета, как указывалось ранее, могут быть получены и более сложные, например, Эрмитовы импульсы (рисунок 14). Для его формирования необходимо выбрать задержки импульсов так, чтобы каждый поступал на вход сумматора с задержкой равной длительности предыдущего.

**В четвертой главе** описан программно-аппаратный комплекс (ПАИК) измерения характеристик СКИ и управления формирователями видеоимпульсов.

Структура программного обеспечения комплекса включает в себя пять модулей. Модуль работы с лабораторным оборудованием отвечает за управление используемыми приборами при помощи SCPI-команд. Модуль обработки данных, поступающих от измерительного оборудования. Модуль, содержащий алгоритм формирования набора задержек запускающих импульсов с целью управления формой СКИ. Модуль анализа и сравнения характеристик сигналов, полученных в результате моделирования и эксперимента. И последний модуль визуализации для представления полученных данных в графическом виде.

Предложен алгоритм управления полярностью и длительностью импульса на выходе формирователя СКИ, использующий значения характеристик входных сигналов для определения их задержек. Принцип его работы состоит в следующем. Измеряются положения максимального и минимального значения положительного и отрицательного импульсов, соответственно, а также их длительность. На основе полученных данных рассчитываются времена задержек импульсов запускающих генераторов. Порядок следования импульсов, поступающих на вход сумматора, определяет формирование моноциклов разных полярностей на его выходе, изображенных на рисунке 15. Аналогичная последовательность операций используется и при формировании более сложных форм импульсов.

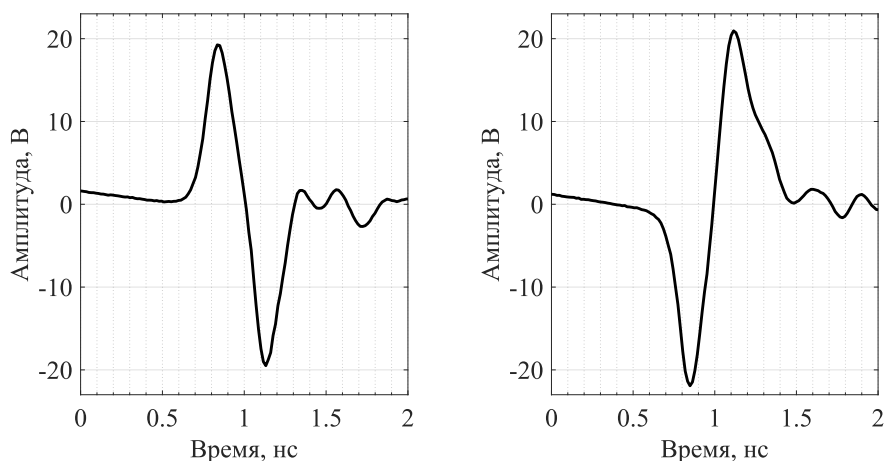


Рис. 15 – Осциллограммы моноциклов Гаусса разных полярностей.

**В заключение** приведены основные результаты работы.

1. Предложена методика независимого изменения длительности инжекции и начала момента экстракции заряда диода, опирающаяся на двухканальную схему управления. Проведено моделирование генератора СКИ с двухканальной схемой управления. Продемонстрирована возможность управления объёмом заряда за счет изменения длительности импульса накачки.

2. Определены параметры многозвенной конструкции сумматора Уилкинсона, с целью расширения его рабочей полосы при сложении СШП-сигналов.

3. Предложен метод формирования моноцикла и дуплета Гаусса на основе сложения нескольких однополярных импульсов. Проведено моделирование процесса формирования, подтвержденное экспериментально.

4. Разработан программно-аппаратный комплекс измерения параметров видеоимпульсов. Приведены алгоритмы расчета и управления генераторами СКИ.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации, опубликованные в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Бобрешов, А. М. Формирование сверхкоротких импульсов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона / А. М. Бобрешов, **А. Е. Елфимов**, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 46–52.

2. Величкина А. С. Генератор гауссовских импульсов с независимым управлением временем накопления и рассасывания заряда / А. С. Величкина, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков, А. М. Бобрешов // Радиотехника – 2024 г. – т. 88. – № 12. – С. 83–88.

3. Усков Г. К. Формирование дуплета гаусса с помощью конфигурируемого генератора СШП сигналов / Г. К. Усков, **А. Е. Елфимов**, К. В. Смусева, А. С. Величкина, А. М. Бобрешов // Журнал радиоэлектроника – 2023 г. – № 9. – С. 1–11.

4. Усков Г. К. Модель генератора с изменяемой формой СКИ / Г. К. Усков, **А. Е. Елфимов**, А. С. Величкина, А. М. Бобрешов // Журнал радиоэлектроника – 2024 г. – № 10. – С. 1–10.

