

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи



Елфимов Алексей Евгеньевич

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

1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Г.К. Усков

Воронеж 2024

Список используемых сокращений

ДНЗ – диод с накоплением заряда.

СШП – сверхширокополосный.

СКИ – сверхкороткий импульс.

ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

САПР – система автоматизированного проектирования.

ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы.

FIT – finite integration technique (метод конечного интегрирования).

ВЧ – высокочастотный.

СВЧ – Сверхвысокие частоты.

БП – блок питания.

ПАИК – программно-аппаратный измерительный комплекс.

ПО – программное обеспечения.

ООП – объектно-ориентированное программирование.

NMSE – normalized mean square error (нормированная среднеквадратическая ошибка).

VISA – Virtual Instrument Software Architecture (архитектура программного обеспечения виртуального прибора).

SCPI – Standard Commands for Programmable Instruments (стандартные команды для программируемых инструментов).

LAN – Local Area Network (локальная вычислительная сеть).

CSV – Comma-Separated Values (значения разделенные запятыми).

Содержание

Список используемых сокращений.....	2
Содержание.....	3
Введение.....	5
ГЛАВА 1. Исследование влияния динамики зарядов в структуре ДНЗ на форму СКИ.....	13
1.1 Принцип формирования сверхкоротких импульсов с использованием ДНЗ.....	15
1.2 Моделирование схемы генератора СКИ на основе ДНЗ.....	23
1.3 Методика управления временем инъекции и моментов начала экстракции заряда из ДНЗ.....	26
Выводы.....	29
ГЛАВА 2. Экспериментальные исследования генератора с управлением временем накачки и рассасывания.....	30
2.1 Моделирование схемы генератора с двумя каналами управления.....	31
2.2 Получение импульса при помощи экспериментального образца генератора.....	37
2.3 Форма СКИ при изменении длительностей и задержек запускающих импульсов.....	39
Выводы.....	43
ГЛАВА 3. Формирование СШП-импульсов при помощи сумматора конструкции Уилкинсона.....	45
3.1 Моделирование параметров сумматора для работы с СШП-сигналами.....	51
3.2 Исследование формирователя импульса формы моноцикла.....	73
3.3 Исследование формирователя импульса формы дуплета.....	85
3.4 Задание формы СКИ за счёт изменения задержек формирования входных сигналов.....	94

Выводы	97
ГЛАВА 4. Программно-аппаратный измерительный комплекс для работы с генераторами СКИ	99
4.1 Структура программно-аппаратного комплекса.....	101
4.2 Измерение характеристик генераторов и параметров СКИ	107
4.3 Алгоритмы управления формой СКИ.....	113
Выводы	117
Заключение	118
Литература	120

Введение

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке теоретических и экспериментальных методов генерации и управления формой сверхкоротких импульсов (СКИ). Один из способов получения таких импульсов основан на применении диодов с накоплением заряда (ДНЗ) с их свойством резкого восстановления обратного сопротивления. В работе предложена методика управления объёмом накопленного заряда в активной области ДНЗ. Величина объёма определяется длительностью процесса инжекции заряда и моментом начала его экстракции. Для подтверждения предположений на практике в работе приведена электрическая схема и экспериментальный образец *генератора СКИ с двухканальным управлением*, который позволяет менять время накачки и момент начала рассасывания заряда. Такие функции генератора предоставляют возможность формировать импульсы с заданными амплитудой и длительностью.

СКИ колокольной формы являются сверхширокополосными (СШП) сигналами, однако их основная энергия сосредоточена около нулевой частоты, из-за чего при их излучении происходят значительные потери. Этому недостатка лишены импульсы формы производных от кривой Гаусса, например, моноцикл и дуплет. Основная часть их энергии находится в области более высоких частот. В диссертации предложена методика формирования квазимоноцикла путём сложения сигналов двух генераторов разной полярности и методика формирования квазидуплета за счёт суммирования сигналов четырёх генераторов. Для сложения видеоимпульсов в устройстве используется многозвенная конструкция Уилкинсона. В диссертации проведены расчеты параметров конструкции трёхпортового и пятипортового образцов, которые позволяют складывать СШП-сигналы с шириной полосы от 0.5 до 5 ГГц. Для обоснования предложений на практике приведены схемы и реализованы два экспериментальных образца формирователей. Образцы позволяют устанавливать задержку между

складываемыми импульсами, что даёт возможность задавать форму итогового сигнала. В работе такие генераторы названы «*управляемый формирователь СКИ*».

В рамках диссертации разработан программно-аппаратный измерительный комплекс (ПАИК). Комплекс позволяет управлять лабораторным оборудованием и анализировать характеристики формируемых сигналов. Входящие в состав ПАИК алгоритмы позволяют измерять амплитуду, длительность и уровень послеимпульсных искажений. В комплекс включён программный модуль, реализующий методику оценки сходства между формами импульсов при помощи алгоритма Normalized Mean Square Error (NMSE). Алгоритмы позволяют анализировать импульсы формы колокола, моноцикла и дуплета. При помощи ПАИК было автоматизировано большой набор измерений для исследования зависимости формы видеоимпульсов от различных параметров, таких, как силы токов инжекции и экстракции заряда, время инжекции заряда, момент начала экстракции и т. д. В состав комплекса входит алгоритм формирования СКИ заданной формы. Для этого ПО выбирает задержки формирования сигналов и напряжения питания, используя для принятия решений результаты измерений параметров видеоимпульсов.

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) [30-32, 48-54]. 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 [61-63]. 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 [6-12, 14, 17, 21, 28, 57, 58], таких как 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 [3, 20, 34, 37, 38, 55].

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.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время исследования, посвященные формированию СКИ, сосредоточены вокруг улучшения параметров самого импульса. Освещаются такие проблемы, как увеличение амплитуды, минимизация послеимпульсных искажений и уменьшение длительности [19, 22-27, 50]. Эти параметры, безусловно, очень важны и также будут затронуты в этой диссертации. В диссертации также предложена методика формирования моноциклов и дуплетов, основанная на суммировании сигналов, предоставляет возможность управлять формой СКИ.

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.

Основные 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 проведенных, в рамках диссертационной работы, исследований были достигнуты следующие результаты:

1. Предложена методика управления объемом 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 инъекции 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 [34-44, 87, 90, 92-95], четыре из которых [36, 93-95] в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Одна [39] индексируемая базами Web Of Science и Scopus. Получены три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [88, 89, 91].

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.

ГЛАВА 1. Исследование влияния динамики зарядов в структуре ДНЗ на форму СКИ

Сверхкороткие импульсы колокольной формы могут быть сформированы генераторами, построенными на основе диодов с накоплением заряда. Различные схемы таких генераторов позволяют получать импульсы квазигауссовской формы, отличающиеся в большей или меньшей степени от их математического представления. Основной вклад в различие, как правило, вносят несимметричность фронтов импульса и послеимпульсные искажения (также называемые «звоном»).

Математическое представление импульса Гауссовой формы определяется выражением:

$$W(t) = \left[At \frac{\sqrt{2e}}{\tau} \right] e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса, τ – длительность импульса.

Эти параметры являются основными характеристиками СКИ. Длительность импульса, составляющая десятки пикосекунд, определяет ширину его спектра, достигающего нескольких октав. В связи с этим такие сигналы называют сверхширокополосными. Они обладают повышенной проникающей способностью и могут использоваться при обнаружении людей под завалами при землетрясениях, за бетонными преградами и др. [48, 49]. Такие генераторы также находят применение в медицине для дистанционного определения частоты дыхания и сердцебиения [84-86]. Поэтому оказывается востребованной разработка различных типов генераторов сверхкоротких импульсов с возможностью управления их амплитудой, длительностью и частотой следования. Связные системы при использовании таких сигналов предъявляют требования и к их форме. Это особенно важно при формировании моноцикла или дуплета Гаусса. Для оценивания ширины полосы сигналов не выработано строгих методик. Например,

в [30, 31] этот параметр оценивают по уровню 3 дБ относительно центральной частоты f_0 импульса. Правая и левая границы в этом случае рассчитываются как $f_1=0,3f_0$ - слева от центральной частоты и $f_2=1,9f_0$ - справа от f_0 . Таким образом, ширина спектра сигнала, определенная по этой методике, составляет величину порядка четырех октав.

Свойство широкополосности СКИ является их достоинством. Это преимущество позволяет реализовывать СШП-системы радиолокации и радиопозиционирования. Известно, что чем меньше длительность импульса, которым облучается объект, тем выше разрешающая способность системы [30, 31]. Эти преимущества полезны при построении систем радиолокации военного и гражданского применения. Приведенные сигналы имеют повышенную помехоустойчивость. СШП-сигналы находят применение и в системах радиосвязи [62, 63, 71, 72]. Из-за низкой спектральной плотности мощности СКИ такие системы могут работать параллельно с существующими устройствами связи, не мешая им при этом. Сверхширокая полоса таких сигналов придаёт им устойчивость к узкополосным помехам и многолучевому замиранию сигнала. Для применения в системах радиосвязи необходимо организовывать модуляцию последовательности видеоимпульсов. Для этого нужно уметь менять форму, чтобы получать последовательность сигналов разной полярности или длительности. Известны и другие способы модуляции, для которых необходимо менять задержку между СКИ. В качестве примера можно привести широтно-импульсную модуляцию. Из-за вышеназванного появляются требования к генераторам по регулировке формы видеоимпульсов. В этой главе рассмотрим способы формирования СКИ разной полярности и подходы к управлению их формой. Для понимания процесса генерации рассмотрим физику процессов, проходящих в ДНЗ. Это позволит прояснить способы управления длительностью и амплитудой СКИ, а также выявить подходы к формированию разных задержек между отдельными видеоимпульсами в последовательности.

1.1 Принцип формирования сверхкоротких импульсов с использованием ДНЗ

При проектировании генераторов на основе ДНЗ используют главное свойство таких полупроводниковых элементов, как способность быстро восстанавливать запирающие свойства р-п перехода. С этим связано резкое возвращение обратного сопротивления диода при переходе в закрытое состояние из состояния прямой проводимости. В результате этого процесса, соответственно, происходит резкий обрыв тока в его цепи [6-12].

Электрические принципиальные схемы генераторов СКИ разной полярности с диодом накопления заряда представлены на рисунке 1. Принципы построения подобных генераторов описаны в [9-12]. Для увеличения амплитуды сигнала также можно использовать несколько последовательно включенных ДНЗ [14].

В данной работе рассматривались модели и схемы для генерации положительных и отрицательных колокольных импульсов квазигауссовской формы. Моделирование генераторов импульсов разной полярности оказывается необходимым при их использовании в схемах сложения для формирования моноцикла или дуплета Гаусса. Принципиальные схемы генераторов отрицательного и положительного импульсов отличаются расположением диода и индуктивности L .

В схемах, представленных ниже, используется принцип накопления в индуктивности L энергии магнитного поля и последующей передачи ее в нагрузку в момент восстановления обратного сопротивления ДНЗ. Принцип формирования видеоимпульса можно описать, разбив процесс работы генератора на временные стадии. Ниже приведен пример формирования положительного импульса при помощи генератора с одним ДНЗ.

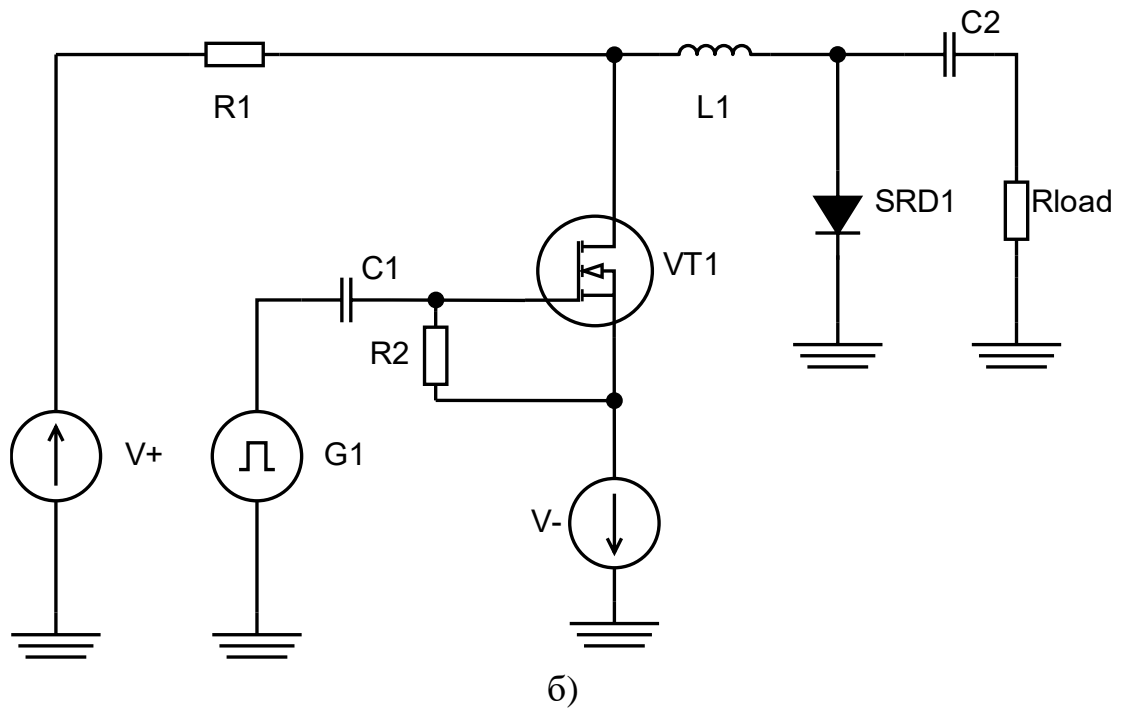
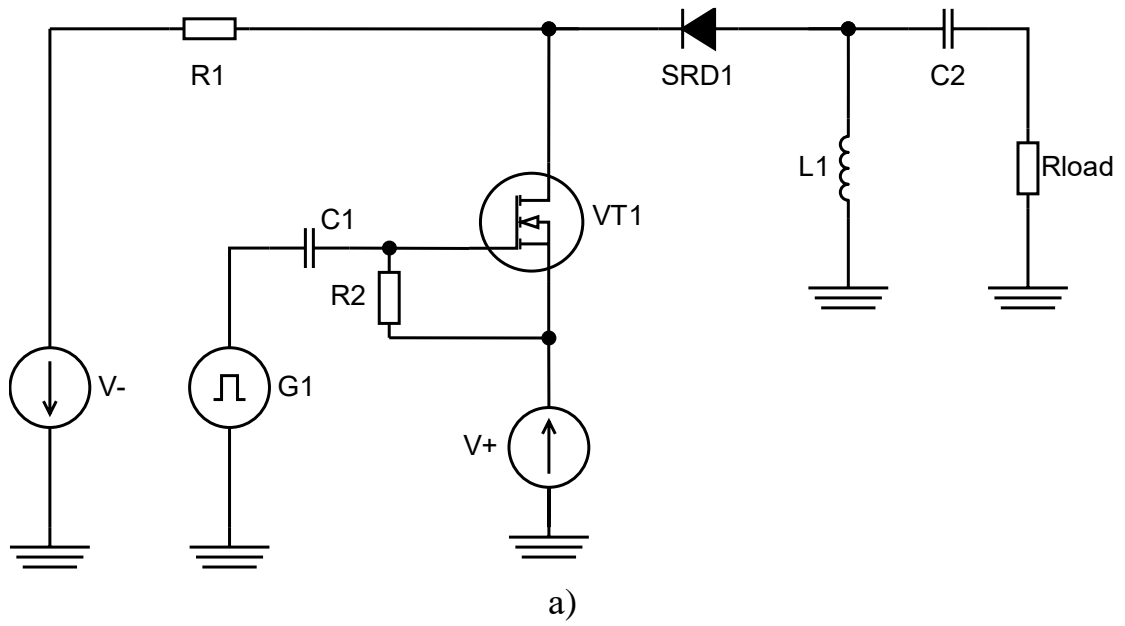


Рис. 1 - Электрическая схема генераторов СКИ на основе ДНЗ; (а) схема генерации импульса положительной полярности, (б) схема генерации импульса отрицательной полярности.

В течение первого отрезка времени диод работает в режиме накопления заряда в активную область. Транзистор закрыт. Через диод течет прямой ток, который ограничивается сопротивлением резистора R_1 . Происходит инжекция электронно-дырочной плазмы в ДНЗ. На этом этапе получим формулу, описывающую объём накопленного заряда в активной области диода, так как этот параметр напрямую связан с формой видеоимпульса. Для определения величины накопленного заряда запишем уравнение для протекающего тока $I_{SRD}(t)$:

$$L \frac{dI_{SRD}}{dt} = V^+ - I_{SRD}(R_1 + R_{SRD}), \quad (2)$$

где R_{SRD} – сопротивление ДНЗ, смещенного в прямом направлении из-за протекания тока $I_{SRD}(t)$.

Решив дифференциальное уравнение (2), получим зависимость тока в цепи от времени:

$$I_{SRD}(t) = \frac{V^+ \left(1 - \exp\left(-\frac{R_1 + R_{SRD}}{L} t\right) \right)}{R_1 + R_{SRD}} \quad (3)$$

Таким образом, ток растет по асимптотическому закону к значению $V^+/(R_1 + R_{SRD})$. Вследствие протекания через ДНЗ прямого тока происходит инжекция электронов и дырок в активную область диода. Процесс изменения заряда описывается следующим образом:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{SRD}(t) - \frac{Q(t)}{\tau}. \quad (4)$$

В этой формуле символом τ обозначим время жизни для неосновных носителей заряда в активной области ДНЗ. Вычитаемое в правой части выражения (4) описывает рекомбинацию заряда, а $Q(t)$ - величину этого заряда в зависимости от времени. Когда процесс инжекции заряда уравнивается процессом рекомбинации, устанавливается стационарный режим диода. В этом режиме dQ/dt равняется 0, из чего следует, что величина накопленного заряда определяется выражением:

$$Q_p = I_{пр} \tau \quad (5)$$

Знание о величине заряда необходимо, так как этот параметр влияет на амплитуду и длительность СКИ, а также определяет длительность экстракции заряда, которая происходит на следующей стадии работы схемы.

На второй стадии происходит рассасывание заряда из активной области ДНЗ. На затвор транзистора VT1 поступает управляющий сигнал, вследствие чего он открывается. Через диод начинает течь обратный ток. Уравнение, описывающее изменение объёма заряда в процессе экстракции:

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t) - \frac{Q(t)}{\tau} \quad (6)$$

В выражении слагаемое $-I(t)$ описывает обратный ток, протекающий через ДНЗ. Этот ток способствует рассасыванию накопленного заряда из активной области диода. Для перехода к резкому восстановлению обратного сопротивления диода необходимо удалить из него весь накопленный заряд. Время рассасывания можно рассчитать, используя формулу:

$$\int_{t_0}^{t_1} I(t) dt = Q_p, \quad (7)$$

где время рассасывания заряда активной области ДНЗ равно $t_1 - t_0$. Выражение для тока под интегралом (7) может быть записано в виде:

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{V^- \left(1 - \exp \left(-\frac{R_{sum}}{L} t \right) \right)}{R_{sum}} dt = Q_p, \quad (8)$$

где $R_{sum} = R_{VT} + R_{SRD}$. R_{VT} - собственное сопротивление канала полевого транзистора в открытом состоянии, а R_{SRD} - собственное сопротивление диода при протекании через него обратного тока.

Возьмем за начало отсчета времени момент t_0 . Выразим момент времени t_1 , в который заряд полностью будет изъят из активной области диода:

$$V^- \left(t_1 + \frac{L}{R_{sum}} \left(\exp \left(-\frac{R_{sum}}{L} t_1 \right) \right) - 1 \right) = R_{sum} I_{пр} \tau \quad (9)$$

Такое уравнение является трансцендентным, поэтому решение может быть найдено только с помощью численных подходов. V^- может быть выражено через величину обратного тока и суммарное сопротивление цепи, через которую протекает ток:

$$V^- = I_{обр} * R_{sum} \quad (10)$$

Таким образом, может быть рассчитано время экстракции заряда из активной области диода. Этот параметр необходим для определения длительности управляющего импульса экстракции.

Третья стадия работы генератора характеризуется резким восстановлением сопротивления ДНЗ. Время перехода диода в это состояние называют временем переключения $t_{пер}$. Оно зависит от параметров самого диода [57, 58]:

- D_p – коэффициент диффузии носителей заряда;
- D – коэффициент диффузии;
- $t_{диф}$ – время диффузии;
- A – площадь полупроводникового перехода;
- W – толщина кристалла полупроводника;
- N_0 – концентрация примесей;
- τ_p – эффективное время жизни носителей заряда.

Полностью эта зависимость представляется следующим выражением:

$$t_{пер} = \frac{1}{D_p} \left(\frac{I_{пр} \frac{\tau_p}{A}}{2eN_0 \left(\frac{W}{4DT_{диф}} \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (11)$$

где символом e обозначен элементарный электрический заряд.

Импульс, формируемый на нагрузке R_{load} (обозначим её R_l) в предложенной схеме генератора, можно описать, применяя первый и второй законы Кирхгоффа.

$$\frac{d^2 U_{Rl}}{dt^2} + \frac{R_l}{L} \frac{dU_{Rl}}{dt} + \frac{U_{Rl}}{LC} = -R \frac{d^2 I_D}{dt^2} \quad (12)$$

Определим ток через диод во время переключения по формуле:

$$I_{SRD}(t) = I_{обп} \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (13)$$

где t_e время, за которое ток, протекающий через ДНЗ во время переключения, падает в e раз. С учетом этого решим уравнение (12):

$$U_{Rl} = (A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) \exp\left(-\frac{R}{2L} t\right) - A \exp\left(-\frac{t}{t_e}\right), \quad (14)$$

где коэффициенты A , B и циклическая частоты ω определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A &= \frac{I_{\text{обп}} R L C}{t_e^2 - R C t_e + L C}, \\ B &= \frac{-A}{\omega} \sqrt{\frac{1}{t_e} - \frac{R}{2L}}, \\ \omega &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{L C} - \frac{R^2}{L^2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Используя (14) и входящие в него коэффициенты (15), можно получить аналитическую форму сигнала на выходе генератора при заданном режиме работы устройства.

Принцип формирования импульса проиллюстрирован на рисунке 2. Здесь же определены этапы, упомянутые ранее - процесс накопления заряда до момента времени t_1 , процесс смены напряжения и рассасывания заряда на отрезке t_1 - t_3 , переключение диода на отрезке t_3 - t_4 . Также на рисунке (пунктирной линией) изображен процесс рассасывания паразитного заряда, обусловленный амбиполярной диффузией, вследствие которой некоторое количество дырок и электронов оказывается за границей активной области.

Данные аналитические выкладки качественно описывают физику процессов в рассматриваемом генераторе импульсов. Однако в них есть несколько допущений, например, внутреннее сопротивление ДНЗ и транзистора считаются постоянными на всем периоде формирования импульса. Кроме этого, известно, что характеристики конкретных диодов с накоплением заряда могут отличаться [28].

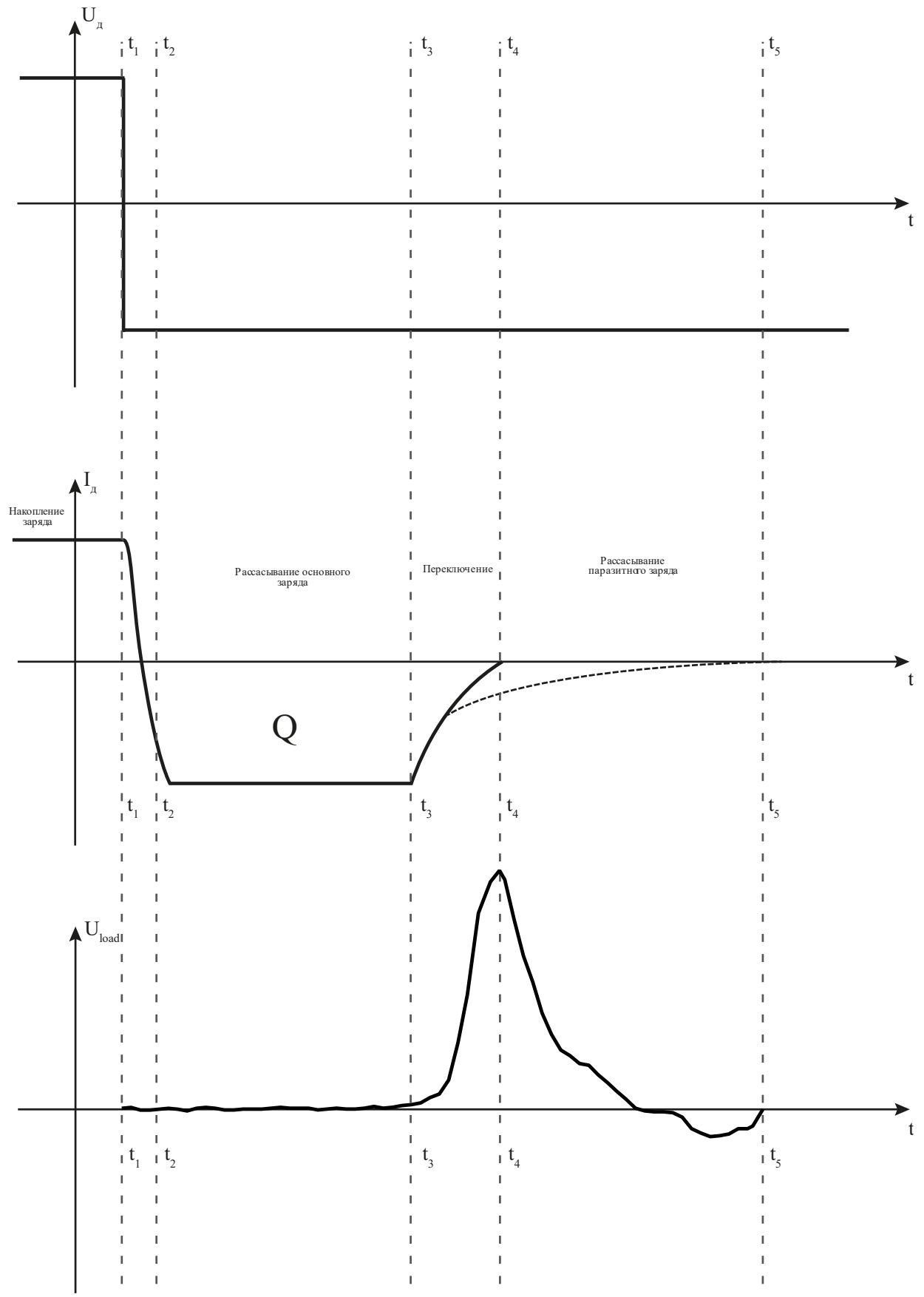


Рис. 2 – Временная шкала процесса формирования СКИ. Напряжение на диоде (U_d), ток через диод (I_d) и напряжение на нагрузке (U_{load}).

Необходимо учесть, что для увеличения амплитуды импульса в схеме генератора используется несколько последовательно включенных ДНЗ. Вышеперечисленные допущения будут учтены в процессе моделирования, который будет проведен в следующем разделе текущей главы. В моделировании учтем параметры, которые затем будут применены в натурном образце генератора. Предложенное моделирование позволит учесть влияние на форму импульса других элементов схемы - например, транзистора и его характеристик, пассивных элементов и их паразитных характеристик. Кроме того, созданная модель позволяет провести расчеты различных зависимостей, таких, как отношение формы импульса к изменению длительности тока инжекции и момента начала экстракции заряда.

1.2 Моделирование схемы генератора СКИ на основе ДНЗ

Были построены модели электрических схем генераторов отрицательного и положительного импульсов. При построении модели генератора использовались средства автоматизированного проектирования Keysight ADS. Для описания работы диода были использованы зависимости, описанные в [15-18]. Предложенная модель учитывает процесс накопления заряда в активной области диода. Описание процесса хранения заряда основано на уравнении переноса амбиполярных носителей заряда. Зависимость емкости перехода от смещения описывается уравнением, приведенным в статье [15]. Модель учитывает в качестве параметров время жизни заряда и емкость перехода, что необходимо для реализации генератора видеоимпульсов, в которых применен ДНЗ. Для расчета характеристик использованы параметры диода MAVR-044769-12790T из документации производителя MACOM [13]. На основе этого диода в дальнейшем был построен натурный образец генератора сверхкоротких видеоимпульсов.