### **Публикации, индексируемые базами Web Of Science и Scopus:**

5. Uskov, G. K. Formation of a Gauss Doublet Using a Configurable UWB Signal Generator. / G. K. Uskov, **А. Е. Elfimov**, A. S. Velichkina, K. V. Smuseva 2022 // IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). – 2022 г. – P. 110–112.

### **Статьи и материалы конференция:**

6. Бобрешов, А. М. Сложение сверхкоротких импульсов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона / А. М. Бобрешов, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков, А. С. Жабин // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции – 2019 г. – №6 – С. 69–73. – 16–18 апреля.

7. Елфимов, А. Е. Согласованный дифференциатор СКИ с низким уровнем звона / **А. Е. Елфимов**, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, А. С. Жабин // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной

научно-технической конференции, 2020 г. – №6. – С. 166–171. – 29 сентября – 1 октября.

8. Смусева, К. В. Расширение частотного диапазона сумматора Уилкинсона для формирования сверхкоротких импульсов / К. В. Смусева, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков, А. С. Величина // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции – 2022 г. – №4. – С. 315–322. – 29 сентября.

9. Елфимов, А. Е. Моделирование широкополосного сумматора конструкции Уилкинсона / **А. Е. Елфимов**, К. В. Смусева, А. С. Величина, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 130–131.

10. Елфимов, А. Е. Управление шириной спектра сверхкоротких импульсных сигналов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона / **А. Е. Елфимов**, К. В. Смусева, А. С. Величина, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков // XX Всероссийская молодёжная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – 2022 г. м – С. 72–74.

11. Величина, А. С. Моделирование импульсных сигналов с хаотическим заполнением / А. С. Величина, **А. Е. Елфимов**. // XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2023», секции «Физика». – 2023 г. – С. 547–549.

12. Смусева, К. В. Изменения длительности гауссовых биполярных импульсов с помощью реконфигурируемого генератора сверхкоротких импульсов / К. В. Смусева, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков, А. С. Величина // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции – 2023 г. – №3. – С. 316–320. – 18–20 апреля.

13. Величина, А. С. Программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения параметров. СШП-импульсов / А. С. Величина, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции – 2023 г. – №5. – С. 169–173. – 18–20 апреля.

14. Величина, А. С. Оценка квазигауссовских импульсов с помощью метода NMSE / А. С. Величина, **А. Е. Елфимов**, Г. К. Усков // X Международная заочная научно-техническая конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2023)». – 2023 г.

15. Усков, Г. К. Модель генератора с изменяемой формой СКИ / Г. К. Усков, **А. Е. Елфимов**, А. С. Величина, А. М. Бобрешов // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции – 2024 г. – №3. – С. 298–303. – 16–18 апреля.

16. **Елфимов, А. Е.** Исследование параметров диодов с накоплением заряда в САПР / **А. Е. Елфимов**, А. С. Величина, Г. К. Усков, А. М. Бобрешов. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2024. – № 6. – С. 4–5.

17. **Елфимов А. Е.** Перестраиваемый генератор СКИ с низким уровнем звона / **А. Е. Елфимов**, А. С. Величина, Г. К. Усков, А. М. Бобрешов // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов ФИТПВП-2023» – 2023 г. – С. 192–193. – 22–24 ноября.

**Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:**

18. Усков Г. К. Программа автоматизированного измерения параметров сверхкоротких импульсов в форме первой производной от гауссовой кривой: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024666631 Рос. Федерации / Г. К. Усков, К. В. Смусева, А. С. Величина, А. А. Кононов, **А. Е. Елфимов**. — Москва, 2024. — (заявка №2024665275, дата поступления 03.07.2024, опубл. 15.07.2019, Бюл. №7).

19. Усков Г. К. Программа автоматизированной оценки формы сверхкоротких импульсов квазигауссовой формы: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024666632 Рос. Федерации / Г. К. Усков, К. В. Смусева, А. С. Величина, А. А. Кононов, **А. Е. Елфимов**. — Москва, 2024. — (заявка №2024665273, дата поступления 03.07.2024, опубл. 15.07.2019, Бюл. №7).

20. Усков Г. К. Программа автоматизированного измерительного комплекса для измерения параметров сверхкоротких импульсов: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024681411 Рос. Федерации / Г. К. Усков, К. В. Смусева, А. С. Величина, А. А. Кононов, **А. Е. Елфимов**. — Москва, 2024. — (заявка № 2024680205, дата поступления 29.08.2024, опубл. 09.09.2019, Бюл. №7).