Предложенная схема модели изображена на рисунке 3. Параметры импульсов запуска были выбраны в соответствии с возможностями лабораторных

генераторов, применённых в натурном эксперименте. Длительность запускающего импульса равнялась 9 нс, амплитуда импульса - 10 В. Питание схемы осуществлялось при помощи источников постоянного тока. Напряжение положительного питания составило 25 В, отрицательного - минус 15 В. Для ограничения прямого тока через ДНЗ был применен резистор R21 с сопротивлением 50 Ом. Были также учтены потери в индуктивности, возникающие из-за её омического сопротивления. Модель учитывает характеристики транзистора [33]. Результирующий сигнал наблюдался на нагрузке R25 с сопротивлением 50 Ом. На выходе схемы генератора подключен конденсатор, чтобы предотвратить протекание постоянного тока через выходную нагрузку.

Была также реализована модель для формирования положительного СКИ. Схема такого генератора была приведена ранее в этой главе (рисунок 1а). Моделирование позволило рассчитать формы колокольных импульсов квазигауссовской формы. В результате был получен отрицательный импульс колокольной формы, изображенный на рисунке 4а, и положительный (рисунок 4б).

Параметры положительного импульса, полученные при моделировании:

- амплитуда 45 В;
- длительность по полувысоте 280 нс.

Отрицательный импульс:

- амплитуда 35 В;
- длительность по полувысоте 220 пс.

Как видно из результатов моделирования, схема с ДНЗ позволяет формировать видеоимпульсы с длительностью сотни пикосекунд. Описанный подход позволяет получать СКИ разной полярности. Однако предложенная модель не позволяет управлять процессом инжекции заряда, из-за чего невозможно изучить его влияние на форму СКИ. В предложенной схеме накопление заряда происходит достаточно долго, соответственно, всегда наблюдается полное заполнение активной области ДНЗ - зарядом.

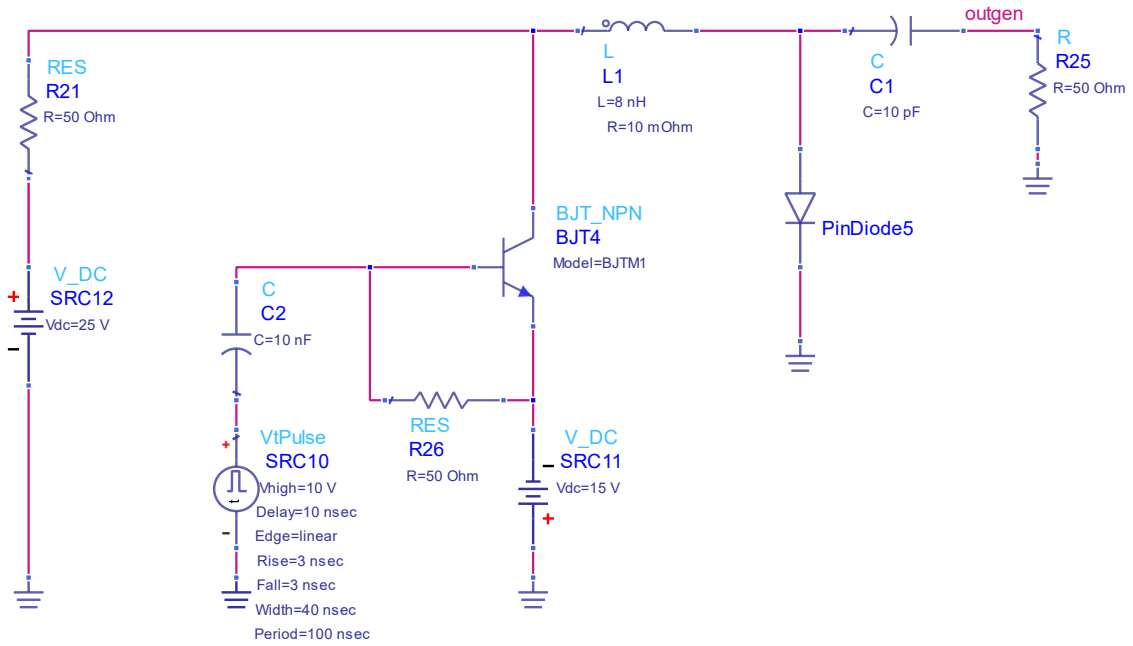


Рис. 3 - Схема генератора в САПР для моделирования.

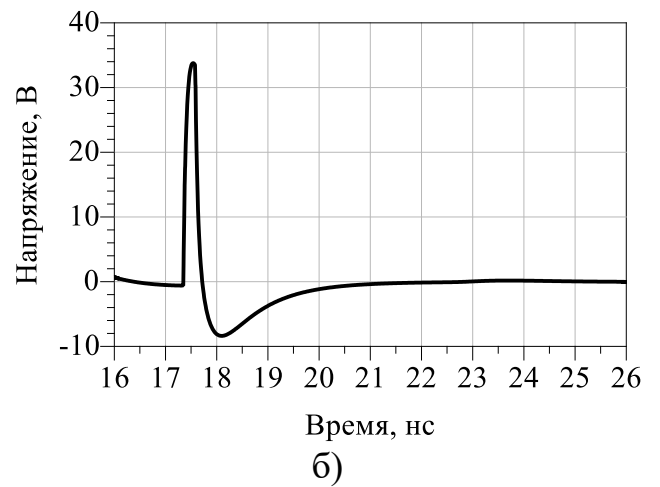
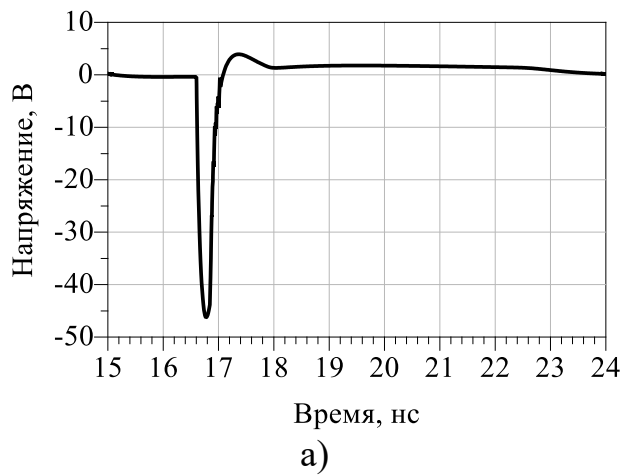


Рис. 4 - Осциллограммы колокольных СКИ, полученные в результате моделирования генератора на основе ДНЗ. Отрицательный (а) и положительный (б).

Управление объёмом заряда напрямую связано с формой импульса. Регулирование позволит создавать последовательность импульсов разной формы, что необходимо при модуляции такого сигнала. То есть важно уметь управлять моментом и длительностью процесса инжекции. Для этого необходимо изменить схему формирования импульсов тока накачки и рассасывания. В следующей главе рассмотрим генератор СКИ с двухканальной схемой управления, который позволяет управлять длительностью инжекции и экстракции.

1.3 Методика управления временем инжекции и моментов начала экстракции заряда из ДНЗ

Одним из недостатков описанной ранее схемы является невозможность корректировать время инжекции заряда. Контроль над процессом накопления заряда добавляет возможность управлять формой видеоимпульса. Ещё одним недостатком описанной схемы генератора является большой уровень послеимпульсных искажений (рисунок 4). «Звон» вносит паразитные высокочастотные составляющие в итоговый сигнал. Эти компоненты мешают, например, при формировании сложных импульсов с помощью сумматора СШП-сигналов. При сложении искажения могут накладываться на полезную часть сигнала, отклоняя её форму от прогнозируемой. Для правильной работы системы с сумматором нужно заранее избавиться от послеимпульсных искажений на выходе генератора СКИ колокольной формы. Для уменьшения «звона» также предлагается внести изменения в схему генератора.

Рассмотрим схему с двумя генераторами запуска, выходы которых подключены к затворам управляющих транзисторов. Два полевых транзистора управляют токами инжекции и экстракции заряда соответственно. Предложенное решение позволяет независимо управлять процессами накопления и началом рассасывания в ДНЗ. Схема генератора с двумя каналами управления изображена на рисунке 5. Транзисторы обозначены как VT1 и VT2. К схеме подключены два

источника постоянного тока разной полярности: $V+$ и $V-$. Для управления моментом начала и длительностью процесса инъекции был использован генератор прямоугольных сигналов $G2$. Для управления процессом экстракции используется генератор прямоугольных сигналов $G1$. Для увеличения амплитуды колокольного СКИ использованы два последовательно соединенных ДНЗ. Они обозначены на схеме как SRD_1 и SRD_2 . Последовательное соединение диодов позволяет увеличить общую амплитуду колокольного СКИ. Импульс можно наблюдать на нагрузке R_{load} с сопротивлением 50 Ом.

Принцип работы участка схемы с ДНЗ, отвечающего за формирование СКИ, аналогичен схеме одноканального генератора. Описание его работы было приведено ранее в этой главе. Однако добавление второго канала позволяет независимо регулировать моменты начала и длительности процессов инъекции и экстракции. Процедура формирования видеоимпульса проиллюстрирована на временной диаграмме рисунка 6. Работу схемы можно описать следующим образом:

1. По переднему фронту импульса с генератора $G2$ открывается транзистор $VT2$. В ДНЗ происходит накопление заряда за счет протекания через него прямого тока. На рисунке 6 это промежуток времени $t1-t2$.
2. По заднему фронту импульса с $G2$ транзистор $VT2$ закрывается, после чего прекращается инъекция заряда. На рисунке 6 это момент времени $t2$.
3. Сразу после этого с генератора $G1$ на затвор $VT1$ поступает запускающий импульс. По его переднему фронту транзистор открывается. Через ДНЗ начинает течь обратный ток, рассасывающий накопленный в нём заряд.
4. После окончания процесса рассасывания заряда, в момент времени $t3$ происходит обрыв тока в цепи, на нагрузке R_{load} формируется СКИ. Отрезок времени $t3-t4$.

Описанная схема позволяет независимо управлять временем накопления и рассасывания заряда в активной области ДНЗ. Вследствие этого в момент переключения меняется величина магнитной энергии в индуктивности L , что, в свою очередь, напрямую связано с формой колокольного импульса.

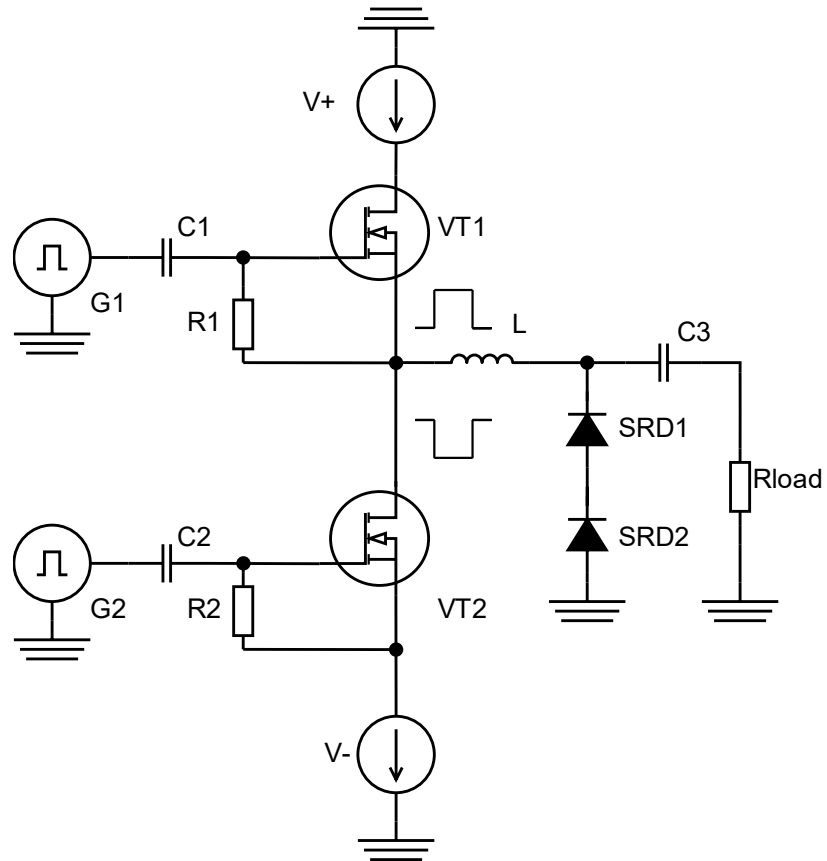


Рис. 5 – Схема генератора с независимым управлением временем инжекции и экстракции заряда.

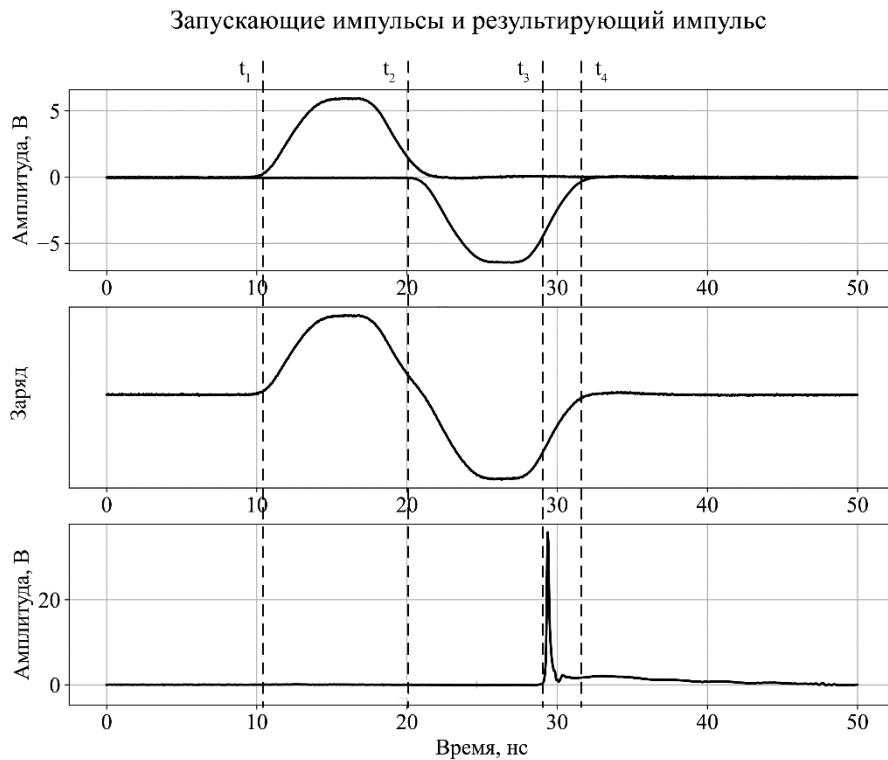


Рис. 6 – Временная диаграмма процесса формирования импульса на нагрузке.

Для демонстрации предложенного подхода в следующей главе будет проведено моделирование и экспериментальное исследование двухканальной схемы управления. Будет показана возможность изменения объёма заряда в такой схеме генератора.

Выводы

В вышеизложенной главе рассмотрены физические принципы формирования СКИ. Описаны токоразмыкающие свойства диода с накоплением заряда и их использование в схеме генератора видеоимпульса. Проведен анализ работы схемы генератора сверхкоротких импульсов с ДНЗ. Выявлена зависимость формы импульса от объёма, инжектируемого в активную область диода заряда.

Было проведено моделирование схемы генератора с единственным каналом управления процессом экстракции заряда в активной области ДНЗ. Выявлены недостатки одноканальной схемы. Исследованная модель не позволяет регулировать объём инжектируемого заряда, так как в схеме отсутствует возможность управлять этим процессом. Следовательно, в таком формирователе нельзя менять форму импульса за счет изменения длительности процесса инжекции. Ещё одним недостатком этой схемы является значительный уровень послеимпульсных искажений. Искажения негативно влияют на форму сигнала при сложении СКИ с нескольких генераторов.

Для решения описанных недостатков была предложена двухканальная схема управления. Эта схема позволяет регулировать длительность процесса инжекции и момент начала экстракции. Регулирование этих процессов позволяет управлять объёмом накопленного заряда, а следовательно, и формой СКИ на выходе генератора.

ГЛАВА 2. Экспериментальные исследования генератора с управлением временем накачки и рассасывания

Для подтверждения предложенного метода формирования СКИ проведена серия моделирований. Были исследованы двухканальные схемы управления. Продемонстрировано, что предложенная схема позволяет менять объём накопленного заряда. В следующем моделировании подтверждено, что изменение объёма позволяет управлять формой СКИ.

Полученные результаты были использованы при изготовлении экспериментального макета формирователя. В качестве подложки печатной платы был использован материал Rogers RO4350D с диэлектрической проницаемостью 3.48 и толщиной 0.76 мм. Данный препрег был выбран, так как имеет стандартизированные частотные характеристики от 0 до 5 ГГц. В этом же диапазоне располагается спектр исследуемых видеоимпульсов.

При формировании управляющих импульсов использовались лабораторные генераторы. Для управления токами инжекции и экстракции использовались транзисторы Ampleon [33]. В качестве токоразмыкающих элементов были применены ДНЗ фирмы MACOM модели MAVR-044769-12790T [13]. Их параметры ранее использовались при моделировании. Для увеличения амплитуды в схеме были последовательно соединены два таких диода.

Для упрощения процесса монтажа транзисторов на текстолит была нанесена никелевая и золотая плёнки. Для защиты от внешних механических повреждений и пыли, а также для уменьшения внешних электромагнитных воздействий устройство было помещено в металлизированный корпус.

Натурный образец был изготовлен для подтверждения работоспособности двухканальной схемы управления инжекцией и экстракцией, а именно для демонстрации возможности управления формой СКИ за счет регулирования объёма накопленного заряда. Важно было также зафиксировать уровень послеимпульсных искажений в получаемом сигнале, так как во время

моделирования не учитывались паразитные параметры печатной платы, которые могут негативно сказаться на этом параметре.

2.1 Моделирование схемы генератора с двумя каналами управления

Для подтверждения работы алгоритма формирования СКИ было проведено моделирование. На первом этапе была построена модель для формирования запускающих импульсов. Схема запуска изображена на рисунке 7. На ней, соответственно, нет блока формирования квазигауссовского импульса, состоящего из элементов L, C и диодов с накоплением заряда SRD_1 , SRD_2 . В предложенной схеме были использованы параметры транзисторов фирмы Ampleon [33]. Полоса рабочих частот выбранных транзисторов позволяет использовать запускающие импульсы с параметрами, необходимыми для работы схемы генератора. Позднее использованные в модели транзисторы были применены в натурном образце.

Для формирования запускающих сигналов применялись генераторы прямоугольных видеоимпульсов SRC1 и SRC2. Параметры запускающих импульсов: амплитуда - 6 В, длительность импульса - 9 нс. Характеристики импульсов совпадают с возможностями лабораторных генераторов, задействованных позднее в экспериментальной установке. Напряжение на выходе запускающей схемы наблюдалось на резисторе с сопротивлением 50 Ом. Пример осциллограммы на выходе модели приведен на рисунке 8.

При моделировании была подтверждена возможность формирования меандра. Также была проверена возможность независимо менять длительности и задержки между импульсами. Так, предложенная схема может быть использована для управления процессами инъекции и экстракции заряда в активной области ДНЗ.

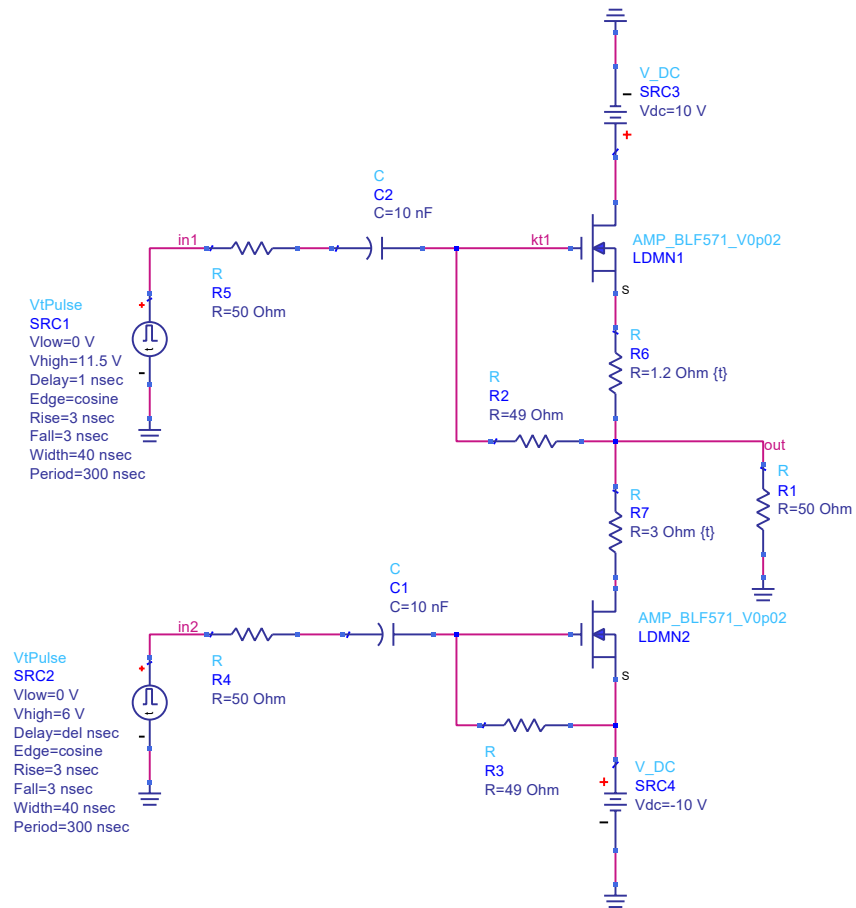


Рис. 7 – Принципиальная схема, используемая при моделировании схемы генератора СКИ.

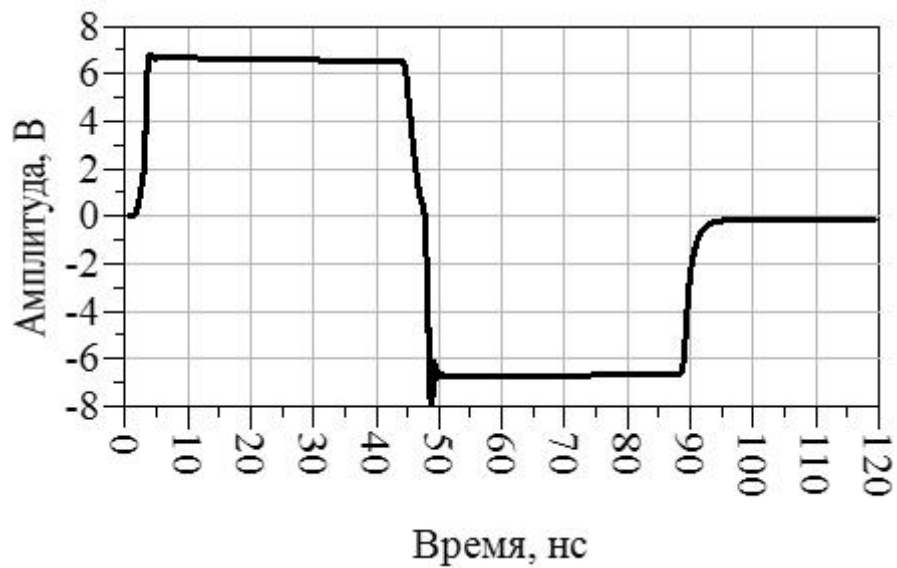


Рис. 8 – Осциллограмма, полученная на выходе схемы запуска генератора СКИ при моделировании.

Для исследования управления объёмом заряда была построена модель, в схеме которой использовано прямое включение диода без индуктивности. Такое включение позволяет косвенно наблюдать процессы в диоде в период накопления и рассасывания заряда. Схема модели приведена на рисунке 9. Резистор R8 с сопротивлением 0.1 Ом используется для ограничения прямого и обратного тока, протекающего через диод. Изменение напряжения наблюдается на нагрузке R1. Работа схемы аналогична описанной ранее в этой главе. Вначале через диод протекает прямой ток, вследствие чего в активной области накапливается заряд. В этот момент на R1 будем наблюдать положительное напряжение. Затем управляющий транзистор LDMN1 закрывается, вслед за ним сразу открывается LDMN2, после чего начинает течь обратный ток. В этот момент на R1 отрицательное напряжение. Когда весь накопленный заряд рассасывается, происходит резкое восстановление сопротивления диода, после чего на R1 значение напряжения становится равным нулю.

Запускающий импульс, поступающий на LDMN1, позволяет контролировать время протекания тока через ДНЗ. Была исследована зависимость длительности рассасывания от длительности протекания прямого тока через диод. Полученная зависимость приведена на рисунке 10. Из графика видно, что чем длиннее процесс инъекции, тем больше времени требуется для экстракции накопленного заряда из активной области ДНЗ. То есть предложенный метод позволяет управлять объёмом заряда. Также было установлено, что объём заряда конечен и зависит от параметров конкретного диода, что было показано ранее в этой главе. Для исследования работы схемы в режиме генерации была также построена модель, к рассмотрению которой мы перейдем далее в этом разделе.

На третьем этапе была построена модель генератора с независимым управлением временем накачки и рассасывания по схеме (рисунок 5). На выходе модуля формирования находится конденсатор C3, который необходим, чтобы через нагрузочное сопротивление не протекал постоянный ток.

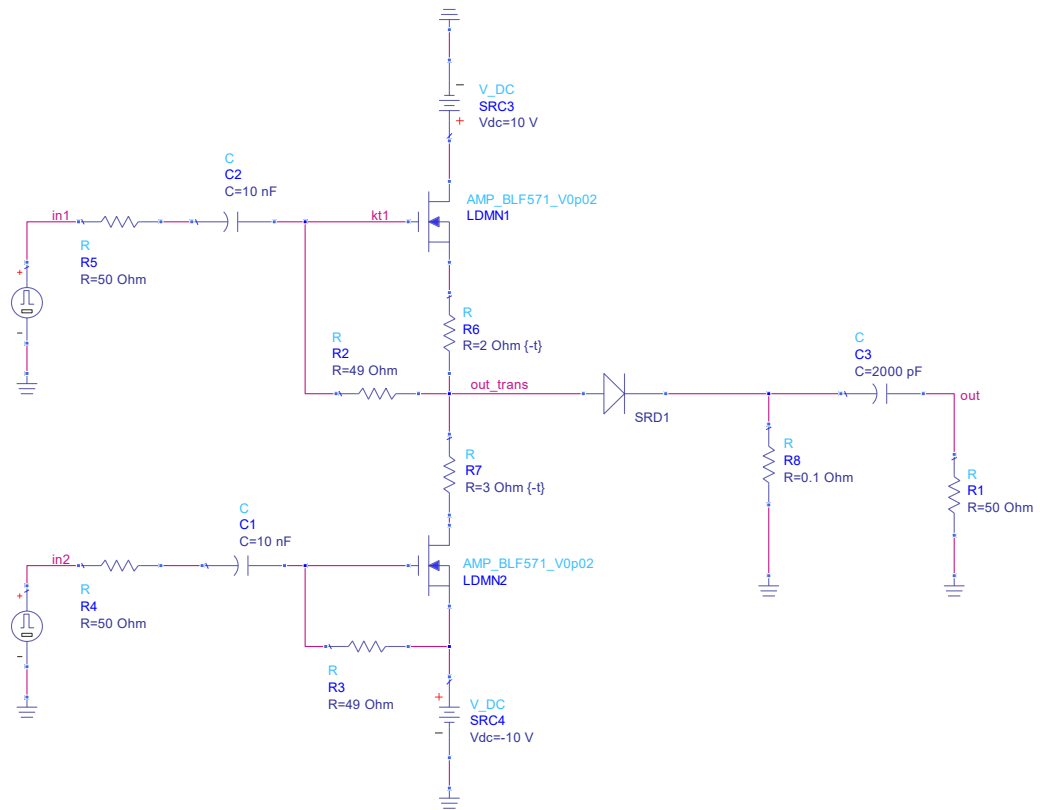


Рис. 9 – Схема модели для исследования управления объёмом заряда в ДНЗ.

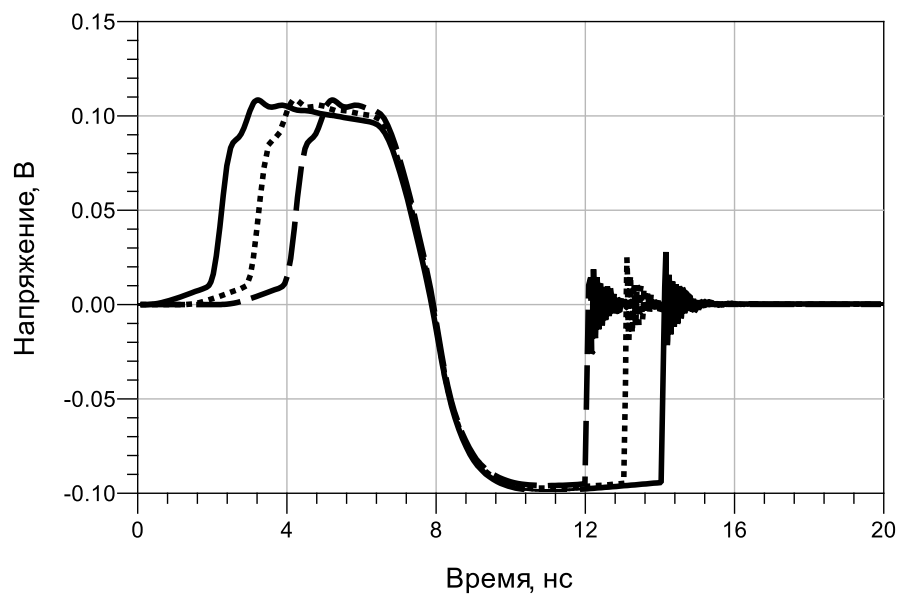


Рис. 10 – Напряжение на нагрузке при разных длительностях инъекции.

Сформированный СКИ наблюдается на R_{load} с сопротивлением 50 Ом. Форма полученного видеоимпульса изображена на рисунке 11. Амплитуда полученного СКИ составляет 52,8 В. Длительность, рассчитанная по полувысоте, 170 пс. Также необходимо отметить незначительный уровень послеимпульсных искажений.

Затем была исследована зависимость изменения формы импульса от объёма инжектируемого заряда. Для этого менялась длительность импульса накачки. В то же время пропорционально увеличивалась задержка для импульса рассасывания, чтобы избежать пересечения процессов инжекции и экстракции. В результате моделирования получена зависимость амплитуды и длительности импульса от времени накопления заряда - рисунок 12. Как видно из графика, с увеличением времени накачки растёт амплитуда видеоимпульса и его длительность. То есть подход позволяет регулировать оба параметра. Алгоритм позволяет управлять формой импульса за счёт увеличения накопленного заряда в ДНЗ. Из-за этого пропорционально растёт и энергия магнитного поля в индуктивности. Стоит отметить, что необходимо контролировать и время рассасывания заряда. Если длительности импульса рассасывания не хватит для того, чтобы обратный ток через диод удалил весь накопленный заряд, то диод не восстановит своё обратное сопротивление и резкий скачок тока через нагрузку не произойдет. Но предложенная схема имеет функциональность управления временем экстракции, что позволяет избежать этой проблемы. Из недостатков схемы нужно отметить, что она не позволяет менять амплитуду, оставляя фиксированной длительность СКИ и наоборот. Эти параметры остаются зависимыми друг от друга.

С учетом описанных в этой главе физических процессов ДНЗ, предложен генератор сверхкоротких импульсов с двумя каналами управления. Устройство позволяет независимо управлять длительностями инжекции и экстракции, а также задержками этих процессов друг относительно друга. Предложенный метод позволяет управлять объёмом накопленного заряда в активной области диода. В свою очередь, управление зарядом позволяет воздействовать на форму колокольного импульса.

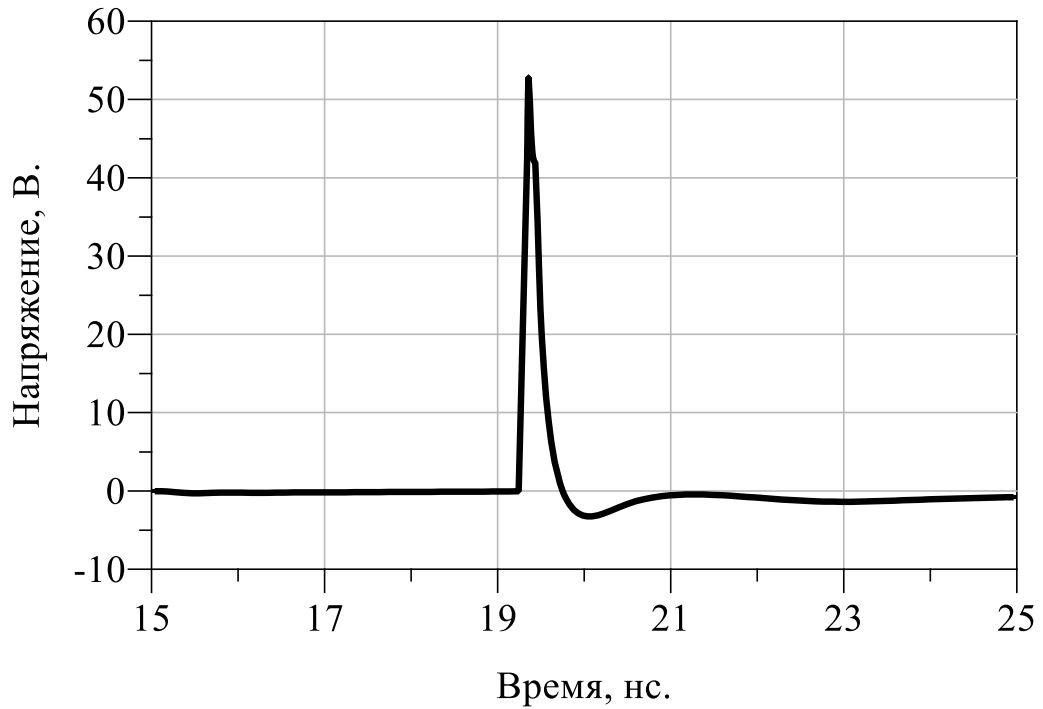


Рис. 11 – Осциллограмма импульса, полученная в ходе моделирования.

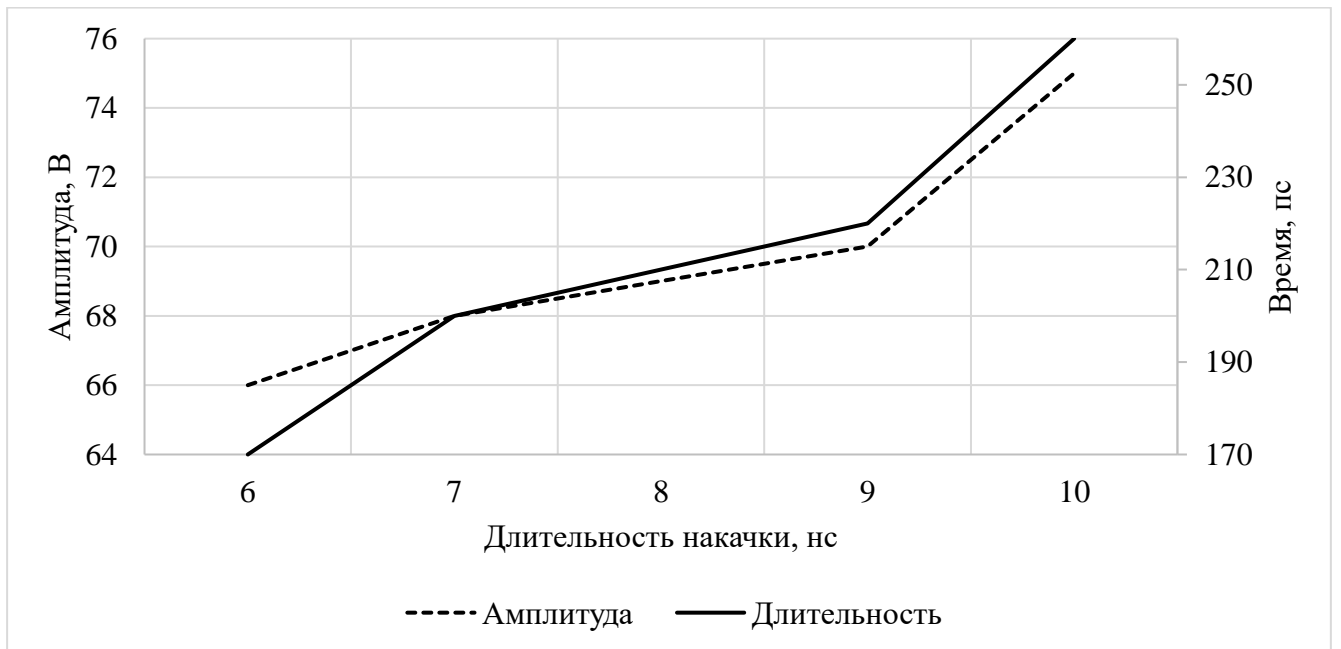


Рис. 12 – Зависимости амплитуды и длительности импульса от длительности импульса накачки.

2.2 Получение импульса при помощи экспериментального образца генератора

Для проведения натурального эксперимента был изготовлен макет генератора (рисунок 13). Регулирование процессов инжекции и экстракции осуществляется за счет последовательного открытия каналов управляющих транзисторов. Для этого использовались лабораторные генераторы, выход которых был подключен к затворам транзисторов. В качестве запускающих генераторов использовались Agilent 81104A, синхронизированные между собой. Длительность импульсов запуска составляла 9 нс, амплитуда 6 В.

Блоки питания постоянного тока Agilent обеспечивали подачу напряжения 5 В и минус 3 В. БП являлись источниками токов инжекции и экстракции. Выход установки был подключен через аттенюатор 46 дБ к входу осциллографа Agilent DCA-X 86100D с волновым сопротивлением 50 Ом.

В ходе эксперимента был реализован алгоритм работы, подробно описанный в ходе моделирования (см. раздел 1.3). В результате опыта при помощи осциллографа наблюдались гауссовский импульс колокольной формы, который изображен на рисунке 14. Полученный СКИ имеет амплитуду, равную 33 В, длительность, рассчитанную по полувысоте - 200 пс.

Результаты подтверждают работоспособность предложенного в первой главе метода. На выходе генератора наблюдается колокольный импульс с низким уровнем послеимпульсных искажений. Амплитуда СКИ может быть выше, так как зависит от объема инжектируемого заряда, что будет продемонстрировано далее в этой главе. Таким образом, предложенный генератор подходит для работы с сумматором СШП-сигналов: низкий уровень «звона» позволяет минимизировать влияние при сложении нескольких СКИ. На следующем этапе проверим возможность управления формой видеоимпульса за счет регулирования длительности инжекции.

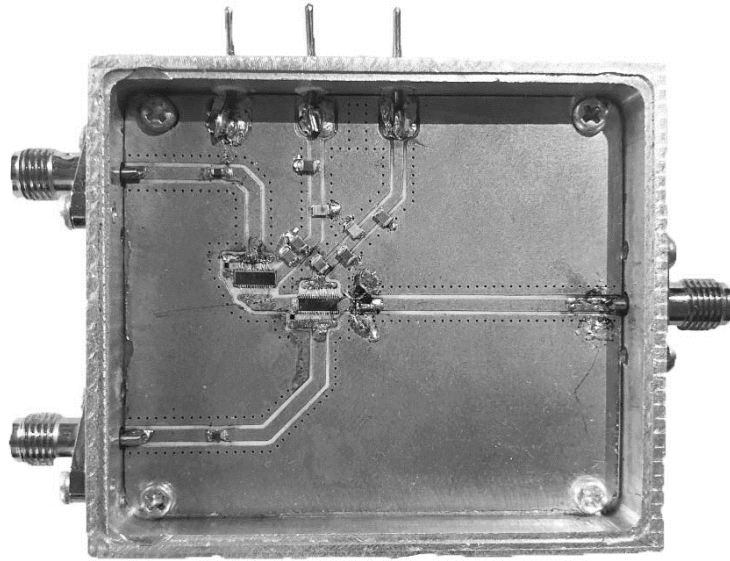


Рис. 13 – Фотография генератора с независимым управлением временем накачки и рассасывания.

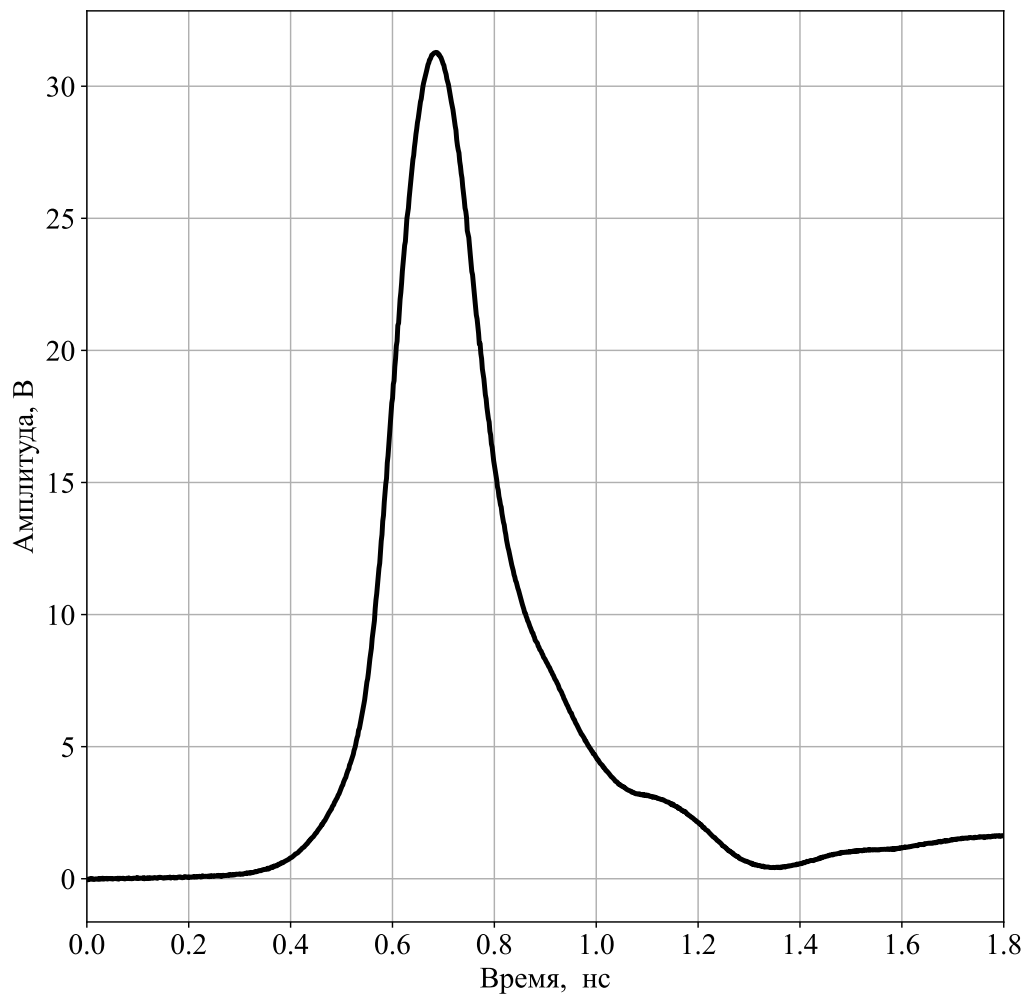


Рис. 14 – Осциллограммы запускающих импульсов и гауссовского колокольного импульса на выходе экспериментальной установки.

2.3 Форма СКИ при изменении длительностей и задержек запускающих импульсов

Был проведён ещё один эксперимент, в котором исследовалась зависимость формы СКИ от длительности процесса инжекции заряда в активную область ДНЗ. Регулирование производилось при помощи генератора запускающих импульсов G2 (рисунок 5). Увеличивалась длительность импульса, поступающего на затвор транзистора VT2, тем самым менялось время протекания прямого тока через диод. Начальная длительность импульса накачки составляла 6 нс (минимальное значение для выбранного генератора запускающих импульсов). В ходе эксперимента время увеличивалось до 16 нс с шагом 1 нс. Синхронно менялась задержка импульса с G1, так, чтобы рассасывание заряда в ДНЗ начиналось сразу после окончания накопления. Напряжение питания «V+» в эксперименте равнялось 5 В, а напряжение питания «V-» минус 3 В. Результирующий импульс поступал на вход осциллографа Agilent DCA-X 86100D. Выход генератора был соединен с прибором через аттенюаторы с общим ослаблением 46 дБ. Схема описанного эксперимента изображена на рисунке 15.

На рисунке 16 приведены результаты эксперимента. На графике видно, что вследствие изменения длительности импульса накачки меняется амплитуда и длительность результирующего гауссовского импульса. Диапазон перестройки амплитуды составил 19%, диапазон перестройки длительности - 31%. Неравномерность зависимости длительности, изображенной на рисунке 16б, объясняется погрешностью измерения этого параметра при помощи осциллографа. Дальнейшее увеличение длительности не давало значительных изменений, что объясняется ограничением максимального количества накопленного заряда в активной области ДНЗ. Диапазон может быть больше, что было показано при моделировании, однако из-за технических ограничений запускающих импульсов невозможно уменьшить длительность управляющего импульса ниже значения 6 нс.

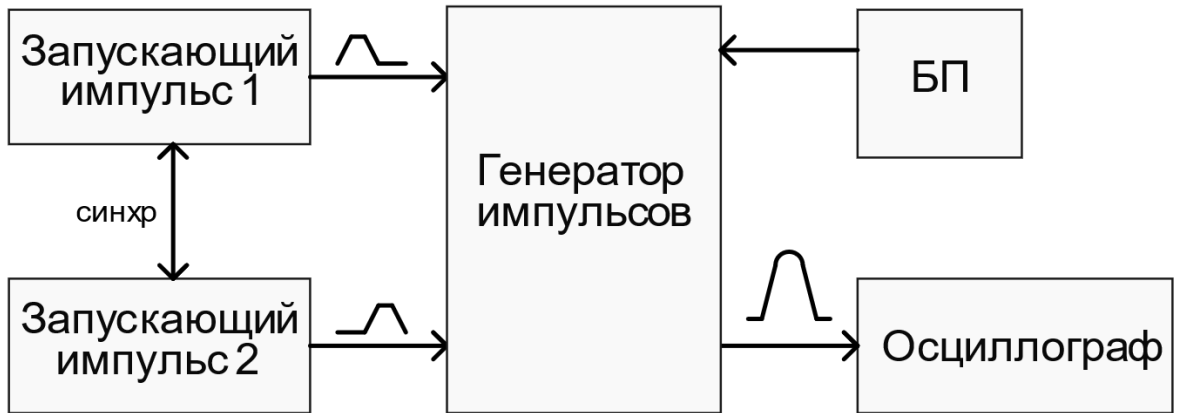
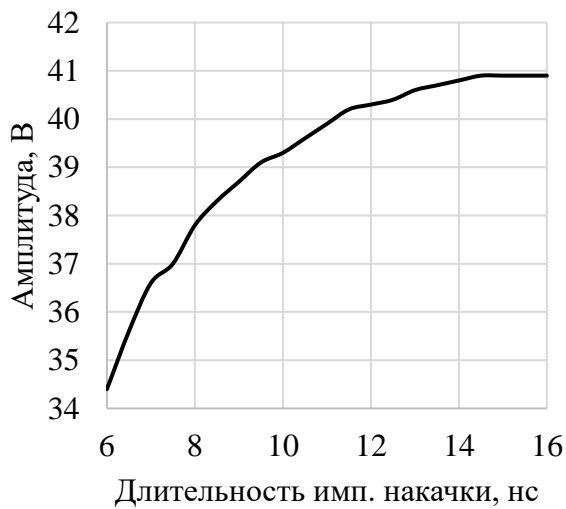


Рис. 15 – Блок-схема эксперимента для исследования влияния длительности импульса накачки на форму квазигауссовского сигнала на выходе генератора с ДНЗ.



а)



б)

Рис. 16 – Зависимость амплитуды (а) и длительность (б) колокольного импульса от длительность импульса накачки.

В эксперименте показана возможность управления формой видеоимпульса за счет изменения времени инжекции заряда. С увеличением времени увеличивается и объём накопленного заряда, соответственно, в индуктивности растёт объём магнитной энергии, в результате становится больше амплитуда импульса и его длительность.

В следующем эксперименте менялась задержка между окончанием импульса накачки и началом момента рассасывания. Было изучено влияние этого параметра на форму видеоимпульса на выходе генератора. Длительность импульса накачки по уровню составила 13 нс. Начальная задержка переднего фронта импульса рассасывания относительно переднего фронта импульса накачки составила 2 нс. Зависимости характеристик импульсов от задержки приведены на рисунке 17. Изменяя задержку с шагом 0.5 нс, удалось получить следующие возможности по перестройке СКИ на выходе генератора:

- Диапазон перестройки длительностей: от 160 до 315 нс.
- Диапазон перестройки амплитуд: от 36 до 52,7 В.

Продемонстрирована возможность менять форму СКИ при помощи изменения задержки между процессами инжекции и экстракции. Возможный диапазон перестройки по длительности составляет 97%, а по амплитуде 44%. Описанный результат можно объяснить паразитной утечкой заряда из активной области диода. Утечка происходит в момент, когда накопление заряда уже произошло, а рассасывание ещё не началось. Таким образом, удаляется часть накопленного заряда, вследствие чего уменьшается количество суммарной магнитной энергии в индуктивности.

К недостаткам описанных подходов к изменению формы нужно отнести время, затрачиваемое на процесс инжекции и экстракции. Из-за добавленной задержки общее время формирования СКИ увеличивается, благодаря чему растёт и скважность в последовательности видеоимпульсов. Подобное свойство, однако, может быть применено при лямбда-дальта модуляции, при которой необходимо одновременно менять как амплитуду, так и скважность между импульсами.

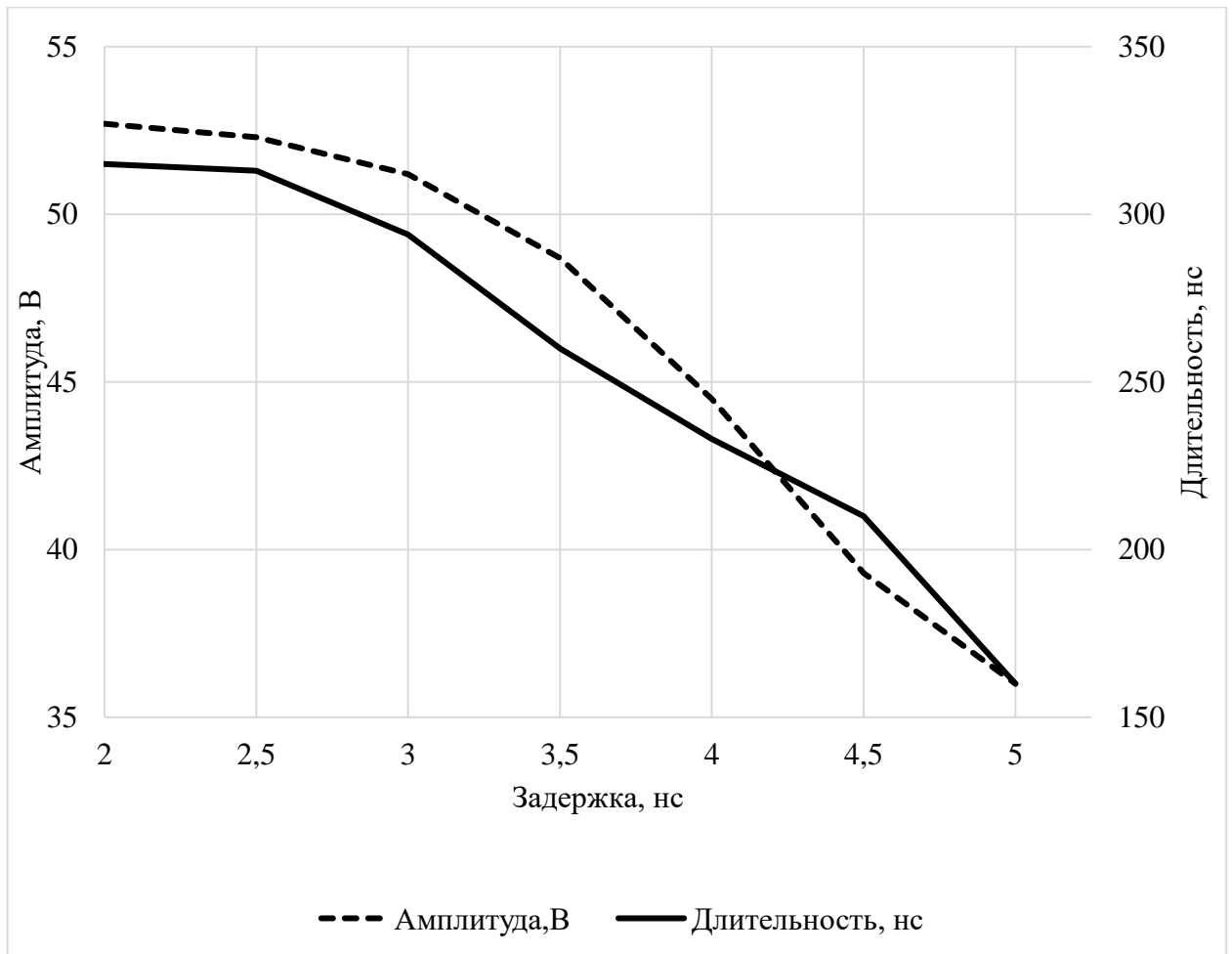


Рис. 17 – Зависимость амплитуд (а) и длительностей (б) результирующего импульса в зависимости от времени задержки между запускающими импульсами.

Регулирование формы СКИ также является преимуществом в случае использования такого генератора вместе с сумматором. При сложении сигналов с нескольких генераторов появляется возможность влиять на отдельные части сигнала на выходе системы. Эта особенность позволяет формировать произвольные формы видеоимпульсов. Это также можно использовать при модуляции в системах связи. Увеличивается количество уникальных форм сигнала, которое возможно получить на выходе такого генератора.

Выводы

В ходе проведенных экспериментов были подтверждены предложенные ранее методы управления формой сигнала за счет регулирования объема накопленного заряда. Можно отметить следующие достоинства описанного решения.

Установлена физическая интерпретация зависимости длительности и амплитуды формируемого СКИ от процесса инъекции и начала момента экстракции заряда. Показано, что увеличение объема инжестируемого заряда однозначно связан с увеличением амплитуды и длительности генерируемого видеоимпульса. Двухканальная схема позволяет управлять формой СКИ при помощи длительности импульса инъекции и задержек запускающих сигналов. Такой подход позволяет управлять формой сигнала алгоритмическими методами, используя программируемые элементы (контроллеры, микропроцессоры, ПЛИС). Таким образом, можно осуществлять модуляцию сигнала и организовать передачу информации в системе связи.

Предложенный генератор позволяет получать импульс колокольной формы, используя низкие напряжения питания. В эксперименте были получены импульсы при положительном питании, равным 5 В, и отрицательном, равным минус 3 В.

У импульса на выходе генератора наблюдается низкий уровень послеимпульсных искажений. В эксперименте зафиксирован их относительный

уровень, равный 4,2%. Добиться такого результата удалось за счет исключения протекания прямого тока через диод сразу после окончания процесса инъекции (как это было в одноканальной схеме). Это достоинство позволяет использовать устройство в схемах с сумматором, так как послеимпульсные искажения не будут мешать полезной составляющей сигналов с других источников.

Изменение длительности импульса напрямую связано с изменением ширины спектра сигнала, от которой, в свою очередь, зависит разрешающая способность систем радиолокации [29, 30]. Соответственно, формирователь позволяет за счет изменения длительности регулировать ширину спектра сигнала.

ГЛАВА 3. Формирование СШП-импульсов при помощи сумматора конструкции Уилкинсона

Существуют более сложные формы СКИ, чем гауссовская кривая. Часто в системах радиолокации и связи используют видеоимпульсы формы производных от гауссовской кривой [62, 63]. Первую производную называют моноциклом, вторую - дуплетом. Математическое представление импульсов и их спектры описывают формулами. Для моноцикла Гаусса:

$$y(t) = -2a^2 A t e^{-a^2 t^2}$$

$$Y(w) = \frac{i w A}{a \sqrt{2}} e^{-\frac{w^2}{4a^2}} \quad (16)$$

для дуплета Гаусса:

$$y(t) = -2a^2 A e^{-a^2 t^2} (1 - 2a^2 t^2)$$

$$Y(w) = -\frac{A w^2}{a \sqrt{2}} e^{-\frac{w^2}{4a^2}} \quad (17)$$

Временные зависимости колокольного импульса, моноцикла и дуплета изображены на рисунке 18. Спектры этих СКИ представлены на рисунке 19. Чем старше производная от гауссовской кривой, тем выше по частоте расположен спектр такого сигнала. Также у моноцикла, дуплета и более старших производных отсутствует спектральная составляющая на нулевой частоте. Эти свойства важны при излучении СШП-сигналов. Проектирование антенн для излучения СШП-сигналов формы моноцикла и дуплета проще, чем для колокола, так как в таких сигналах нет составляющих на нулевой частоте.

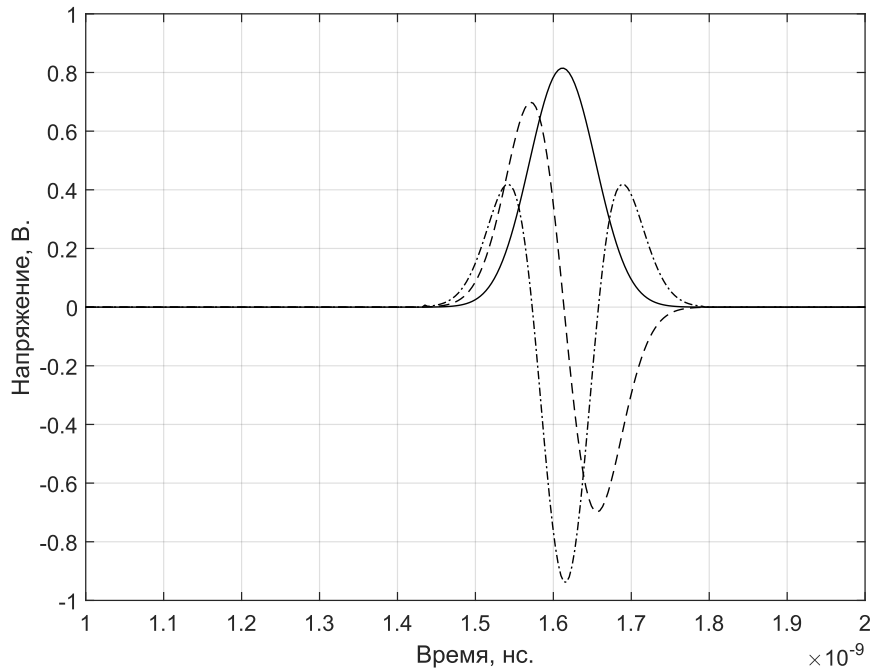


Рис. 18 – Импульсы во временной области: сплошной линией обозначен колокольный импульс Гаусса, пунктирной – моноцикл, пунктир с точкой – дуплет.

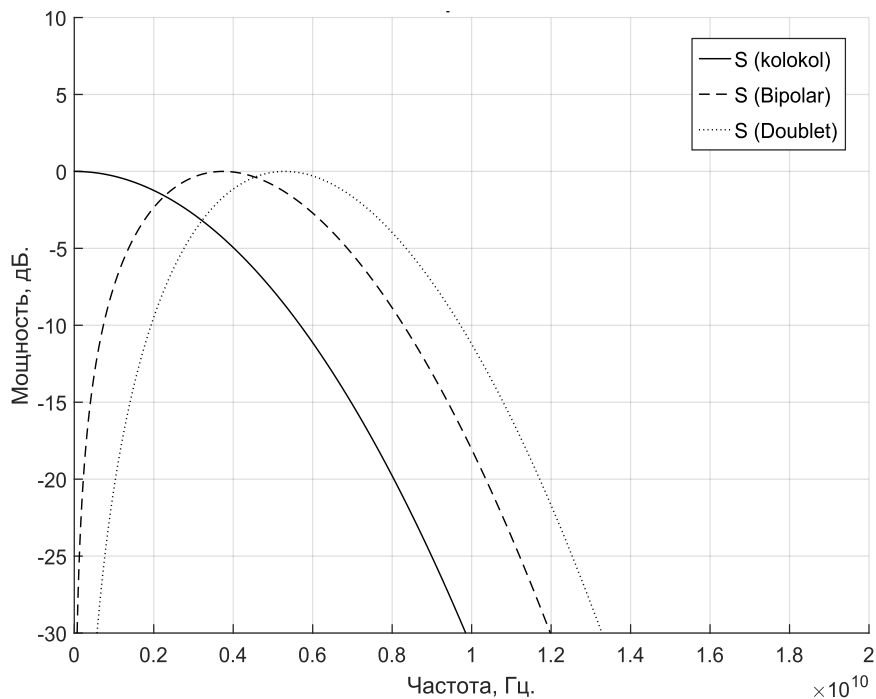


Рис. 19 - Спектры импульсов гауссовской формы: сплошной линией обозначен спектре для колокольного импульса Гаусса, пунктирной – для моноцикла, точка – для дуплета.

Существует различные способы получения СКИ формы моноцикла и дуплета. Рассмотрим подходы, которые встречаются в литературе [21-27]. Проведем моделирование описанных схем, чтобы изучить их возможности и ограничения.

Добавление линии задержки

Одним из самых часто встречающихся в литературе методов получения моноцикла (биполярного импульса) является добавление линии задержки. Её подключают между выходом генератора и общим контактом [4, 5]. Импульс с выхода генератора разделяется на два. Часть сигнала, проходящая через линию задержки, инвертируется и задерживается относительно части, проходящей напрямую в нагрузку. Протяженность линии должна быть такой, чтобы время распространения и отражения сигнала равнялось длительности СКИ. В этом случае отраженная часть сложится с исходной так, чтобы на выходе образовался квазимоноцикл.

Пример схемы с линией задержки представлен на рисунке 20. Резистор R17 и диод Шотки D1 используют для уменьшения уровня послеимпульсных искажений СКИ. Сигнал с выхода генератора разделяется между линиями TL1 и TL2. К линии TL1 подключена нагрузка R16 с сопротивлением 50 Ом, на которой наблюдается результирующий видеоимпульс напряжения. Длина линии TL2 должна быть выбрана в соответствии с длительностью импульса на выходе формирователя. Конденсатор C2 необходим, чтобы предотвратить протекание постоянного тока через нагрузку.

Было проведено моделирование описанной схемы. Осциллограмма СКИ, наблюдаемого на нагрузке, изображена на рисунке 21. Получить симметричный импульс в такой схеме невозможно. Инвертированная с помощью линии задержки часть будет всегда меньше амплитуды из-за больших потерь при прохождении. При таком подходе к формированию моноцикла невозможно регулировать его параметры. Это устройство может быть применено только вместе с генератором импульсов определенной длительности.

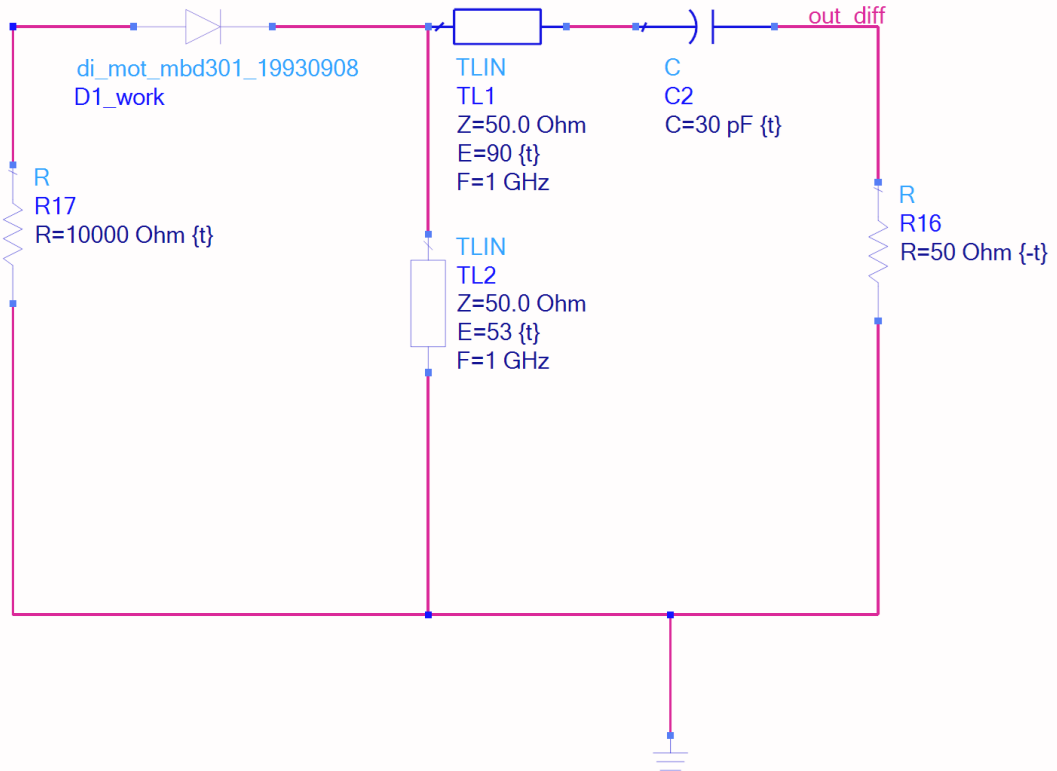


Рис. 20 - Схема для формирования квазимоноцикла при помощи линии задержки.

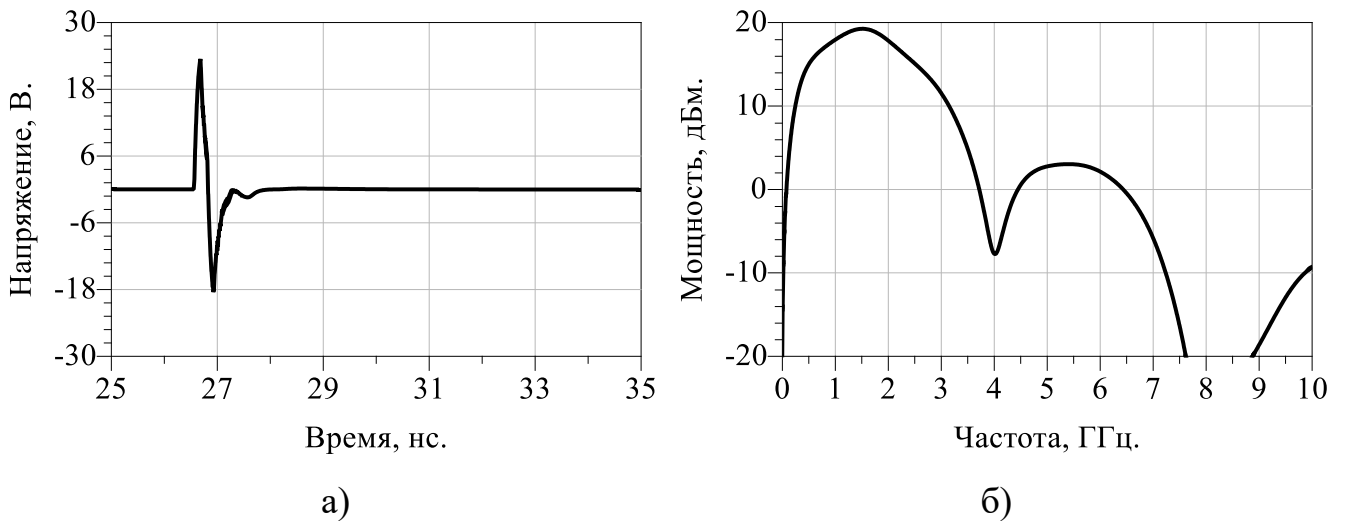


Рис. 21 - Биполярный импульс (а), сформированный при помощи схемы с линией задержки и его спектр (б).

При использовании другого сигнала получить квазимоноцикл не удастся, так как TL2 имеет фиксированную длину, которая определяет задержку инвертированной части импульса.

Использование LC цепочки на выходе генератора

Ещё один способ получения биполярного импульса — подключить к выходу формирователя колокольного СКИ LC-контура. Такой подход позволяет провести операцию, аналогичную математическому дифференцированию, над видеоимпульсом. В результате прохождения сигнала через цепь на нагрузке будем наблюдать моноцикл Гаусса. Было проведено моделирование такой схемы. Подобраны следующие параметры дифференцирующей цепи для положительного импульса колокольной формы: выходная ёмкость 3 пФ, индуктивность 6 нГн.

Полученные в результате работы модели импульс и его спектр изображены на рисунке 22. Этот подход также имеет свои недостатки. Подобранные параметры будут работать только с импульсом определенной длительности. Для формирователя сигнала другой протяженности цепочка не подойдет. Ещё одним минусом являются небольшие значения ёмкости и индуктивности, выбранные для работы с СКИ с длительностями в несколько сотен пикосекунд. Схема очень чувствительна даже к небольшим изменениям параметров дифференцирующей цепи. Из-за этого на работу схемы начинают оказывать сильное влияние паразитные ёмкости и индуктивности печатной платы. Становится необходимым учитывать топологию устройства на этапе моделирования, которое будет учитывать ёмкость между контактами и индуктивность микрополосковых линий. Также элементы L и C дифференцирующей цепи должны иметь параметры с минимальными погрешностями. В противном случае не выйдет добиться повторяемости формы импульса на выходе разных экземпляров генераторов.

Схемы с линией задержки и дифференцирующей цепочкой не дают возможности управлять формой СКИ. С их помощью не получится организовать модуляцию сигнала в СШП-системах связи или радиолокации. Предложим более гибкий способ, позволяющий формировать импульс формы моноцикла и менять его форму.

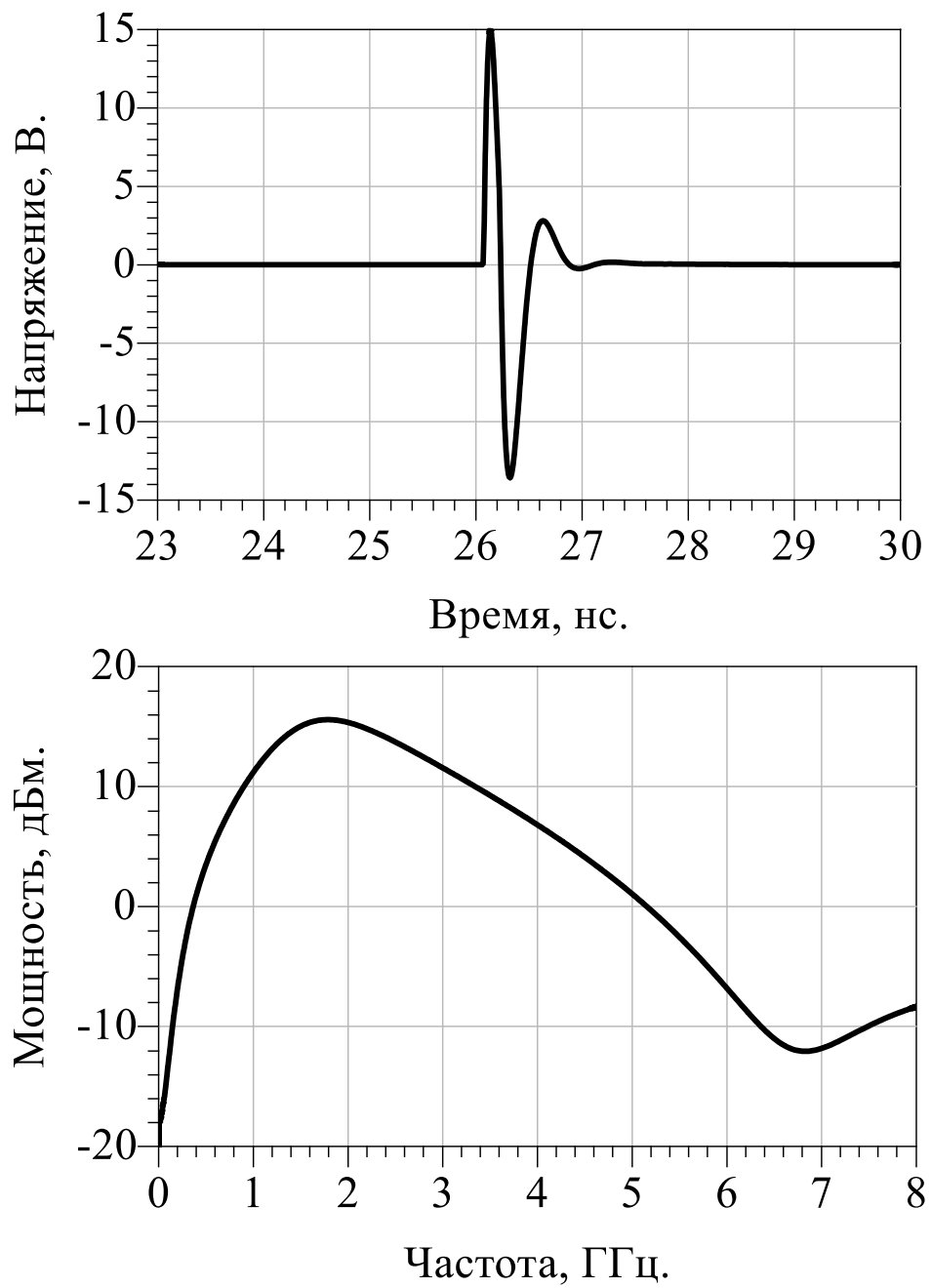


Рис. 22 - Биполярный импульс и его спектр на выходе генератора СКИ с LC-цепочкой.

3.1 Моделирование параметров сумматора для работы с СШП-сигналами

Рассмотрим ещё один способ получения гауссовских моноциклов при помощи сложения импульсов колокольной формы разной полярности. Для сложения требуется сумматор, работающий с СШП-видеоимпульсами. Конструкция этого устройства позволяет создавать развязку между генераторами. Если отказаться от использования сумматора, то при подключении выходов нескольких генераторов в одну точку они будут влиять друг на друга и искажать итоговый сигнал [19]. Продемонстрируем, что схема с сумматором позволяет менять форму результирующего СКИ. Для этого будем использовать разные задержки запускающих импульсов. Метод позволит менять длительность СКИ и проводить модуляцию сигнала. В качестве сумматора можно использовать конструкцию Уилкинсона (в литературе её чаще называют делителем, а не сумматором) [3, 20, 64]. Топология сумматора представлена на рисунке 23. В таком виде сумматоры изготавливают на печатных платах с использованием микрополосковых линий. Порты 2, 3 используются как входы сумматора, а порт 1, как выход. Балластный резистор R необходим для согласования схемы.

Ширина спектра сверхкоротких импульсов с длительностью в несколько сотен пикосекунд достигает нескольких гигагерц. Соответствующей должна быть и полоса рабочих частот сумматора. Однозвенная конструкция Уилкинсона позволяет работать только с узкополосными сигналами, ширина полосы которых составляет порядка десятка мегагерц. В работе предлагается применить многозвенную конструкцию. Её используют для сложения широкополосных периодических сигналов. В диссертации предлагается дополнить подход с многозвенной структурой и применить его для сверхширокополосных видеосигналов.

Вначале опишем принцип работы сумматора, начав с однозвенной конструкции. Затем предложим алгоритм расчета многозвенной структуры и проведем электромагнитное моделирование топологии.

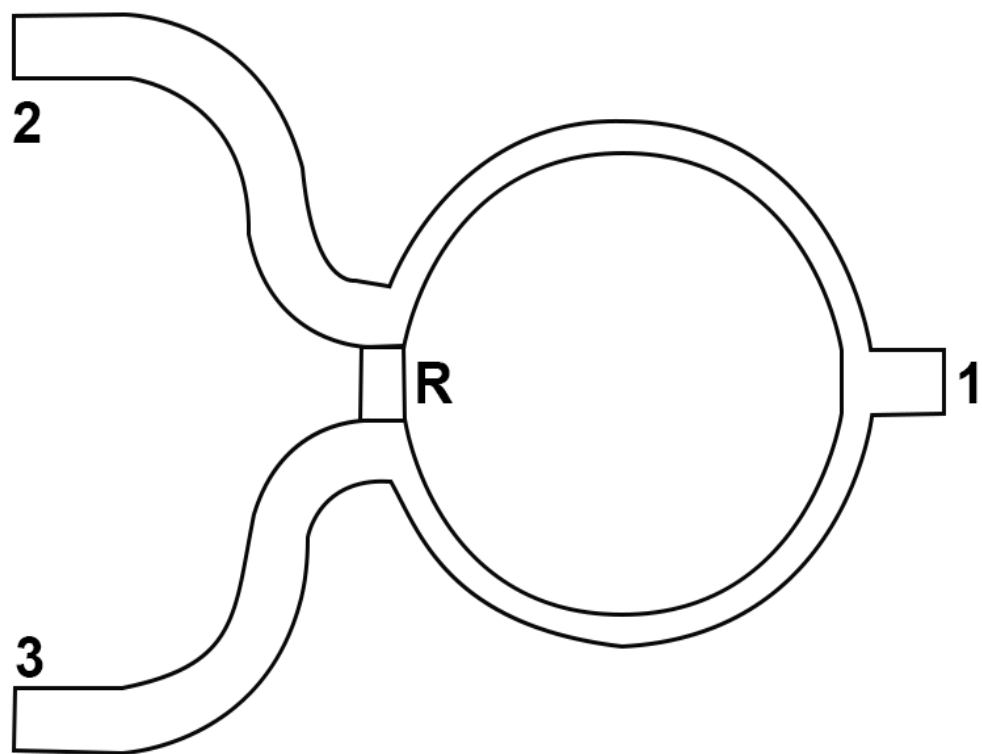


Рис. 23 – Однозвенный кольцевой сумматор конструкции Уилкинсона.

Параметры однозвенного сумматора конструкции Уилкинсона могут быть описаны через нормированную матрицу четырехполюсника.

$$\begin{aligned}
 [A]^{++} &= \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & j \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) / \sqrt{2} Y_1 \\ j \sqrt{2} Y_1 \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) / \sqrt{2} \end{bmatrix}, \\
 [A]^{+-} &= \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{Y_3}} \cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & \frac{j \sqrt{Y_3}}{Y_1} \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) \\ \frac{Y_2}{\sqrt{Y_3}} \cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) + j \frac{Y_1}{\sqrt{Y_3}} \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) & \sqrt{Y_3} \cos\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) + \frac{j Y_2 \sqrt{Y_3}}{Y_1} \sin\left(\frac{2\pi l}{\Lambda}\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{18}$$

где:

— $Y_1 = z_0 / z_l$ – волновая проводимость отрезка однородной линии с длиной l .

— $Y_2 = 2z_0 / R_0$ – проводимость активной нагрузки, умноженная на два.

— Y_3 – нормированная проводимость короткого замыкания.

Предполагается, что этот параметр равен бесконечности.

— Λ – длина волны.

При помощи математических преобразований из матрицы могут быть получены параметры рассеивания (или S-параметры) такого устройства.

$$\begin{aligned}
 S_{33} &= \frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2}, \\
 S_{11} = S_{22} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} + \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right), \\
 S_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} - \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right).
 \end{aligned} \tag{19}$$

Идеальное согласование на выбранной частоте и достижение соотношений $S_{11}=S_{22}=S_{33}=0$ и $S_{23}=0$, происходит при выполнении условий (20).

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}}, & Y_2 &= 1, \\
 z_1 &= z_0\sqrt{2}, & R &= 2z_0.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

В таком случае матрица рассеивания для идеального делителя примет вид (21). Данная матрица является не унитарной, так как подобное устройство работает с потерями. В идеальном делителе Уилкинсона они составят 3 дБ.

$$[S] = -j \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}
 \tag{21}$$

$$S_{21} = S_{31} = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3 \text{ дБ}.$$

Однозвенная конструкция имеет идеальное согласование на выбранной частоте. Работа устройства также возможна в полосе вокруг этой точки. Ширина полосы будет зависеть от пороговых значений S-параметров, удовлетворяющих поставленной задаче. При выборе рабочей частоты равной 1 ГГц, и установке порога для S_{23} на уровне -15 дБ ширина диапазона будет равна нескольким десяткам мегагерц. Добьемся расширения полосы, используя многозвенную конструкцию Уилкинсона. Каждое из звеньев в таком устройстве обеспечивает работу в определенной полосе частот, что позволяет увеличить общий рабочий диапазон. Для расчета параметров такой структуры существует итерационный подход, опирающийся на аналитические выражения [55].

Рассмотрим для примера двухзвенную конструкцию. На рисунке 24 изображен параметр S_{11} для такого сумматора. Многозвенная структура обеспечивает согласование на нескольких частотах. На графике они обозначены как f_1 и f_2 . Минимально возможные потери отмечены пунктирной линией и обозначены как $|S_{11m}|$.

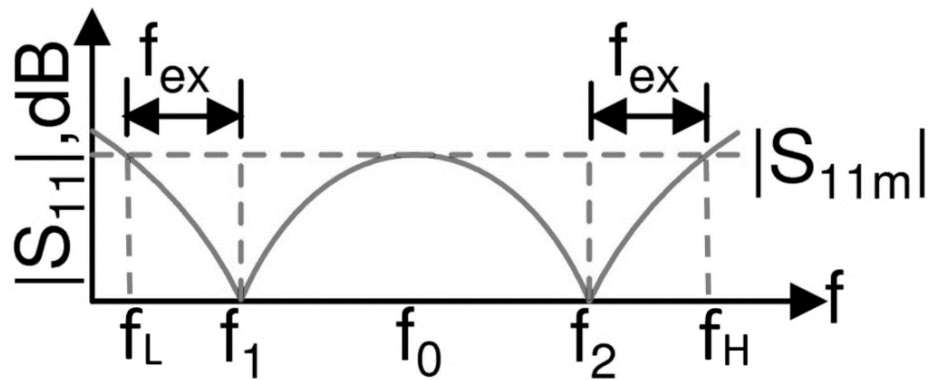


Рис. 24 – Графическое изображение параметра S_{11} для сумматора конструкции Уилкинсона с двумя звеньями.

Подразумевается, что этот уровень задает полосу рабочих частот устройства. Введем обозначения для частот f_H , f_L , f_{ex} . Следовательно, рабочая полоса такой конструкции будет равна:

$$BW = f_H - f_L = (f_2 - f_1) + 2f_{ex} \quad (22)$$

Член $2f_{ex}$ используется для учета разброса параметров элементов и погрешности при вычислениях. Такой подход часто используют в разработке, где минимальные требования к полосе задаются как разница $(f_2 - f_1)$. Но также закладывают запас $2f_{ex}$ для обеспечения гибкости и удовлетворения требований проектных целей.

Известно, что двухсекционная структура обеспечивает прирост в рабочей полосе. Такой подход используют для работы с широкополосными периодическими сигналами, ширина полосы которых составляет всего несколько сотен мегагерц [73-76]. Диапазон занимаемых частот СШП-видеоимпульсов на порядок выше. Для дополнительного расширения диапазона можно добавить в структуру сумматора ещё одно звено. Для такого случая известен алгоритм вычислений [55]. Он опирается на аналитические выражения для двухзвенной конструкции [77]. Для случая с тремя секциями нужно применить итерационный подход. В алгоритме предлагается выбрать рабочие диапазоны двух секций по границам заданного диапазона, тогда как третье звено обеспечит согласование между ними. Для расчетов задается минимальный порог параметра отражения (S_{22} , S_{33}) и используются дополнительные полосы f_{ex} . Они позволяют учесть ошибки, возникающие при расчетах, технологических допусках изготовления топологии и из-за погрешности номиналов элементов. Автором диссертации предлагается применить этот алгоритм для расчета параметров топологии, а затем провести дополнительное моделирование в пакете электромагнитного моделирования. Это позволит учесть особенности формы топологии и уточнить её параметры при помощи алгоритмов оптимизации.

Введем обозначения и термины, которые затем будем использовать для описания конструкции сумматора и аналитических выражений:

- Z_n – волновое сопротивление линии;
- θ – электрическая длина линии;
- R_n – изолирующие сопротивления (балластные);
- Y_n – проводимость линии.

Принципиальная схема трёхзвенной конструкции представлена на рисунке 25. Так как сумматор является симметричным относительно горизонтальной оси устройством, то для его анализа можно использовать метод чётных и нечётных мод. Эквивалентные схемы для анализа при помощи этих подходов представлены на рисунке 26.

Схема для метода чётных мод представляет из себя несекционную линию с элементами разной электрической длины и волнового сопротивления. Аналитическое выражение для волновых сопротивлений в таком случае известно [59] и описывается формулой (23).

$$Z_2 = \frac{2Z_0 R_1 a Z_3 + X_1 (1 + a^2) Z_3^2 - \frac{R_1 a}{2Z_0} Z_3^3}{p_1 Z_3^2 - 2Z_0 R_1 a} \quad (23)$$

где p_1 и a :

$$p_1 = a + \frac{1}{a} \left(1 - \frac{R_1}{2Z_0} \right) \quad (24)$$

$$a = \operatorname{tg}(\theta)$$

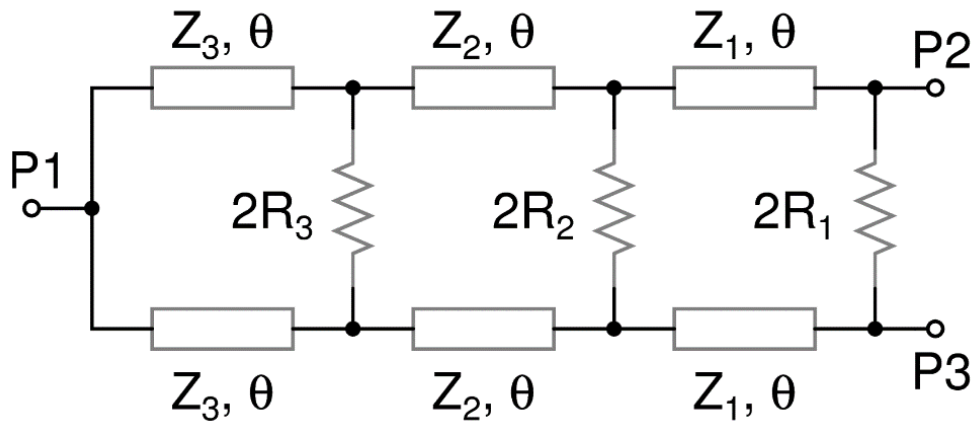


Рис. 25 – принципиальная схема трёхзвенного сумматора конструкции Уилкинсона.

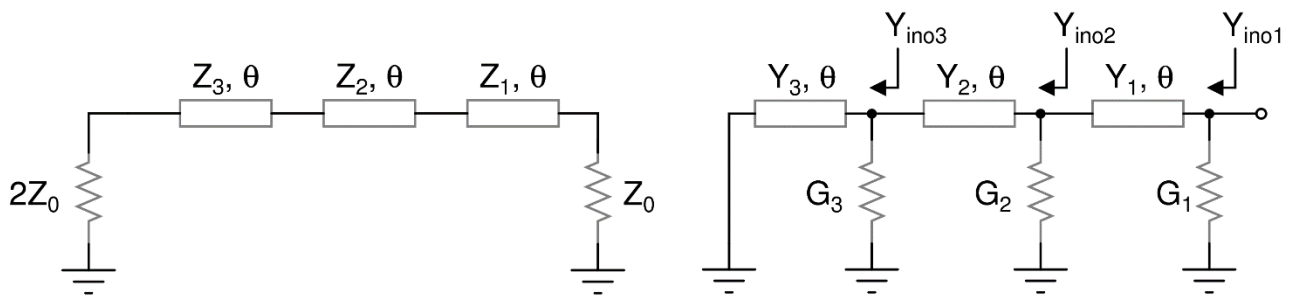


Рис. 26 – Эквивалентные схемы для анализа четных (слева) и нечетных (справа) мод.

Выражение для Z_3 может быть получено из уравнения четвертого порядка, имеющего следующий вид:

$$AZ_3^4 + BZ_3^3 + CZ_3^2 + DZ_3 + E = 0, \quad (25)$$

где коэффициенты, входящие в уравнение:

$$A = \frac{R_1^2 a^4}{2Z_0} - p_1(R_1 - 2Z_0) \frac{R_1 a}{2Z_0} - R_1 p_1^2 a^2$$

$$B = p_1 X_1 (R_1 - 2Z_0)(1 + a^2) + 2p_1^2 Z_0 X_1 a - p_1 X_1 R_1 a^2 - 2X_1 R_1 a^3 (1 + a^2)$$

$$C = 2Z_0 X_1^2 a^2 (1 + a^2)^2 - 4Z_0 X R_1^2 a^4 + 4p_1 Z_0 R_1^2 a^3 + R_1^2 (R_1 - 2Z_0) a^2 + 2p_1 Z_0 X_1^2 a (1 + a^2) + 2p_1 R_1 Z_0 (R_1 - 2Z_0) a \quad (26)$$

$$D = 8Z_0^2 R_1 X_1 a^3 (1 + a^2) + 2Z_0 R_1^2 X_1 a^3 - 2Z_0 R_1 X_1 (R_1 - 2Z_0) a (1 + a^2) - 4p_1 Z_0^2 R_1 X_1 a^2$$

$$E = 8Z_0^3 R_1^2 a^4 - 4Z_0^2 R_1 X_1^2 a^2 (1 + a^2) - 4Z_0^2 R_1^2 (R_1 - 2Z_0) a^2 - 4Z_0^2 R_1^3 a^4$$

Найти корни уравнения рациональнее всего, используя пакеты математического моделирования. Далее будем рассматривать только положительные и действительные корни. Они будут использованы для нахождения Z_2 из выражения выше.

Для итерационного поиска Z_2 волновое сопротивление Z_1 предлагается выбрать произвольно в диапазоне от 20 до 120 Ом. Такой диапазон предложен из конструктивных соображений, так как волновое сопротивление напрямую связано с шириной дорожки проводника. Если выбрать сопротивление выше 120 Ом, то

дорожка получится слишком узкой, что вызовет сложности при изготовлении печатной платы. Если выбрать сопротивление ниже 20 Ом, то дорожка, наоборот, окажется слишком широкой, из-за чего будет сложнее изготовить кольцевую структуру сумматора. Предложенный диапазон можно менять, учитывая параметры диэлектрика и технологических возможностей производства печатных плат.

Для расчета электрической длины θ можно использовать известную в литературе формулу [59]:

$$\theta = \frac{\pi}{(1 + f_2/f_1)} \quad (27)$$

Предложенных данных достаточно для расчета волновых сопротивлений в заданной полосе пропускания сумматора. На этом завершим анализ методом четных мод.

Перейдем к анализу при помощи метода нечетных мод. Эквивалентная схема для такого подхода представлена на рисунке 26. С её помощью найдем значения сопротивления балластных резисторов. В режиме возбуждения нечетными модами на входе схемы подключены два источника напряжения, работающих в противофазе (P2 и P3). Следовательно, на резисторах, подключенных в схеме параллельно, будет нулевой потенциал. В таком случае плоскую симметрию схемы можно свести к условно закороченной цепи. Для упрощения дальнейших расчетов будут использованы проводимости вместо сопротивлений, то есть будут произведены замены: $Y = 1/Z$, $G = 1/R$.

Волновую проводимость для звеньев конструкции можно записать с помощью комплексных чисел [60]. Выражения в таком случае будут выглядеть следующим образом:

$$Y_{ino3} = G_3 + jB_3 \quad (28)$$

$$B_3 = -Y_3/a$$

для второго звена,

$$\begin{aligned} Y_{ino2} &= G_2 + Y_2 \frac{Y_{ino3} + jY_2 a}{Y_2 + jY_{ino3} a} \\ &= \frac{(G_2 Y_2 - G_2 B_3 a + Y_2 G_3) + j(G_2 G_3 a + Y_2 B_3 + Y_2^2 a)}{(Y_2 - B_3 a) + jG_3 a} \end{aligned} \quad (29)$$

и для первого,

$$Y_{ino1} = G_1 + Y_1 \frac{Y_{ino2} + jY_1 a}{Y_1 + jY_{ino2} a} = \frac{(G_1 Y_1 - Y_{ino1} Y_1) + jY_1^2 a}{-Y_1 + ja(Y_{ino1} - G_1)} \quad (30)$$

Приравняем правые части уравнений (29) и (30) между собой. В полученном выражении вычислим пропорцию. Затем приравняем действительную и мнимую части нулю. В результате получим два выражения:

$$\begin{aligned} G_2(Y_1 Y_2 - Y_1 B_3 a) + G_3(Y_1 Y_2 - Y_1^2 a^2) + (Y_0 a^2 - G_1 a^2) G_2 G_3 \\ + G_1(Y_1 Y_2 - Y_1 B_3 a - Y_2 B_3 a - Y_2^2 a^2) - Y_0 Y_1 Y_2 + Y_0 Y_1 Y_2 \\ + Y_1 Y_0 B_3 a + Y_0 Y_2 B_3 a + Y_0 Y_2^2 a^2 = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} G_2(Y_0 B_3 a^2 - Y_0 Y_2 a + G_1 Y_2 a - G_1 B_3 a^2) \\ + G_3(G_1 Y_1 a - Y_0 Y_1 a - Y_0 Y_2 a + G_1 Y_2 a) + G_2 G_3 Y_1 a \\ + Y_1^2 Y_2 a - Y_1^2 B_3 a^2 + Y_1 Y_2 B_3 + Y_1 Y_2^2 a = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Напомним, что $a = \operatorname{tg}(\theta)$. Решив уравнения (31) и (32), получим выражения для проводимостей G_1 и G_2 .

$$G_2 = \frac{-N \pm \sqrt{N^2 - 4MO}}{2M} \quad (33)$$

$$G_3 = \frac{A_1S - PD_1}{(PB_1 - A_1Q) + (PC_1 - A_1R)G_2}, \quad (34)$$

где коэффициенты равны:

$$\begin{aligned} M &= P(PC_1 - A_1R) \\ N &= [P(PB_1 - A_1Q) + R(A_1S - PD_1) + S(PC_1 - A_1R)] \\ O &= Q(A_1S - PD_1) + (PB_1 - A_1Q)S \\ P &= Y_0B_3a^2 - Y_0Y_2a + G_1Y_2a - G_1B_3a^2 \\ Q &= G_1Y_1a - Y_0Y_1a - Y_0Y_2a + G_1Y_2a \\ R &= Y_1a \\ S &= Y_1^2Y_2a - Y_1^2B_3a^2 + Y_1Y_2B_3 + Y_1Y_2^2a \\ A_1 &= Y_1Y_2 - Y_1B_3a \\ B_1 &= Y_1Y_2 - Y_1B_3a \\ C_1 &= Y_0a^2 - G_1a^2 \\ D_1 &= G_1(Y_1Y_2 - Y_1B_3a - Y_2B_3a - Y_2^2a^2) - Y_0Y_1Y_2 + Y_1Y_0B_3a \\ &\quad + Y_0Y_2B_3aY_0Y_2^2a^2 \end{aligned} \quad (35)$$

Используя полученные аналитические выражения, расчеты для трёхзвенной конструкции сумматора Уилкинсона можно произвести по следующему алгоритму. Вычисляем электрическую длину θ по формуле (27). Волновые сопротивления Z_2 и Z_3 определяем, используя выражения (23)-(26). Вычисление производим итерационно, выбирая Z_1 из предложенного диапазона значений. При этом должно выполняться условие $|S_{11e}| < |S_{11em}|$. S_{11e} - значение, полученное из

расчетов согласно методу чётных мод. S_{11em} - желаемое значение S_{11} между резонансными частотами f_1 и f_2 , заданное для обеспечения требований к полосе пропускания сумматора. Переходим к выражениям для проводимостей, полученных методом нечётных мод. Зная Z_2 , вычислим по формуле $Y_2 = 1/Z_2$. Затем используем формулы (33)-(35) для вычисления G_2 и G_3 . При выполнении этих расчетов G_1 выбираем так, чтобы выполнялось неравенство $|S_{22}| < |S_{22m}|$ в точке f_0 . Можно отметить, что $S_{22} = S_{33} = (S_{22e} + S_{22o})/2$. S_{22e} - значение полученного при расчете с помощью метода нечётных мод, S_{22o} - методом четных мод. S_{22} - желаемое значение между резонансными частотами f_1 и f_2 . Выражение для параметра изоляции примет вид $S_{23} = (S_{22e} - S_{22o})/2$. Из предложенного алгоритма следует, что Z_2, Z_3, G_2 и G_3 гарантируют двухдиапазонный профиль сумматора, то есть задают границы итоговой рабочей полосы структуры. Z_1 и G_1 выбраны так, чтобы обеспечить центральный поддиапазон между граничными.

Описанный алгоритм позволяет выбрать начальные характеристики для модели сумматора. Используем вычисленные параметры топологии, чтобы реализовать модуль сумматора в пакете CST Studio. Проведем в нём электромагнитное моделирование. Вычисления позволяют учесть потери в диэлектрике и конкретную форму микрополосковых линий. Программное обеспечение также даёт возможность провести оптимизацию параметров конструкции. Таким образом, были уточнены характеристики конструкции, полученные при расчетах ранее. В модели использовались параметры диэлектрика, примененного для изготовления натурального образца: ФЛАН-3.8 с толщиной 2 мм и диэлектрической проницаемостью равной 3.8.

Оптимизатору были заданы следующие цели в диапазоне частот от 0.5 до 5 ГГц: $S_{22} = S_{33}$ – не более минус 15 дБ; S_{21} – не менее 5 дБ; S_{23} – не более минус 15 дБ. Для оптимизации был использован метод Finite integration technique (FIT). Также для оптимизации был применен Nelder Simplex Algorithm. Основная сложность подобных расчётов заключается в большой ширине рабочих частот, в данном случае верхняя частота превышает нижнюю в 10 раз. Из-за этого сильно

увеличивается вычислительная сложность и время работы ЭВМ над задачей. Полученные в результате моделирования параметры топологии и номиналы балластных нагрузок сумматора представлены в таблицах 1 и 2.

Было произведено сравнение параметров однозвенного и трёхзвенного сумматоров. Из результатов сравнительного моделирования, изображенных на рисунке 27, видно, что для работы с СШП-видеоимпульсами целесообразно использовать трёхзвенную конструкцию. Превосходство трёхзвенной конструкции над однозвенной по некоторым параметрам достигает 15 дБ. Топология сумматора изображена на рисунке 28.

Таблица 1. Параметры топологии трёхпортового сумматора.

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 балластных резисторов.

Резистор	Сопротивление, Ом
Res1	132
Res2	185
Res3	250

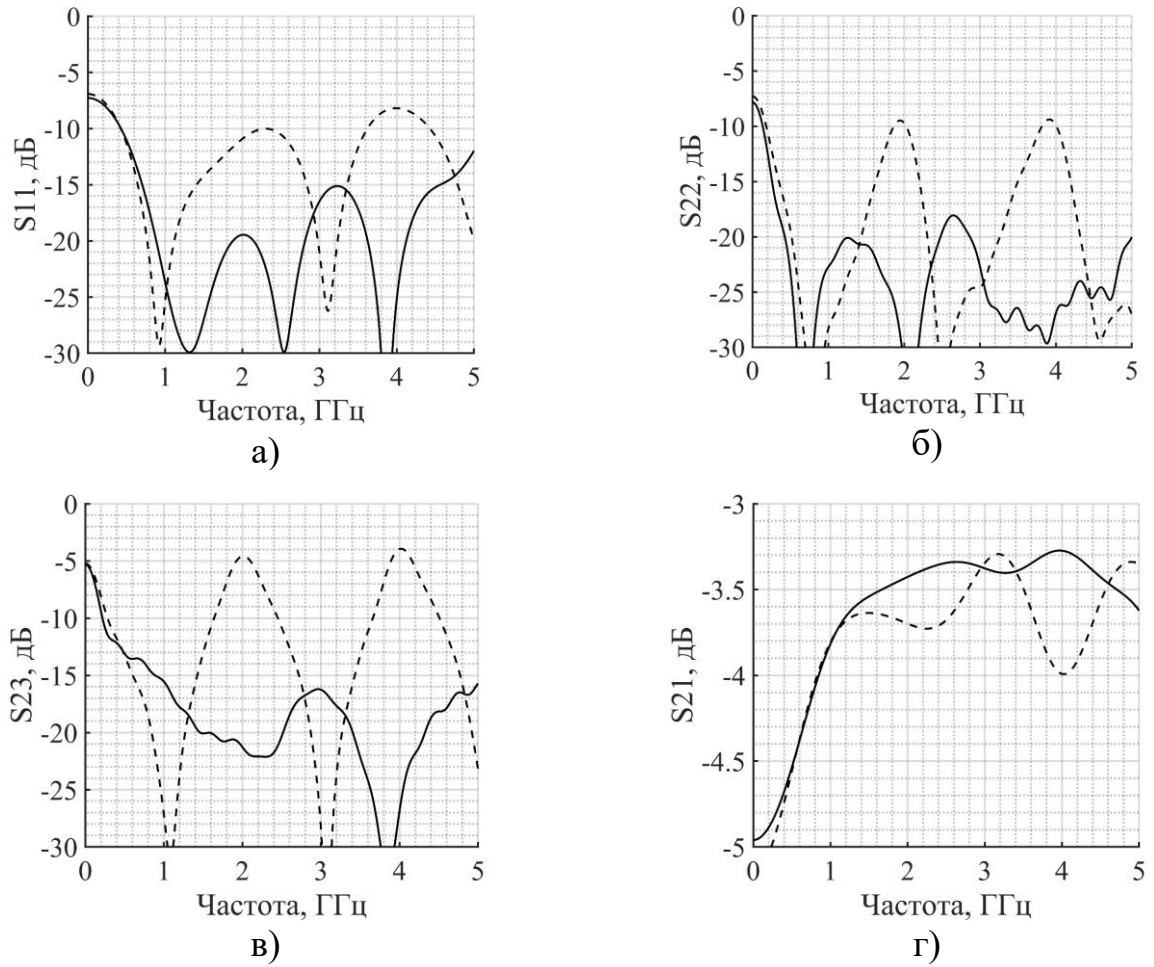


Рис. 27 - S -параметры сумматора (сплошная линия – трёхзвенный, пунктирная – однозвенный).

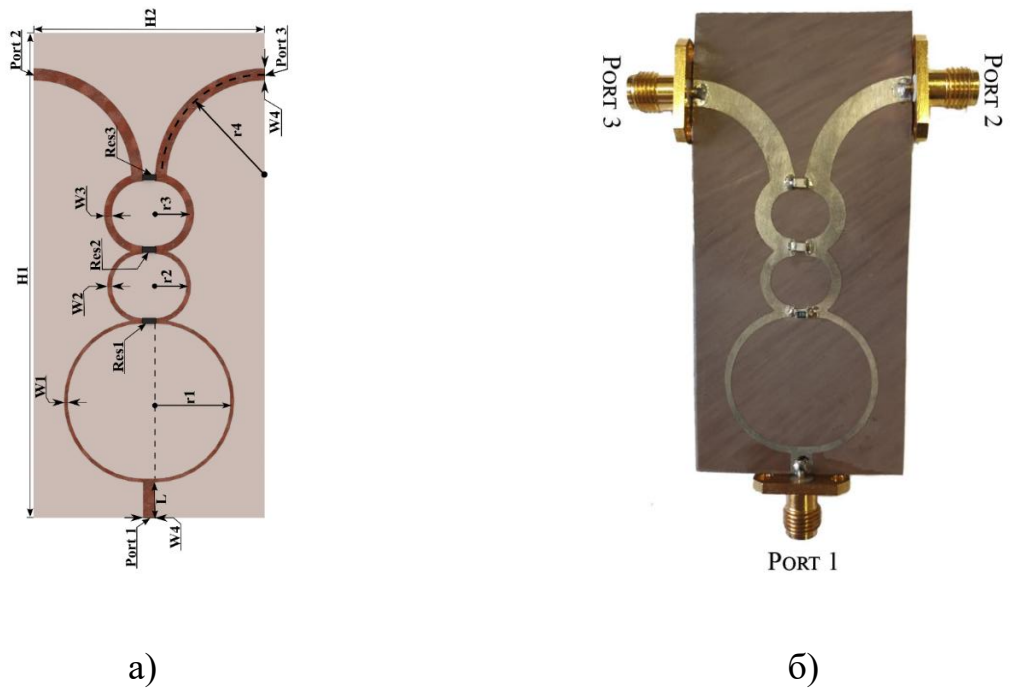
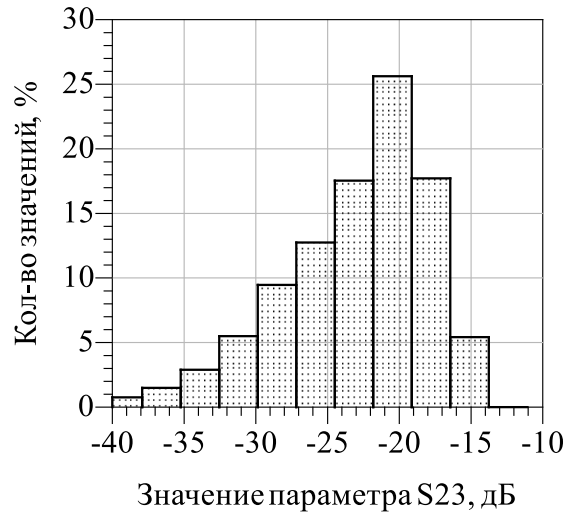
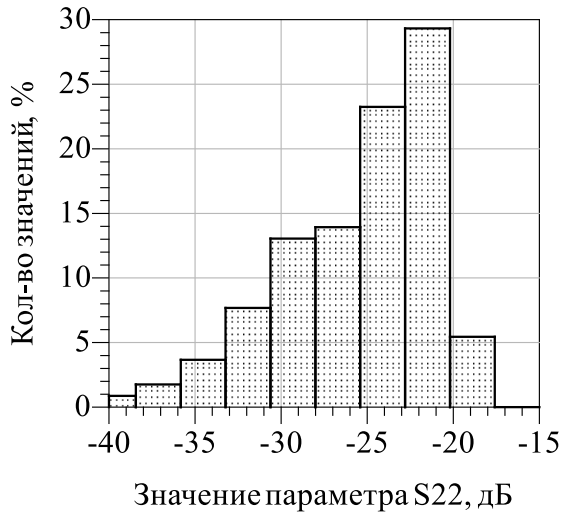


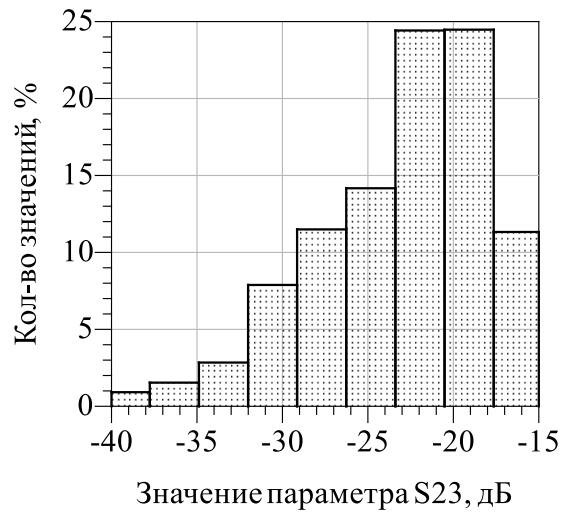
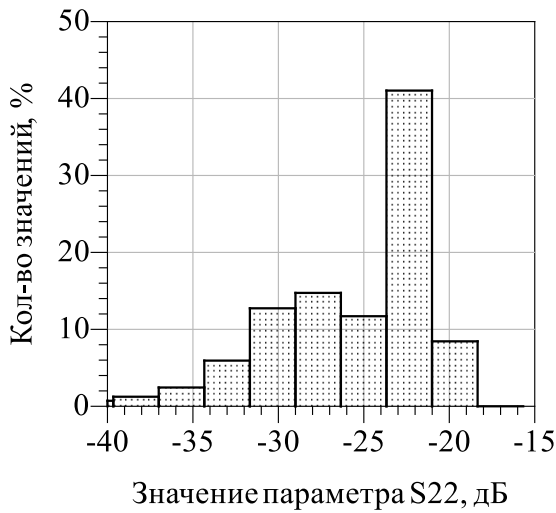
Рис. 28 - Кольцевой сумматор конструкции Уилкинсона с двумя ВЧ-входами. Топология (а) и фото устройства (б).

Перед изготовлением экспериментального образца было произведено дополнительное статистическое моделирование. В нём исследовалось влияние разброса номиналов резисторов ($Res1$, $Res2$, $Res3$ на рисунке 28) на характеристики сумматора. Использовался метод Монте-Карло. Моделирование было произведено для параметров S_{22} и S_{23} , так как они наиболее чувствительны к изменению значений нагрузок. Моделирование проводилось в три этапа. Для каждого использовались резисторы с разным процентным отклонением от номинала: 10, 5 и 1 процент соответственно. Пассивные элементы с такими разбросами номиналов наиболее распространены в производстве. Моделирование позволило определить, как минимизировать разброс параметров пассивных элементов на характеристики сумматора. Количество итераций при моделировании равнялось 1000. Гистограммы с результатами расчётов изображены на рисунке 29. Данные с количеством ошибок для каждой серии расчетов представлены в таблице 3. Цели, используемые при выявлении ошибок, были заданы аналогично тем, что использовались при оптимизации ранее. Параметр S_{22} – не менее 15 дБ, S_{23} – не менее 15 дБ. Из результатов моделирования видно, что для выполнения заданных целей необходимо применять резисторы с отклонением не более 1%. При использовании резисторов с отклонением 5% в 15% случаев из выборки характеристики сумматор не удовлетворяет заданным целям. В случае использования резисторов с 10% погрешностью ошибка превышает 50%, поэтому использовать такие элементы категорически не рекомендуется.

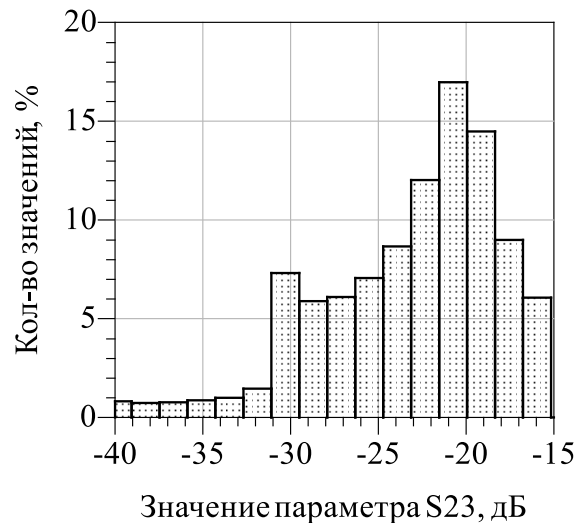
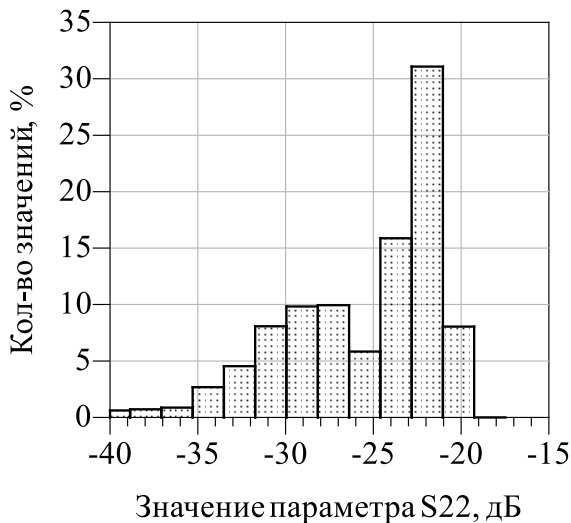
На следующем этапе был изготовлен экспериментальный образец трёхзвенного сумматора. При помощи анализатора цепей были измерены S-параметры конструкции. Сравнение характеристик, полученных при моделировании и при обмере натурального образца, представлены на рисунке 30. Из графиков видно, что удалось достичь соответствия между данными моделирования и эксперимента. Заметные отклонения можно объяснить неточностью выполнения параметров топологии при производстве.



а)



б)



в)

Рис. 29 - Гистограммы статистического анализа применения резисторов с разной погрешностью значений сопротивления. (а) – 10%, (б) – 5%, (в) - 1%.

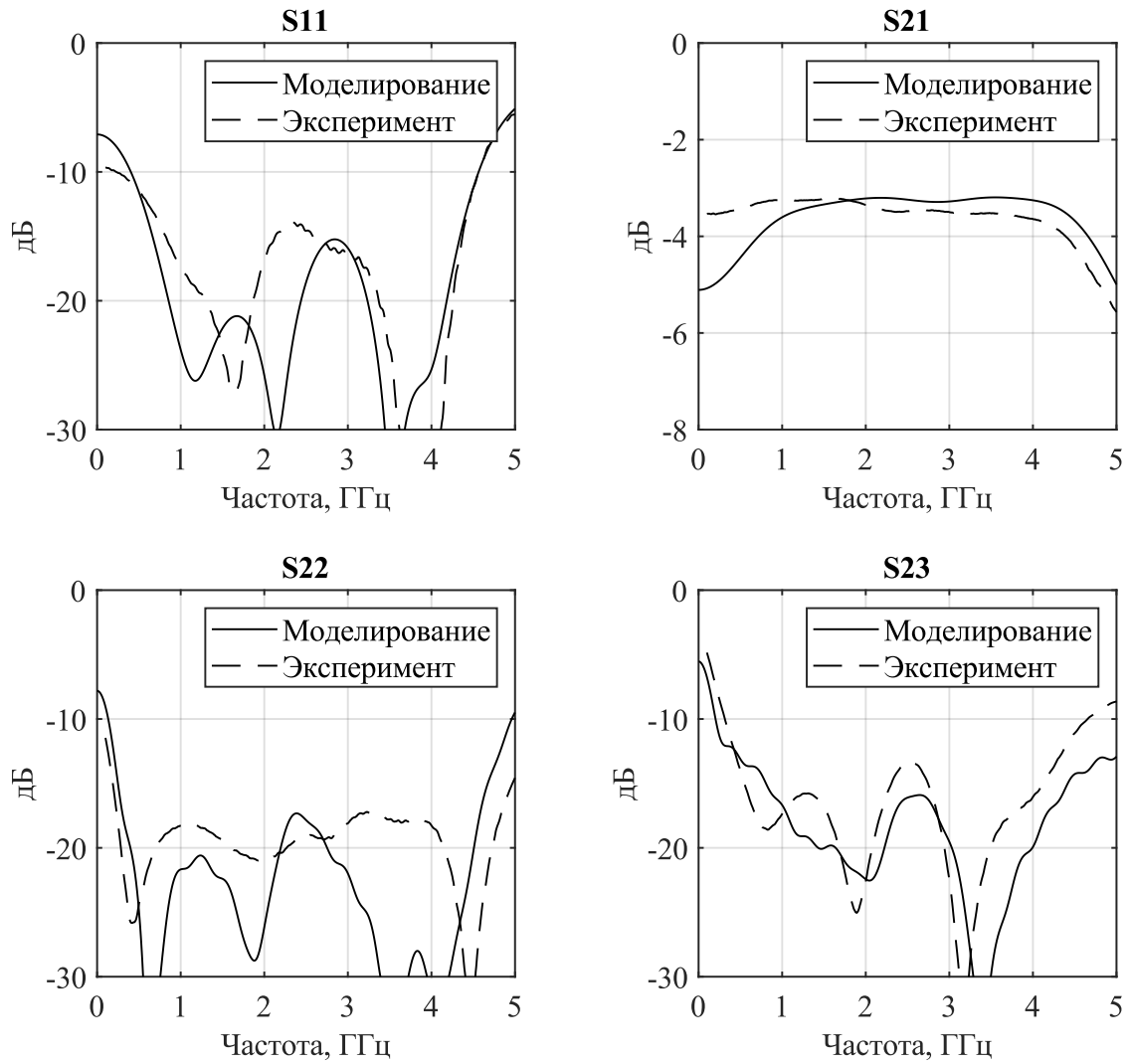


Рис. 30 - Сравнение S -параметров, полученных при моделировании с характеристиками экспериментального макета трёхпортового сумматора.

Таблица 3. Статистический анализ использования резисторов с разным процентом отклонения значений сопротивления.

Отклонение значения резистора, %	Процент выполнения цели, %	Количество ошибок, шт.	Количество удовлетворительных итераций, шт
10	47,2	528	427
5	83,8	162	838
1	0	0	1000

Предложенный трёхпортовый сумматор конструкции Уилкинсона может складывать только два источника СШП-видеоимпульсов. Этого недостаточно, если необходимо получить импульсы более сложной формы из нескольких колокольных видеоимпульсов, например дуплета Гаусса. Для формирования импульса формы второй производной от гауссовской кривой необходимо сложить минимум три колокольных сигнала. Для решения этой задачи предлагается использовать конструкцию с четырьмя входами. Можно получить такой сумматор из топологии уже полученного трёхпортового. Для этого достаточно соединить три экземпляра устройства, соединив входы первого сумматора и выходы второго и третьего. Было проведено моделирование такого устройства в пакете CST Studio и получены его S-параметры. Топология и фотография сумматора представлены на рисунке 31. Параметры топологии представлены в таблице 4. Сопротивления резисторов в схеме приведены в таблице 5. Далее в работе описанное устройство будет называться пятипортовым сумматором — по общему числу входов и выходов.

С помощью полученных данных моделирования был изготовлен экспериментальный образец пятипортового сумматора. Сравнительные характеристики модели и реального устройства изображены на рисунке 32. Из сопоставления видно, что удалось достичь соответствия между результатами моделирования и эксперимента. Заметные отклонения можно объяснить неточностью выполнения параметров топологии при изготовлении.

Экспериментальные устройства трёхпортового и пятипортового сумматоров удовлетворяют заданным критериям для суммирования СШП-видеоимпульсов, например, сверхкоротких импульсов с длительностями от 150 пс. Таким образом, сумматор можно использовать для сложения квазигауссовских импульсов с генераторов, описанных ранее в диссертационной работе. При этом сумматоры обеспечивают развязку между генераторами не менее 15 дБ в полосе от 0.5 до 5 ГГц. Воздействие генераторов друг на друга таким образом будет несущественным.

Устройство, состоящее из нескольких генераторов колокольных СКИ, подключенных к сумматору, далее будем называть управляемым генератором

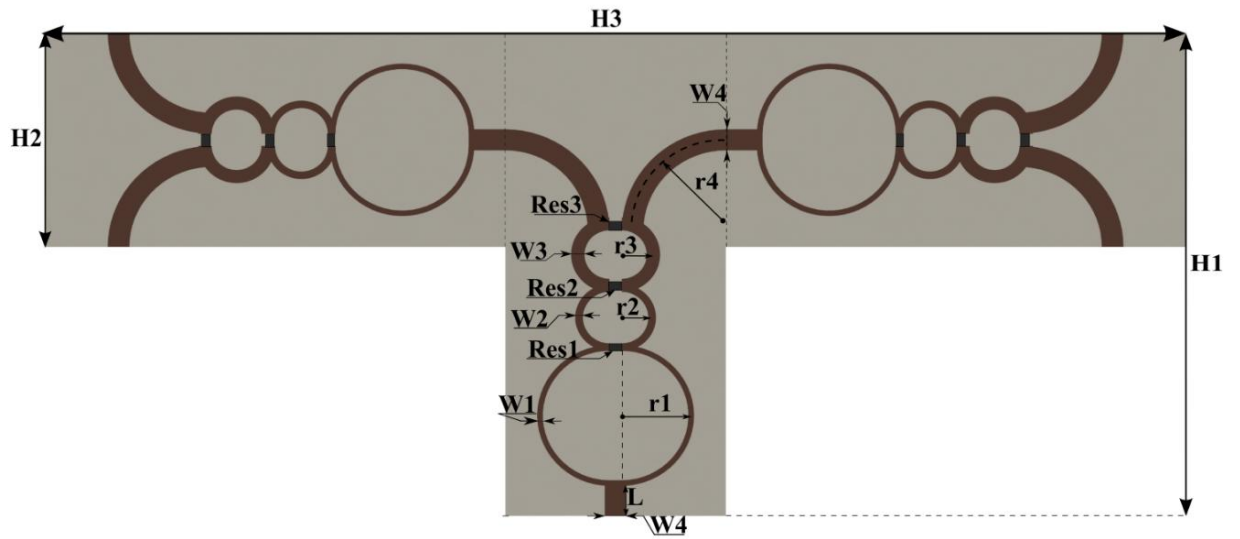
СКИ. Проведем моделирование и натурные эксперименты по сложению СШП-сигналов во временной области. Это позволит оценить послеимпульсные искажения и другие изменения формы сигналов при прохождении сумматора.

Таблица 4. Параметры топологии пятипортового сумматора.

Параметр	Значение, мм
H1	80
H2	35.5
H3	183.5
r1	11.2
r2	4.9
r3	5.1
r4	15
W1	0.9
W2	1.3
W3	2.17
W4	3.5
L	5

Таблица 5. Сопротивления балластных резисторов пятипортового сумматора.

Резистор	Сопротивление, Ом
Res1	132
Res2	185
Res3	250



a)



б)

Рис. 31 - Кольцевой сумматор конструкции Уилкинсона с четырьмя ВЧ- входами. Топология (а) и фото устройства (б).

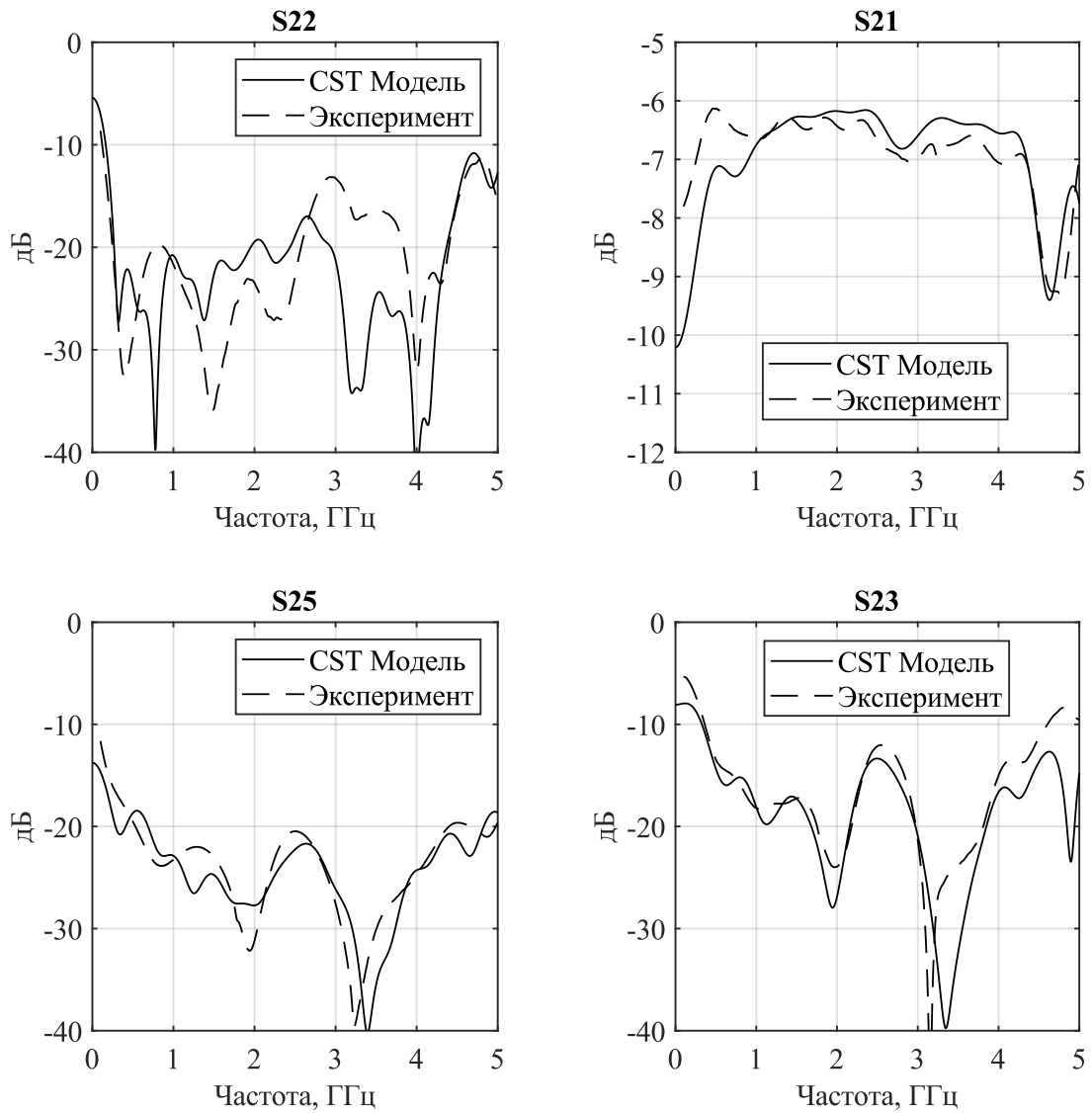


Рис. 32 - Сравнение S-параметров моделирования трёхзвенного пятипортового сумматора с реальным устройством.

3.2 Исследование формирователя импульса формы моноцикла

Было проведено моделирование сложения СКИ колокольной формы с двух генераторов. Общая схема, использованная для расчетов, приведена на рисунке 33. Иллюстрация описывает общий принцип суммирования СКИ как при моделировании, так и в будущем эксперименте. Ниже будем называть эту схему управляемым генератором СКИ.

Модель была построена в системе автоматизированного проектирования Keysight ADS. Для описания модели сумматора использовались S-параметры, полученные в разделе 3.1. К входам сумматора были подключены генераторы СКИ. С генераторов на сумматор поступали импульсы колокольной формы с амплитудой 25 В и длительностью равной, 200 пс. Длительность измерялась по полувысоте. Модель позволяет регулировать задержки формирования импульсов. Момент формирования задавался при помощи формирователей прямоугольных импульсов (запускающих генераторов). Полученные СКИ складывались при помощи сумматора. Затем сигнал поступал на виртуальный измеритель сигнала во временной области. Описанные импульсы, а также результат их сложения, представлены на рисунке 34. Размах полученного квазимоноцикла Гаусса составил 34.2 В. Длительность, вычисленная как промежуток времени между максимальным и минимальным значениями видеоимпульса, составила 350 пс. Как видно из осциллограммы на рисунке 34б, после окончания импульса наблюдаются послеимпульсные искажения. У генераторов колокольных видеоимпульсов «звон» отсутствует, что видно из рисунка 34а. То есть наблюдаемые искажения возникают при прохождении через сумматор. Этот эффект можно объяснить неидеальностью параметров. Параметры S_{11} , S_{22} , S_{33} имеют неравномерность и конечные значения в рабочем диапазоне частот. Также и параметр S_{23} , описывающий связь между выходами генераторов, не обеспечивает идеальную развязку между генераторами. Из-за переотражений и взаимовоздействий генераторов в сигнале появляются искажения.

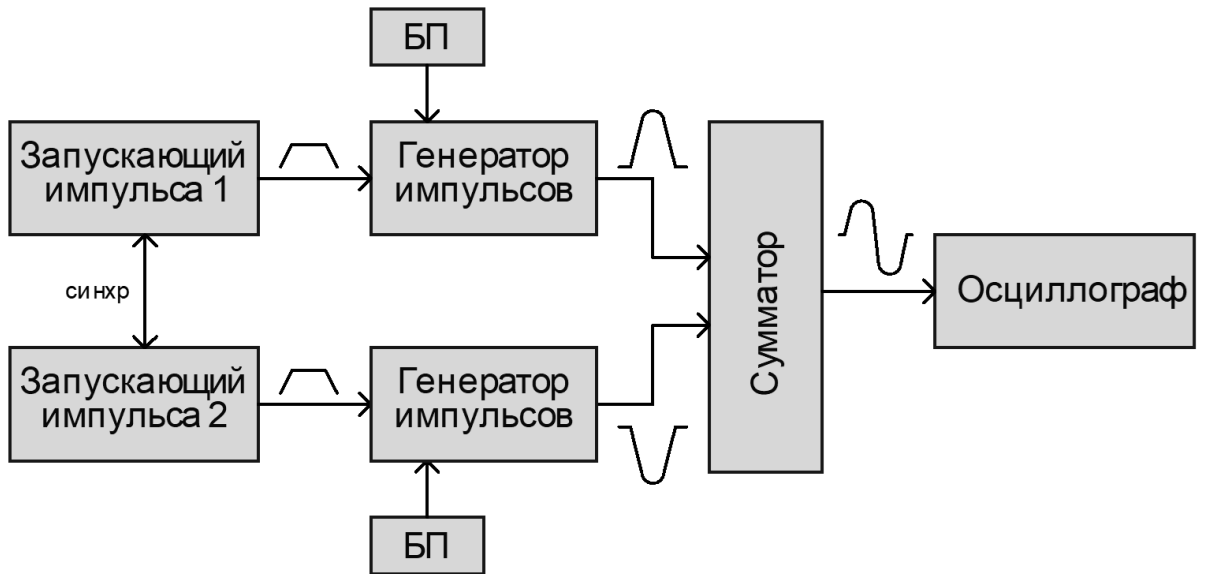


Рис. 33 - Блок-схема, описывающая установку для сложения СКИ.

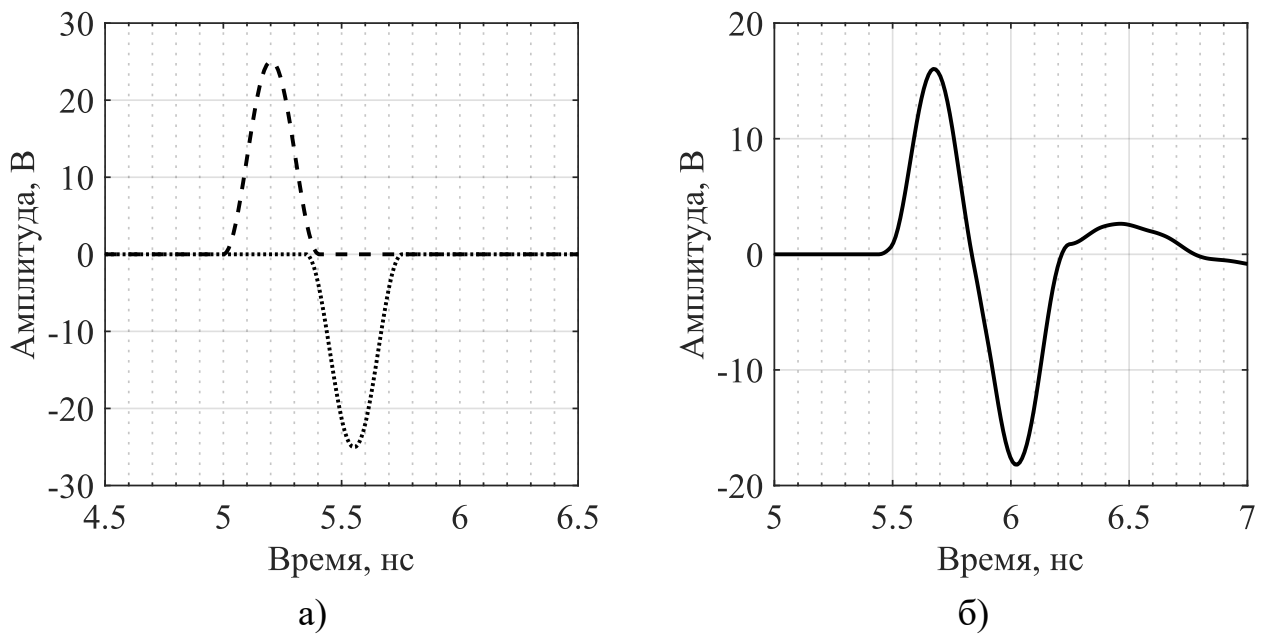


Рис. 34 - Импульсы на выходе моделей генераторов (а) и импульсы на выходе модели сумматора (б).

Из-за этого формирователи колокольных СКИ, хоть и в небольшой степени, но влияют друг на друга. Уровень искажений можно оценить относительно размаха квазимоноцикла по формуле: $R = (A_{\text{пни}}/A_{\text{имп}})*100$. $A_{\text{пни}}$ – размах послеимпульсных искажений, $A_{\text{имп}}$ – размах основного сигнала. Рассчитанный по такой формуле «звон» полученного квазимоноцикла составил 8%, что можно считать допустимым.

Для уменьшения послеимпульсных искажений была использована многозвенная конструкция сумматора. Она обеспечивает более широкий диапазон рабочих частот, что было показано при расчетах и моделировании конструкции. Для подтверждения преимущества многозвенной структуры проведем сравнение с однозвенным сумматором. Сложим с его помощью колокольные видеоимпульсы и оценим послеимпульсные искажения на выходе. При моделировании были использованы СКИ с такими же характеристиками, как и на рисунке 34а. Общая схема устройства была идентична иллюстрации 33. Осциллограммы импульсов, полученных на выходе однозвенного и трёхзвенного сумматоров, представлены на рисунке 35. Как видно из результатов, однозвенный сумматор дает небольшой выигрыш в размахе сигнала из-за меньших потерь в его конструкции. Однако при сложении таким сумматором у результирующего видеоимпульса ухудшается относительный уровень послеимпульсных искажений. Для однозвенной конструкции он составил 16%, что вдвое больше по сравнению с трехзвенной. Использование многозвенной конструкции целесообразно в системах, где параметр «звона» важен для работы системы.

Результаты моделирования были использованы для создания экспериментальной установки для сложения СКИ. Внешний вид сумматора с подключенными к нему генераторами изображен на рисунке 36. Лабораторное оборудование в эксперименте было подключено согласно блок-схеме, изображенной на рисунке 33. В качестве запускающих генераторов использовались Agilent 81104А, синхронизированные между собой. Выход сумматора был подключен через набор аттенюаторов с общим ослаблением 46 дБ к входу осциллографа Agilent DCA-X 86100D.

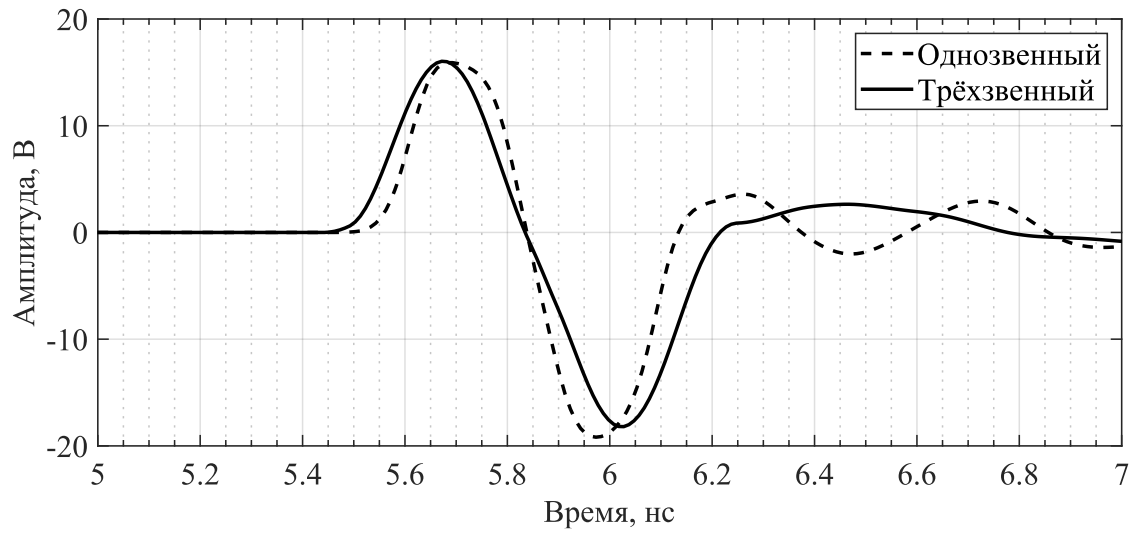


Рис. 35 – Импульсы, полученные при сложении однозвенным и трёхзвенным сумматором.



Рис. 36 – Внешний вид трёхзвенного сумматора с подключенными генераторами СКИ.

Принцип работы установки можно описать следующим образом. На схему подается питание. Задержки сигналов, поступающих на входы сумматоров, задаются при помощи управляющих генераторов. Они также соединены электрической линией «синхр» для синхронизации во временной области. Прямоугольные импульсы подаются на затворы полевых транзисторов генераторов СКИ. Для формирования квазимоноцикла необходимо, чтобы импульс с генератора отрицательного сигнала запаздывал относительно положительного импульса. Обратный случай также возможен, если необходимо получить видеоимпульс другой полярности. Второй генератор колокольного импульса срабатывает с задержкой, равной длительности видеоимпульса с первого генератора. Длительность колокола оценивается по уровню 0.1. Затем СКИ с выходов генераторов поступают на вход сумматора. Результирующий импульс, сложенный из двух колоколов, поступает на вход осциллографа. В эксперименте сигнал с выхода сумматора также проходил через аттенюатор с ослаблением 46 дБ для защиты от перегрузки измерительного тракта прибора.

С помощью описанной установки были сложены два СКИ, изображенные на рисунке 37а. Использовались СКИ произвольной формы, чтобы продемонстрировать возможность складывать СШП-сигналы с разными характеристиками. Основным требованием остается ширина спектра импульса, которая должна удовлетворять параметрам сумматора. Характеристики подаваемых импульсов:

- амплитуда положительного импульса: 28.8 В;
- амплитуда отрицательного импульса: 34.4 В;
- длительность положительного импульса по полувысоте: 210 пс;
- длительность отрицательного импульса по полувысоте: 180 пс.

Осциллограмма полученного квазимоноцикла изображена на 37б. Характеристики видеоимпульса:

- размах импульса: 38.8 В;
- длительность, рассчитанная от максимального до минимального значения: 290 пс;

— уровень послеимпульсных искажений: 11%.

В результате эксперимента удалось сложить два СШП-видеоимпульса разной полярности и получить СКИ формы квазимоноцикла Гаусса. На рисунке 38 изображены нормированные к максимуму спектры видеоимпульсов, сформированных при моделировании и в эксперименте. Из них видно, что энергия СКИ смещена на более высокую частоту относительно колокольных импульсов. Это свойство квазимоноцикла упрощает излучение таких сигналов, так как в них отсутствует нулевая и низкочастотные составляющие.

Необходимо отметить особенность экспериментальной установки, которая внесла ограничения в проведение эксперимента. В моделировании задержку запускающих сигналов друг относительно друга можно регулировать с шагом 1 пс. Это позволило точно сопоставить задержки колокольных импульсов и получить квазимоноцикл с максимально возможным размахом и минимальной длительностью. В эксперименте для запуска применены реальные генераторы, которые позволяют установить задержки с минимальным шагом в 50 пс. Это ограничение не даёт точнее подобрать моменты запуска. Из-за этого в эксперименте задержки запускающих генераторов были выбраны так, чтобы получить максимальный размах квазимоноцикла. Длительность сигнала могла быть и меньше, что было показано при моделировании. Но при уменьшении задержки ещё на 50 пс импульсы «наложились» бы друг на друга, снизив общий размах итогового видеоимпульса. Для решения этой проблемы можно использовать генераторы, которые позволяют точнее регулировать задержку. Можно подстраивать положение импульсов другими способами. Например, подходы, описанные в главе 1. Однако такой способ одновременно влияет и на амплитуду колокольных импульсов. Поэтому этот приём в эксперименте не применялся. Таким образом, в эксперименте была показана практическая возможность суммирования и регулирования положения импульсов. Достижение оптимальных параметров происходило за счет точного подбора задержек колокольных сигналов (как было продемонстрировано при моделировании).

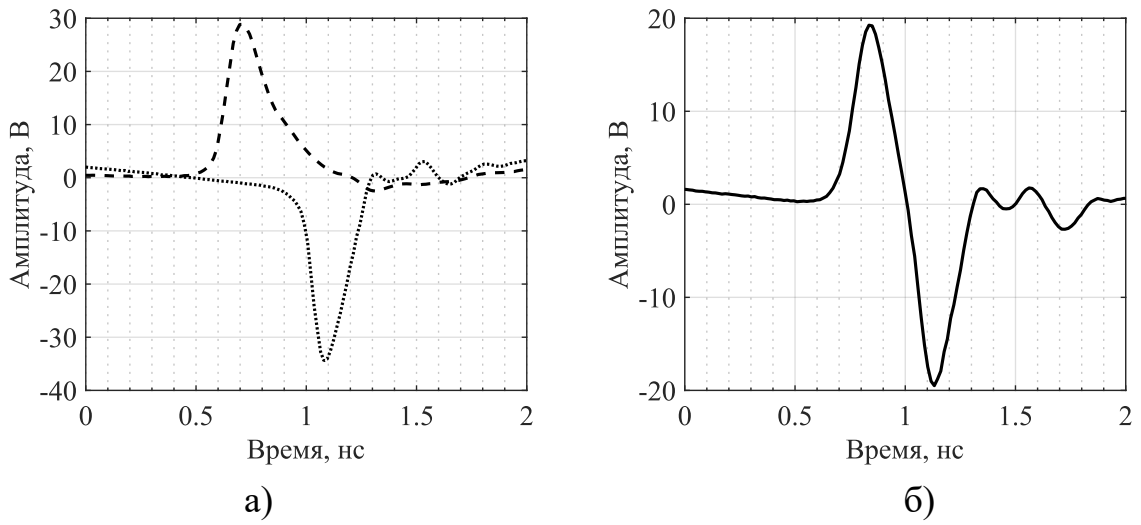


Рис. 37 – Осциллограммы импульсов с генераторов колокольных СКИ (а) и на выходе трёхзвенного сумматора (б).

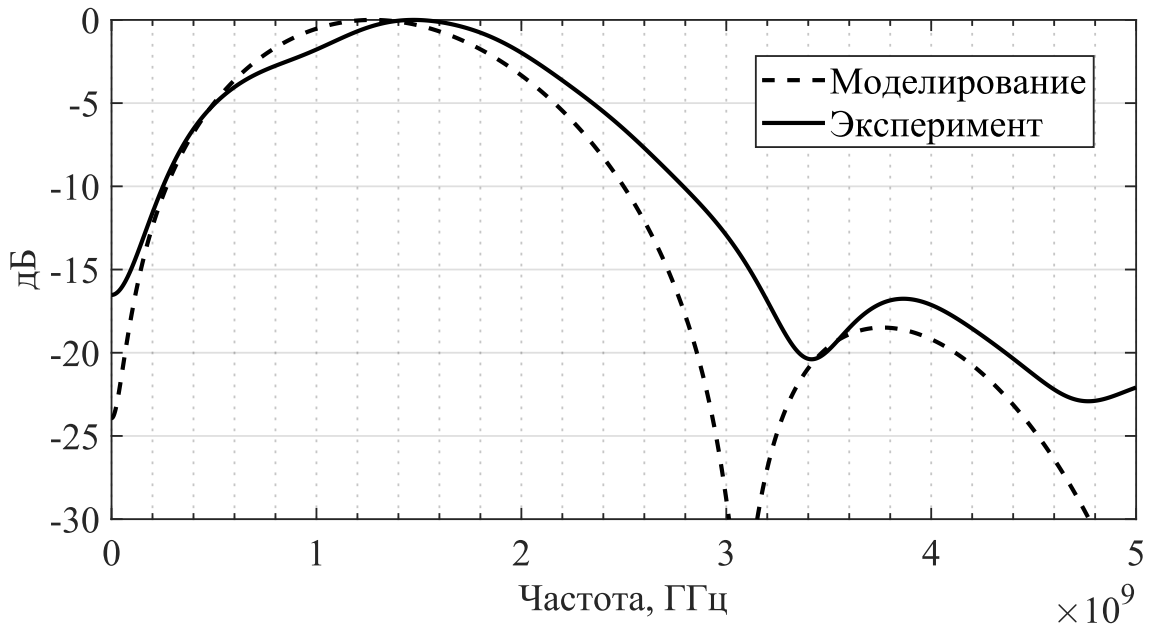


Рис. 38 – Спектры квазимоноциклов, полученные при моделировании и в эксперименте.

При использовании СКИ на практике важно знать форму спектра мощности таких сигналов. Этот параметр используется при проектировании антенных устройств. Форма и ширина спектра также напрямую связаны с разрешающей способностью радарных систем. Для расчета пространственного разрешения [29, 30, 32] используют формулу,

$$\Delta R = \frac{V}{2n\Delta F}, \quad (36)$$

где:

- V – скорость распространения импульса;
- n – шаг частоты;
- ΔF – ширина спектра сигнала.

Оценим разрешающую способность для квазимоноциклов, полученных при помощи СШП-сумматора. Для расчета разрешающей способности сигналов использовались спектры импульсов, полученных при моделировании и в эксперименте – рисунок 38. Расчёт ширины спектра СКИ обычно производят по выбранному заранее уровню. Часто в литературе встречается уровень минус 3 дБ относительно максимального значения [29-31], реже оценку проводят по уровню минус 10 дБ [32]. Будем использовать значение минус 3 дБ как более часто встречающееся. Для импульса, полученного в эксперименте, оценка составила 1.4 ГГц. Используя это значение, оценим параметр пространственного разрешения по формуле (36). Он составил 11 см.

Предложенный управляемый генератор СКИ позволяет регулировать длительности квазимоноцикла. Контролировать протяженности можно с помощью задержек запускающих импульсов. Меняя форму видеоимпульса, можно напрямую влиять на ширину спектра, так как известно, что длительность импульса во временной области обратно пропорциональна ширине спектра. Это соотношение можно получить из формулы для базы сигнала. Для СШП-импульсов база может быть вычислена по формуле:

$$B = \Delta t \Delta F \cong 1, \quad (37)$$

где:

- Δt – длительность импульса;
- ΔF – ширина спектра мощности импульса.

Чтобы продемонстрировать возможности перестройки длительности, было проведено моделирование. Использовалась установка, блок-схема которой представлена на рисунке 33. Устройство позволяет менять задержку между колокольными видеоимпульсами. Управлять этим параметром будем с помощью генераторов запускающих импульсов. Таким образом, можно задавать форму результирующего квазимоноцикла. Меняя момент образования импульса, можно «накладывать» передний фронт отрицательного импульса на задний фронт положительного. Под начальным положением в моделировании имелась в виду конфигурация системы, при которой отрицательный импульс следует сразу после положительного. То есть квазимоноцикл имел максимальный размах при минимальной длительности. Затем время задержки запускающего видеоимпульса для отрицательного генератора уменьшалось с шагом 2 пс. В результате на выходе сумматора наблюдали квазимоноциклы разной формы. Несколько примеров этих СКИ изображены на рисунке 39а. Диапазон регулировки длительности видеоимпульса составил 60%. Интервал перестройки — от 150 до 250 пс. Были построены спектры для полученных сигналов, они изображены на рисунке 39б. Для каждого видеоимпульса была рассчитана ширина спектра по уровням минус 3 дБ и минус 10 дБ. Зависимость ширины спектра от длительности представлена на рисунке 40.

Из результатов моделирования видно, что устройство позволяет регулировать форму видеоимпульса. Очевидно, что аналогичный процесс справедлив и для СКИ с другой полярностью. Это свойство можно использовать при модулировании последовательности видеоимпульсов, формируя импульсы разной длительности и полярности для передачи разных символов в системе радиосвязи.

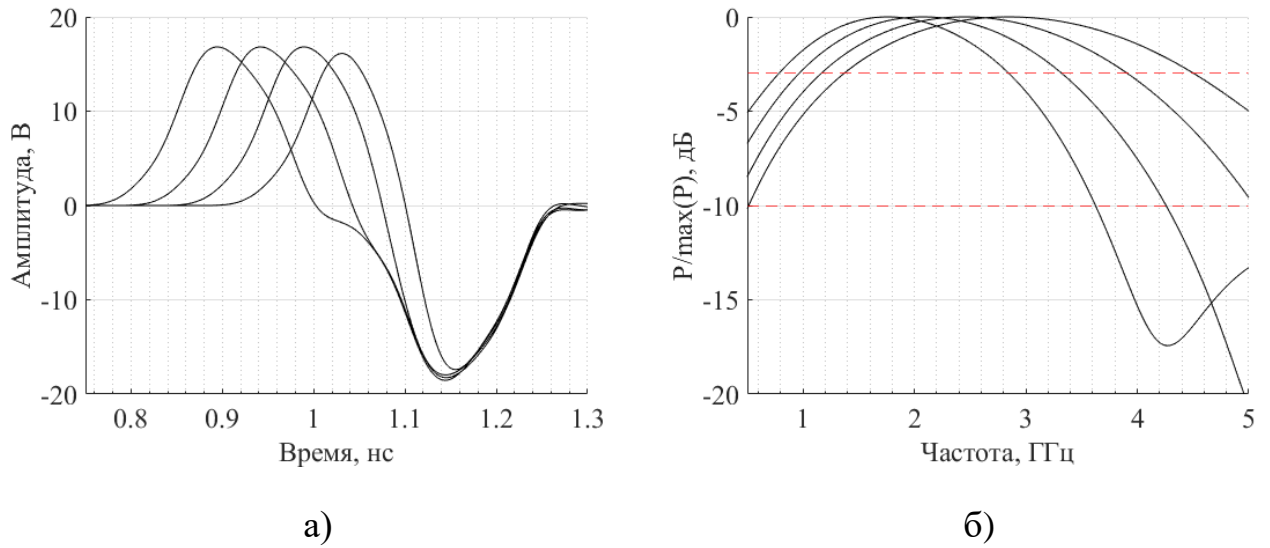


Рис. 39 – Выборка из массива импульсов квазимоноциклов.
 Осциллограммы импульсов (а) и их спектры (б).

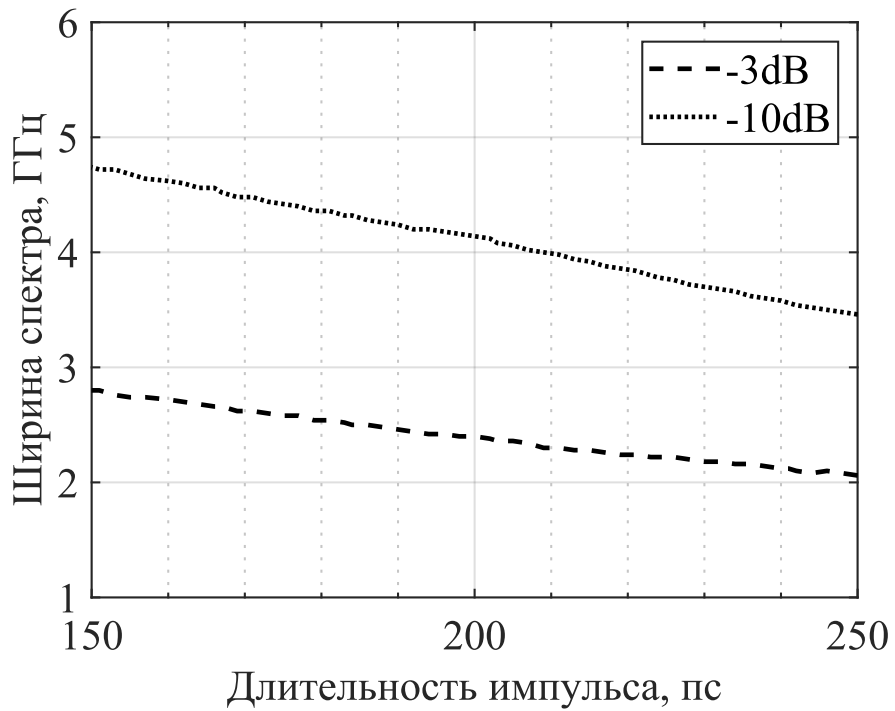


Рис. 40 – Зависимости ширины спектра импульсов
 от длительности импульсов.

Отметим, что при небольших изменениях задержки амплитуда квазимоноцикла меняется незначительно. Однако, когда импульсы начинают сильнее накладываться друг на друга, размах сигнала также уменьшается. То есть необходимо корректировать амплитуды колокольных СКИ, если важно сохранять размах итогового сигнала. Этот процесс возможен при помощи генератора, который был описан в главе 1.

Был проведен натурный эксперимент, аналогичный описанному выше моделированию. Использовалась установка, изображенная на рисунке 36. В качестве запускающих генераторов были применены Agilent 81104A, синхронизированные между собой. Выход установки был подключен через набор аттенюаторов с общим ослаблением 46 дБ к осциллографу Agilent DCA-X 86100D. Используемый генератор прямоугольных импульсов имеет ограничение: его минимальный шаг задержки равен 50 пс. Из-за этого получить в эксперименте такое же количество итераций, как при моделировании, где шаг был 2 пс, невозможно. Однако подтвердить общий принцип работы алгоритма по изменению формы результирующего СКИ не составляет труда. На первом этапе эксперимента были выбраны задержки запускающих сигналов, при которых квазимоноцикл на выходе имел максимальный размах. Затем задержка между запускающими импульсами уменьшалась с минимально возможным шагом в 50 пс. В результате был получен набор квазимоноциклов, зафиксированный при помощи осциллографа. Полученные временные представления сигналов изображены на рисунке 41а. Спектры сигналов представлены на графике 41б. Эксперимент подтверждает результаты моделирования и демонстрирует возможность изменения формы квазимоноциклов. Диапазон перестройки длительности в эксперименте, как и в моделировании, составил 60%. Спектры квазимоноциклов из экспериментов также оценивались по уровням 3 дБ и 10 дБ. График зависимости ширины спектра импульса от его длительности представлен на рисунке 42. Диапазон перестройки ширины спектра равен 27%, что также согласуется с данными моделирования.

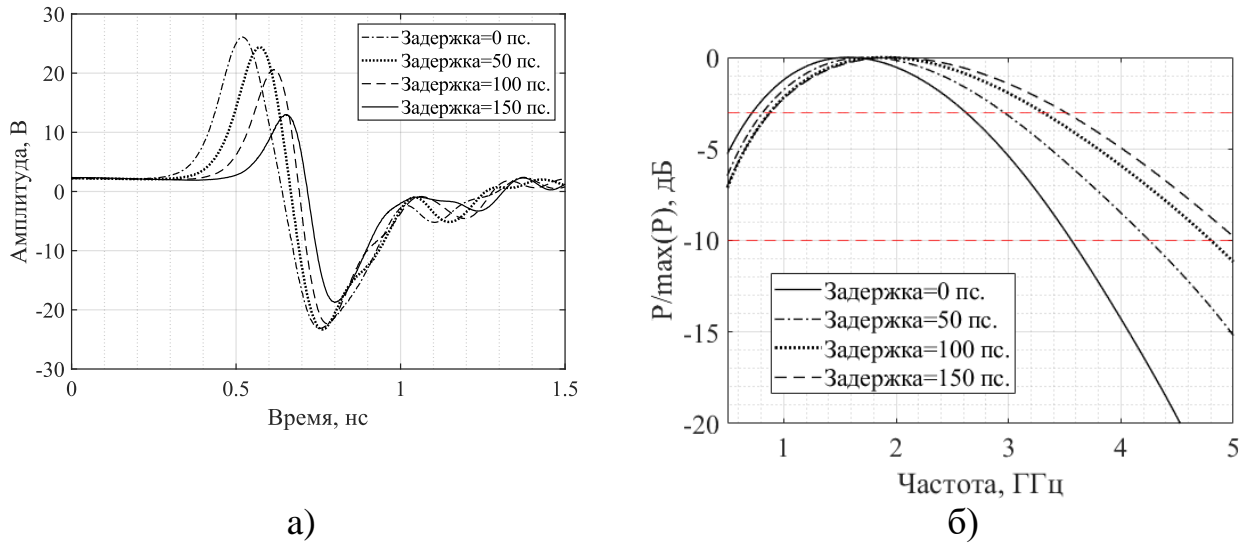


Рис. 41 – Осциллограммы импульсов при различных задержках запускающего сигнала (а) и их спектры (б).

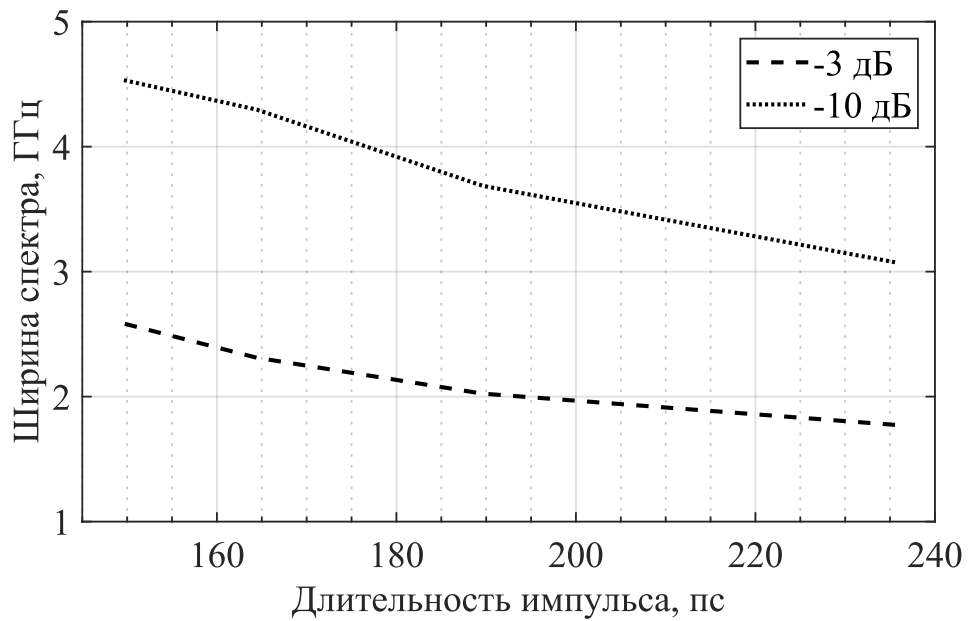


Рис. 42 – Экспериментальные зависимости ширины спектра импульса от длительности импульса.

3.3 Исследование формирователя импульса формы дуплета

Для формирования дуплета, второй производной от гауссовской кривой, предлагается использовать сложение четырёх импульсов колокольной формы. Для выполнения этой задачи необходим сумматор с четырьмя входами, моделирование которого было описано в разделе 3.1. Такая конструкция предлагает ещё больше сценариев формирования сложных форм видеоимпульсов. Таких, как моноцикл, дуплет Гаусса и др.

Блок-схема управляемого генератора СКИ с пятипортовым сумматором представлена на рисунке 43. Общий принцип формирования видеоимпульса аналогичен устройству с использованием трёхпортовой конструкции, исключения составляют особенности, связанные с большим количеством суммируемых сигналов. Это вызвано тем, что предлагается складывать четыре СКИ, поэтому необходимо использовать четыре генератора колокольных сигналов. Устройство позволяет складывать импульсы произвольных форм, но для примера рассмотрим случай с двумя положительными и двумя отрицательными колокольными СКИ с разными характеристиками амплитуды и длительности.

В схеме используются независимые каналы питания для каждого генератора с ДНЗ. Применяется четыре источника запускающих прямоугольных импульсов, синхронизированные во временной области. Отдельные запускающие сигналы необходимы для управления задержками сигналов. Это позволит регулировать моменты формирования колокольных импульсов. Обозначенные на блок-схеме (рисунок 43) сигналы описывают формирование второй производной от колокольной кривой Гаусса. Формирование дуплета – один из частных режимов работы устройства. Принцип получения такого СШП-сигнала следующий. Задержки запускающих импульсов системы подбираются так, чтобы вначале срабатывал генератор положительного импульса. Затем с задержкой, равной длительности первого положительного СКИ, срабатывают два генератора отрицательных.

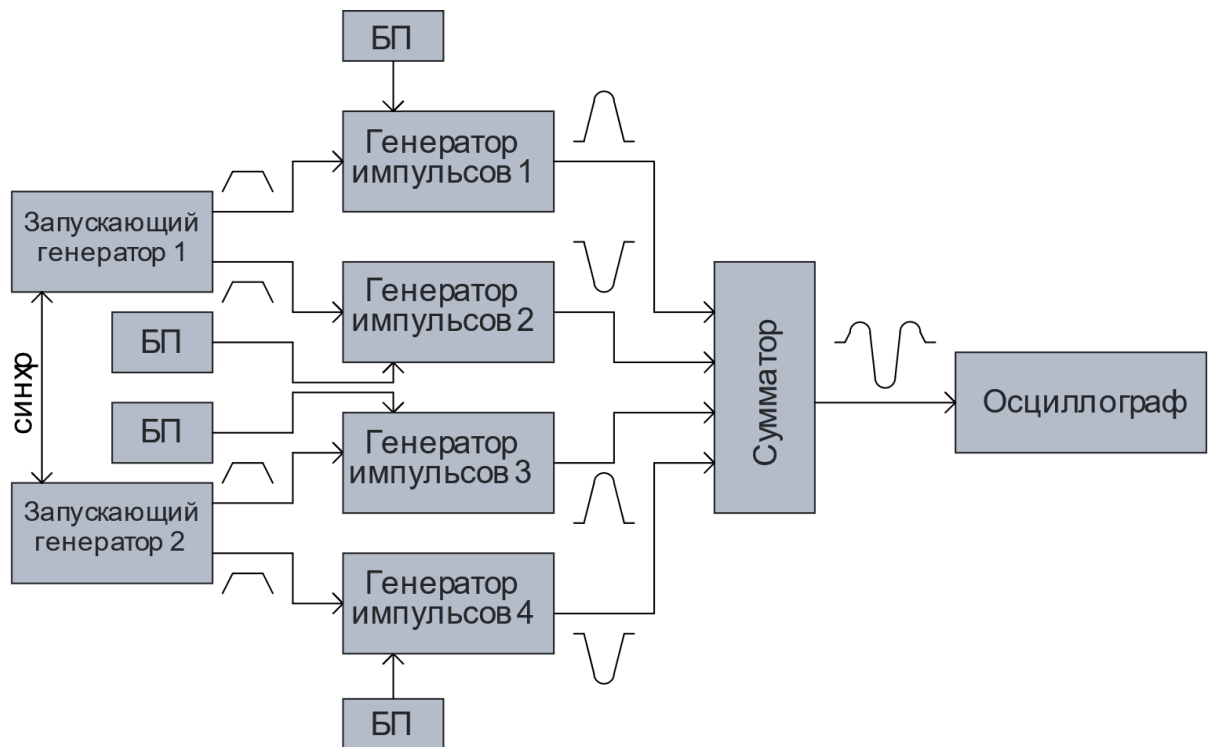


Рис. 43 - Блок-схема устройства управляемого генератора СКИ с использованием пятипортового сумматора.

Тем самым видеоимпульсы отрицательной полярности складываются. Последним запускается второй генератор положительного сигнала. Его задержка равна сумме длительностей первого положительного импульса и отрицательного. В результате сложения всех сигналов на выходе устройства формируется квазидуплет. Наблюдать импульс будем на нагрузке с сопротивлением 50 Ом.

Существуют и другие способы конфигурации управляемого генератора. Например, поменяв последовательность импульсов, можно сформировать квазидуплет обратной полярности. Также система позволяет получать моноциклы разной полярности (первая производная от кривой Гаусса), складывая попарно положительные и отрицательные колокола. За счет сложения нескольких колокольных сигналов этот подход позволяет добиться увеличения размаха сигнала, то есть формируется СКИ с большей энергетикой, чем при использовании трёхпортового сумматора. Аналогично можно увеличить амплитуду однополярных импульсов. Достаточно суммировать без задержек видеоимпульсы четырех генераторов с одинаковой полярностью.

Комбинируя задержки между сигналами, можно сформировать различные формы квазиэрмитовых и квазивейвлетовых импульсов, которые также применяют в системах связи и радиолокации [65-68]. Изменяя задержки между запусками генераторов с ДНЗ, можно задавать форму видеоимпульса. Также можно использовать технику фазовой манипуляции, чтобы изменять фазу каждого импульса. Это позволит формировать сигналы с высокой степенью когерентности. Такой подход также полезен для применения в областях, где требуется высокая скорость передачи информации. Для подтверждения описанных возможностей управляемого генератора СКИ проведём моделирование во временной области. Используя полученные при моделировании данные, проведём эксперимент на натурном макете формирователя.

Была реализована модель управляемого генератора с пятипортовым сумматором. Для описания работы сумматора использовались S-параметры, полученные в разделе 3.1. Для формирования колокольных импульсов использовались источники прямоугольного видеосигнала. САПР позволяет произвольно задавать форму фронтов в таких формирователях, а также длительность самого сигнала. Это позволило сформировать колокольные СКИ, которые затем подавались на вход сумматора. Описанные импульсы изображены на рисунке 44 (вверху). Задержки формирования импульсов были выбраны таким образом, чтобы получить на выходе устройства квазидуплет.

Алгоритм работы модели можно описать следующим образом. Вначале срабатывал генератор положительного импульса, затем два генератора отрицательного и в конце второй генератор положительного. Сформированные СКИ поступали на вход сумматора. Осциллограмма квазидуплета с выхода устройства изображена на рисунке 44 (внизу). Размах сигнала рассчитывался как разница максимального и минимального значений импульса и составил 36.9 В. За длительность принимался промежуток между положением первого и второго положительных пиков импульса, измеренная таким образом длительность СКИ равна 600 пс. Уровень послеимпульсных искажений был рассчитан относительно размаха сигнала и составил 11%.

Из результатов видно, что моделирование подтверждает возможность суммирования четырех сверхкоротких импульсов произвольной формы. Удалось сложить импульсы, используя разные задержки, в итоге добиться увеличения амплитуды отрицательного пика в результате сложения импульсов с двух генераторов. Было показано, что с помощью сумматора возможно получить импульсы разных форм за счет изменения задержки между колокольными импульсами.

Для расширения полосы работы сумматора использовалась многозвенная конструкция. Для целесообразности её использования было проведено сравнительное моделирование, в котором для сложения использовался пятипортовый сумматор с однозвенной конструкцией.

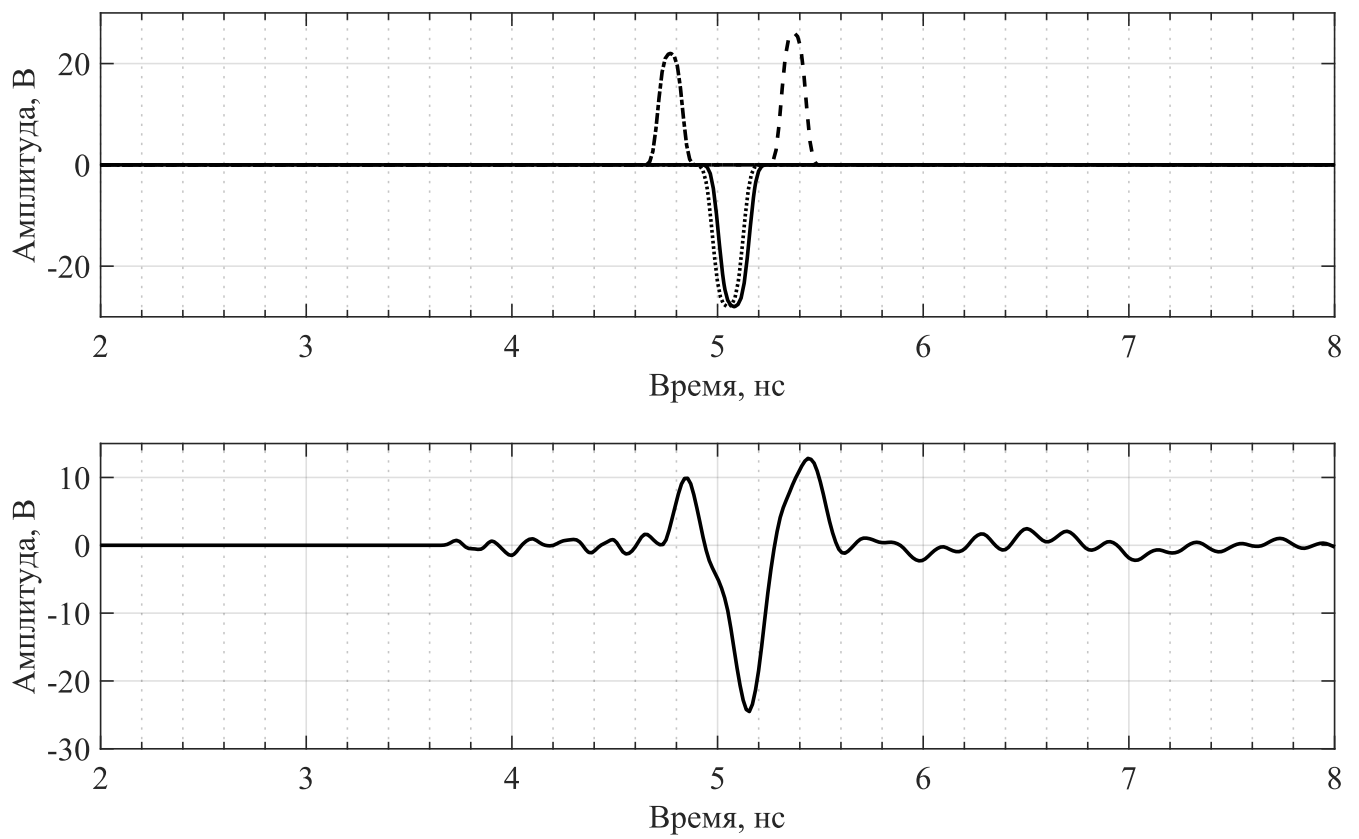


Рис. 44 – Осциллограммы импульсов на входе и на выходе модели пятипортового сумматора.

Схема работы в моделировании была аналогична модели с многозвенной конструкцией. Для описания работы однозвенного сумматора Уилкинсона были использованы S-параметры, вычисленные ранее в разделе 3.1. Остальные параметры и условия при моделировании не менялись. На выходе установки также получали квазидуплет. Его осциллограмма изображена пунктиром на рисунке 45. Для сравнения сплошной линией на том же рисунке приведен квазидуплет, сформированный при помощи многозвенной конструкции. Характеристики импульса на выходе пятипортового однозвенного сумматора:

- размах сигнала: 40.1 В;
- длительность сигнала: 550 пс;
- относительный уровень послеимпульсных искажений: 19%.

Полученные данные повторяют результаты моделирования для трёхпортовых сумматоров. Однозвенная конструкция дает небольшой прирост в размахе. Однако при этом вдвое увеличивается уровень «звона». Таким образом, применять однозвенную конструкцию возможно, если для работы системы приемлем такой уровень послеимпульсных искажений.

С помощью результатов моделирования, был изготовлен натурный макет управляемого генератора. Фотография формирователей с ДНЗ, подключенных к пятипортовому сумматору конструкции Уилкинсона, представлена на рисунке 46а. В эксперименте использовались два положительных и два отрицательных генератора колокольных сигналов. Чтобы продемонстрировать возможность складывать любые СШП-видеоимпульсы, использовались формирователи с произвольной формой квазиколокольного СКИ на выходе. В качестве источников запускающих прямоугольных импульсов выступали два двухканальных генератора Agilent 81104А. Сигнал с выхода установки через аттенюаторы с общим ослаблением 46 дБ был подключен к осциллографу Agilent DCA-X 86100D. Питание генераторов СКИ осуществлялось четырьмя независимыми источниками постоянного тока. Фотография установки с лабораторными приборами изображена на рисунке 46б.

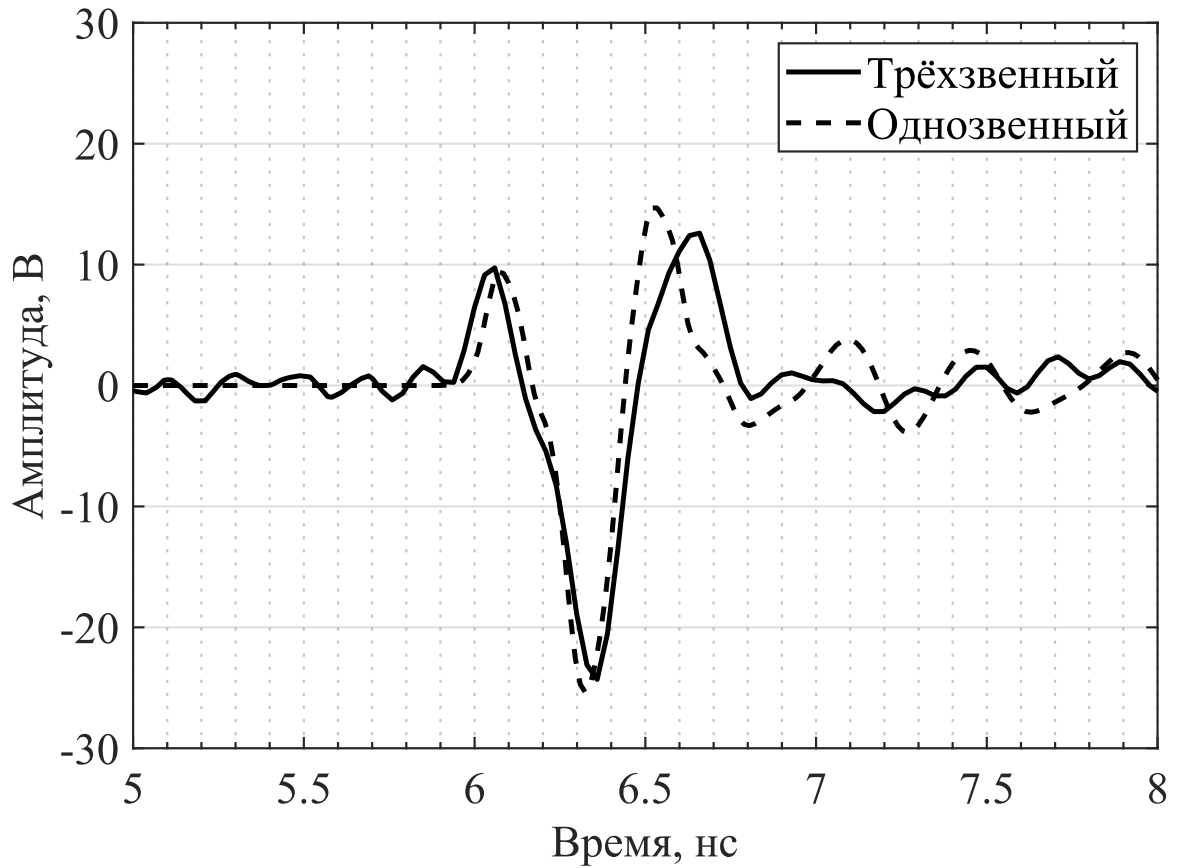
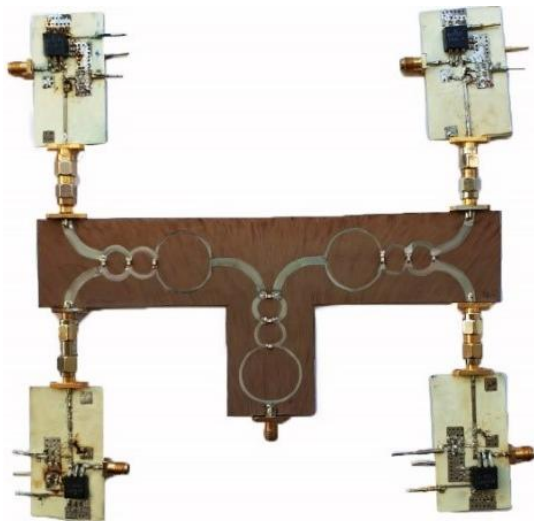
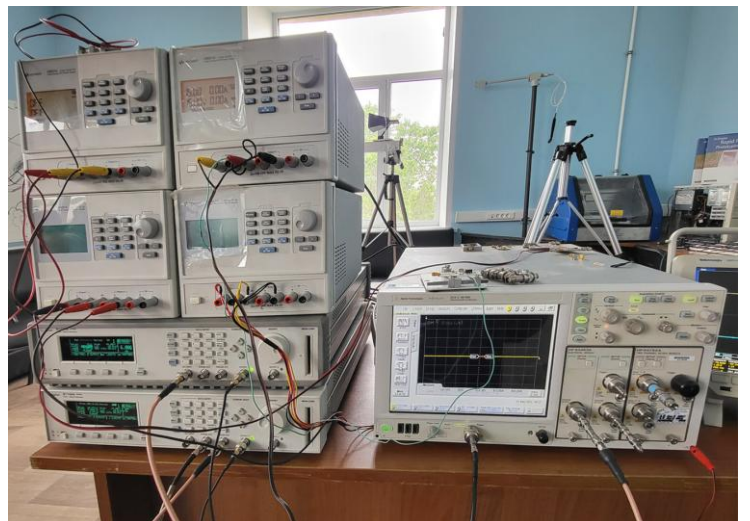


Рис. 45 – Сравнение импульсов на выходе трёхзвенного и однозвенного пятипортовых сумматоров. Моделирование в САПР.



а)



б)

Рис. 46 – Фотографии натурной модели управляемого генератора с пятипортовым сумматором конструкции Уилкинсона (а) и измерительной установки (б).

Работа экспериментального стенда осуществлялась следующим образом. При включении установки на выходе БП появляется постоянное напряжение. Генераторы с ДНЗ формируют колокольные импульсы. При помощи запускающих импульсов задается момент формирования СКИ. Параметры запускающих импульсов: длительность 9 нс, амплитуда 10 В. Лабораторные генераторы имеют минимальный шаг для изменения задержки формирования импульса равный 50 пс. Для одновременной работы лабораторные генераторы соединены электрической линией синхронизации. Моменты формирования колокольных импульсов были выбраны так, чтобы первым запускался генератор положительного импульса. Затем с задержкой, равной длительности первого импульса, одновременно срабатывали два генератора отрицательных СКИ. С задержкой, равной длительности первого положительного и отрицательного импульсов, запускался четвертый, положительный генератор. Параметры видеоимпульсов на выходе генераторов с ДНЗ были измерены заранее. Первый положительный импульс имеет амплитуду 22.3 В, длительность 210 пс. Второй положительный — амплитуду 15.4 В и длительность 290 пс. Первый отрицательный — амплитуду 20.2 В и длительность 130 пс. Второй отрицательный — амплитуду 23 В, длительность 175 пс. Длительности для колокольных импульсов рассчитаны по полувысоте. Осциллограммы этих импульсов изображены на рисунке 47а.

В результате эксперимента на осциллографе наблюдали импульс в форме квазидуплета. Видеоимпульс показан на рисунке 47б сплошной линией. Параметры полученного квазидуплета Гаусса: размах сигнала 34.1 В, длительность сигнала 590 пс, относительный уровень послеимпульсных искажений 12%. Для сравнения импульс приведен вместе с СКИ, полученным при моделировании (пунктирная линия). Таким образом, подтверждена возможность формирования импульса квазидуплета при помощи суммирования нескольких квазикоколольных сигналов произвольной формы.

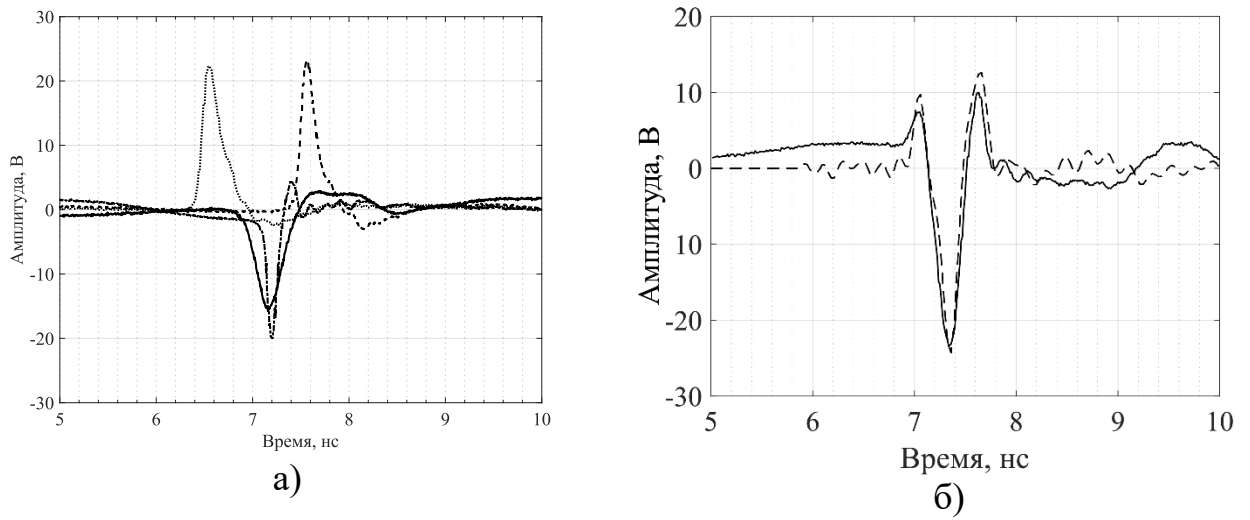


Рис. 47 – Импульсы с генераторов колокольных СКИ (а). Импульс на выходе пятипортового сумматора (б); сплошной линией – эксперимент, пунктирной – моделирование.

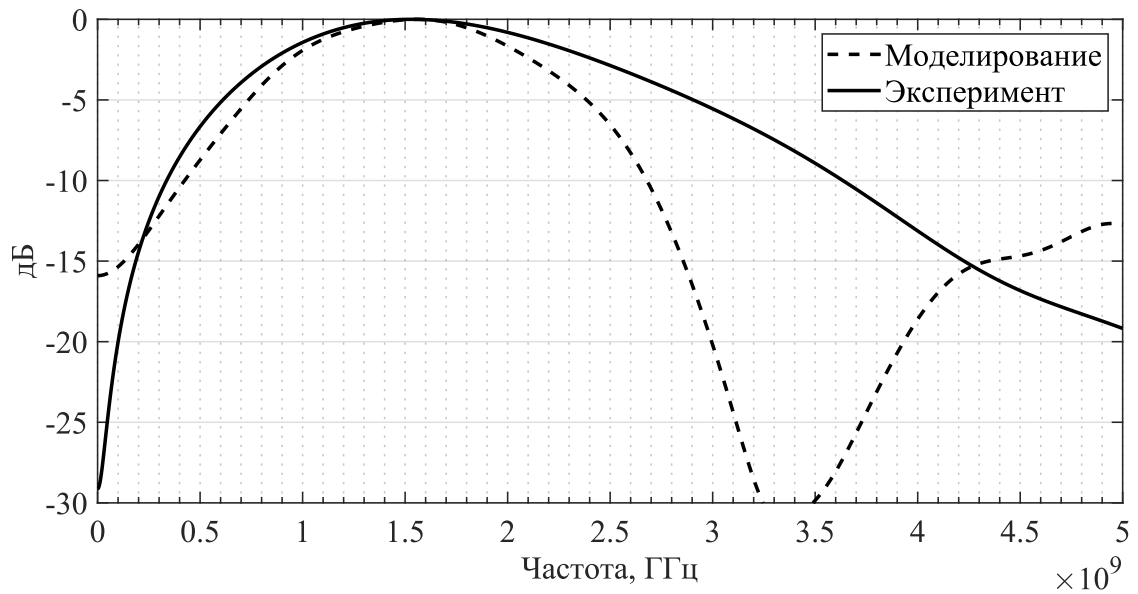


Рис. 48 – Спектры мощности квазидуплетов, полученных при моделировании и в эксперименте.

Основным преимуществом сверхкоротких видеоимпульсов является сверхширокая полоса их спектра. Сигналы формы квазидуплетов Гаусса имеют преимущество над колоколом и моноциклом. Основная энергия спектра дуплета сосредоточена на более высоких частотах. Это свойство упрощает проектирование антенной системы для излучения такого СКИ. Были построены спектры полученных в эксперименте и при моделировании видеоимпульсов. Они представлены на рисунке 48. Оба спектра нормированы к своему максимальному значению. Ширина спектра квазидуплета, полученного при моделировании, равна 1.3 ГГц. Измерение проводилось по уровню минус 3 дБ. Ширина спектра экспериментального сигнала 1.73 ГГц.

Результаты моделирования и эксперимента подтверждают возможность формирования импульсов разной формы. Изменение моментов запуска генераторов колокольных видеоимпульсов позволяет получить на выходе стенда квазидуплет противоположенной полярности. Возможно также формировать другие формы импульсов, регулируя моменты запуска. Например, двухпериодные импульсы. При помощи этого свойства можно модулировать последовательность СКИ [50-52, 69, 70]. В следующем разделе приведены экспериментальные подтверждения этих возможностей.

3.4 Задание формы СКИ за счёт изменения задержек формирования входных сигналов

Проведен натурный эксперимент по получению квазимоноцикла (первая производная от гауссовской кривой) при помощи пятипортового сумматора. В опыте использовалась схема, описанная ранее. Экспериментальная установка изображена на рисунке 46. Были применены генераторы колокольных импульсов с теми же характеристиками, что и ранее. Для получения квазимоноцикла менялись моменты запуска генераторов. Первыми одновременно запускались формирователи отрицательных СКИ. Затем с задержкой, равной длительности

отрицательного импульса, включались генераторы положительных. Видеоимпульсы поступали на входы пятипортового сумматора. Таким образом, в нагрузке попарно складывались положительные и отрицательные СКИ. Этот подход позволил увеличить размах итогового квазимоноцикла относительно формирования такого видеоимпульса при помощи трёхпортового сумматора. На осциллографе наблюдали сигнал, изображенный на рисунке 49. Параметры полученного видеоимпульса: размах — 43.6 В, длительность от пика до пика — 210 пс, относительный уровень послеимпульсных искажений — 12%. Также был построен спектр получившегося видеоимпульса (рисунок 50). Была подтверждена возможность формирования квазимоноциклов при помощи сложения четырёх импульсов. Изменить полярности СКИ можно при помощи коррекции моментов запуска так, чтобы вначале срабатывали генераторы положительной полярности, а затем отрицательной. Используемый алгоритм формирования позволяет сохранить гибкость в управлении формой итогового СКИ. То есть устройство также позволяет регулировать длительность видеоимпульса так, как описано в разделе 3.2.

С помощью описанного управляемого генератора СКИ можно получить и другие формы импульсов. Например, двухпериодный импульсы. Представление такого видеоимпульса можно получить следующим образом. Используем так же два положительных и два отрицательных формирователя. Генераторы запускаются друг за другом: отрицательный, положительный, отрицательный и положительный. Задержки формирования для каждого видеоимпульса равны сумме длительностей предыдущих. Полярность импульса может быть изменена, для этого необходимо скорректировать моменты запуска колокольных импульсов. Пример сформированного таким образом сигнала изображен на рисунке 51. Как видно из опытов, управляемый генератор позволяет получать СШП-сигналы разной формы. Это свойство полезно в системах, где требуются сигналы разных типов с возможностью изменения их формы.

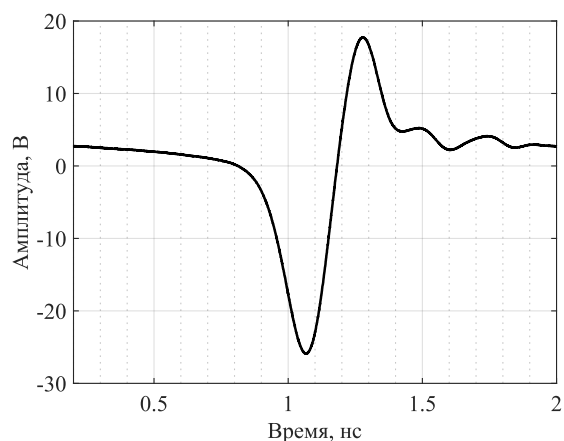


Рис. 49 – Квазимоноцикл, полученный с помощью управляемого генератора СКИ с пятипортовым сумматором Уилкинсона.

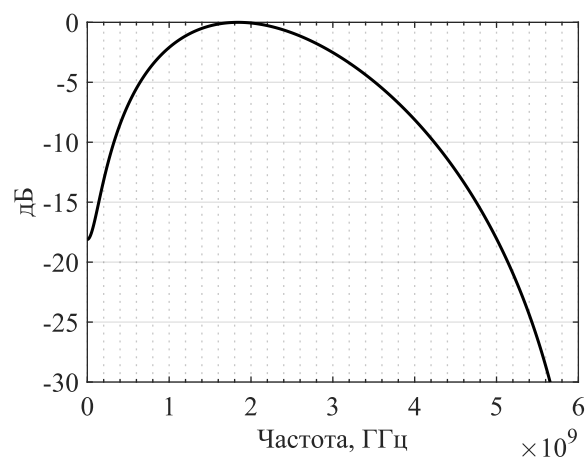


Рис. 50 – Спектр мощности (нормированный по максимальному значению) квазимоноцикла Гаусса, полученный с помощью управляемого генератора СКИ с пятипортовым сумматором Уилкинсона.

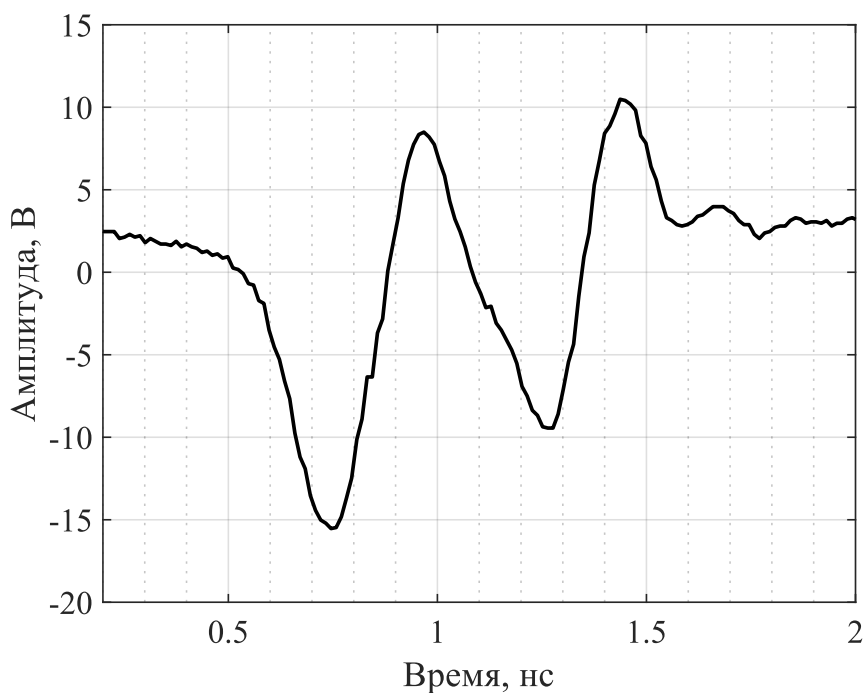


Рис. 51 – Двухпериодный, сформированный при помощи управляемого формирователя СКИ с пятипортовым сумматором Уилкинсона.

Выводы

В третьей главе продемонстрированы преимущества импульса формы моноцикла и дуплета относительно колокольного. Описанные СКИ не имеют постоянных составляющих в спектре, что упрощает их излучение при помощи антенной системы.

Проведен анализ известных в литературе методов формирования моноциклов. Построены модели, с помощью которых выявлены недостатки существующих решений. Например, исследованные схемы не позволяют управлять формой сигнала на выходе формирователей. Также в таких схемах предъявляются высокие требования к характеристикам используемых пассивных элементов.

Предложен альтернативный метод формирования моноциклов и дуплетов с использованием сумматора. Описан алгоритм, позволяющий произвести вычисления характеристик сумматоров и суммировать СШП-видеоимпульсы. За основу взят подход к расчету трёхзвенного сумматора конструкции Уилкинсона. На основе алгоритма произведен расчет и построена модель трёхзвенного сумматора для сложения сигналов с двух формирователей. Трёхпортовая модель использована при построении пятипортового сумматора для сложения сигналов с четырёх источников. Проведено электромагнитное и статистическое моделирование предложенных конструкций для уточнения параметров сумматоров. Полученные характеристики сумматоров использованы в модели для сложения СКИ. При помощи модели проведены вычисления во временной области, продемонстрирована возможность получать импульсы в форме моноциклов и дуплетов Гаусса с разными полярностями и длительностями.

На основе полученных данных построены экспериментальные макеты сумматоров для сложения сигналов с двух и четырёх источников. Проведены эксперименты по сложению импульсов произвольных форм. Получены осциллограммы импульсов формы квазимоноциклов и квазидуплетов.

Продемонстрирована возможность регулировать длительность моноцикла за счет управления задержками колокольных сигналов. Диапазон перестройки длительности квазимоноцикла в описанном эксперименте составил 60%.

Изготовлены натурные макеты управляемых генераторов видеоимпульсов. С его помощью подтверждена возможность формировать импульсы разных форм. Исследованные устройства можно использовать для формирования последовательности СКИ с разными видами модуляции.

ГЛАВА 4. Программно-аппаратный измерительный комплекс для работы с генераторами СКИ

В ходе исследований натуральных образцов генераторов СКИ необходимо обрабатывать, хранить и визуализировать большое количество данных. Полученные осциллограммы импульсов нуждаются в дополнительной обработке — вычислении характеристик сигналов, их сравнении между собой и т. д. Для автоматизации решения этих задач был разработан программно-аппаратный измерительный комплекс (ПАИК). Использование ПАИК позволяет ускорить эти процессы и уменьшает процент ошибок, вызванных человеческим фактором. Например, при исследовании зависимостей параметров СКИ от силы токов инжекции и экстракции заряда в ДНЗ, а также длительностей этих процессов, требуется многократно повторять однотипные действия — менять напряжения питания, устанавливать параметры запускающих импульсов и т. д. Для построения зависимости формы импульса от токов инжекции и экстракции заряда необходимо провести несколько тысяч циклов измерений. ПАИК предназначен для автоматического изменения с фиксированным шагом напряжения питания и последующего измерения параметров импульсов. Таким образом, работа комплекса позволяет на несколько порядков ускорить проведение этого эксперимента.

При помощи ПАИК реализовано управление генераторами с сумматорами Уилкинсона. При помощи ПО вычислялись задержки входных видеоимпульсов для формирования моноциклов и дуплетов. Реализовать этот алгоритм, вручную перестраивая приборы, невозможно из-за высокой частоты следования видеоимпульсов. Однако программное управление современным оборудованием позволяет решить эту проблему.

Ещё одной важной задачей является отображение результатов экспериментов в виде графиков — осциллограмм, спектров и других характеристик видеоимпульсов. Этот процесс является неотъемлемой частью исследований в

области радиофизики. Итак, ПАИК помогает с решением трёх задач: проведение большого количества измерений, обработка полученных результатов и управление формой СКИ.

При проектировании структуры программного обеспечения (ПО) комплекса стало понятно, что методы управления лабораторными приборами имеют повторяющуюся архитектуру. Одинаковые паттерны прослеживаются как в задачах по измерению характеристик СКИ, так и при формировании видеоимпульсов заданной формы. Лабораторные приборы, как правило, используют стандартный текстовый протокол обмена сообщениями VISA (Virtual Instrument Software Architecture). Для решения поставленных задач измерения и управления генераторами применяется схожий набор команд. Поэтому при построении архитектуры было решено использовать принципы объектно-ориентированного программирования (ООП). Для управления лабораторными приборами были созданы интерфейсы, сущности, описывающие регламент взаимодействия и изменения отдельных параметров оборудования. Это позволило абстрагировать алгоритмы измерения и управления генераторами от конкретных команд протокола, так как их сигнатура может отличаться у приборов одинакового типа, но выпущенных разными производителями. Из-за этого реализации интерфейсов для разных приборов отличаются, но это не влияет на работу алгоритмов.

Для написания программного кода были выбраны технологии, распространяющиеся согласно принципам открытого ПО. Этот подход позволяет минимизировать риск региональной блокировки этих инструментов и, при необходимости, вносить исправления в их исходный код. В проекте использовались следующие технологии:

- язык программирования Python версии 3.10 [81];
- библиотека PyVISA версии 1.12.0 для взаимодействия с лабораторными приборами по протоколу VISA [45];
- библиотека NumPy версии 1.23 для работы с большими массивами данных [46];

- библиотека Matplotlib версии 3.6.3 для построения графиков с результатами измерений [47];
- распределённая система управления версиями Git версии 2.32 для хранения истории изменений [80].

Все вышеперечисленные инструменты активно развиваются сообществом разработчиков. Это позволит в будущем добавлять в ПО из состава ПАИК новые функции и улучшать его производительность. Инструменты имеют стабильные версии и развиваются достаточно давно, имеют хорошее покрытие тестирующими системами и подробную документацию. Это позволяет утверждать, что входящие в состав библиотек функции имеют предсказуемые алгоритмы работы и минимальное количество ошибок.

4.1 Структура программно-аппаратного комплекса

Измерительный комплекс состоит из двух частей: аппаратной и программной. В аппаратную входят коммутатор, лабораторные приборы, измеряемое устройство и ЭВМ. Блок-схема ПАИК изображена на рисунке 52. Схема описывает взаимодействие с генератором колокольных импульсов, но может быть модифицирована в зависимости от исследуемого устройства. Обмен командами происходит в сети LAN (Local Area Network). Всё оборудование объединено в локальную сеть с помощью маршрутизатора D-Link DES-1005D. ПАИК позволяет использовать и другие физические интерфейсы или их комбинации. Например, взаимодействие с приборами можно осуществить по USB. Состав текстовых команд SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) протокола VISA при этом не изменится, это позволяет исключить зависимость от физического интерфейса управления. Программное обеспечение из состава ПАИК выполняется на ЭВМ. ПО состоит из пяти модулей: управления лабораторными приборами, получения данных с оборудования, обработки осциллограмм видеоимпульсов, визуализации данных и управления генераторами СКИ.



Рис. 52 - Архитектура программно-аппаратного комплекса.

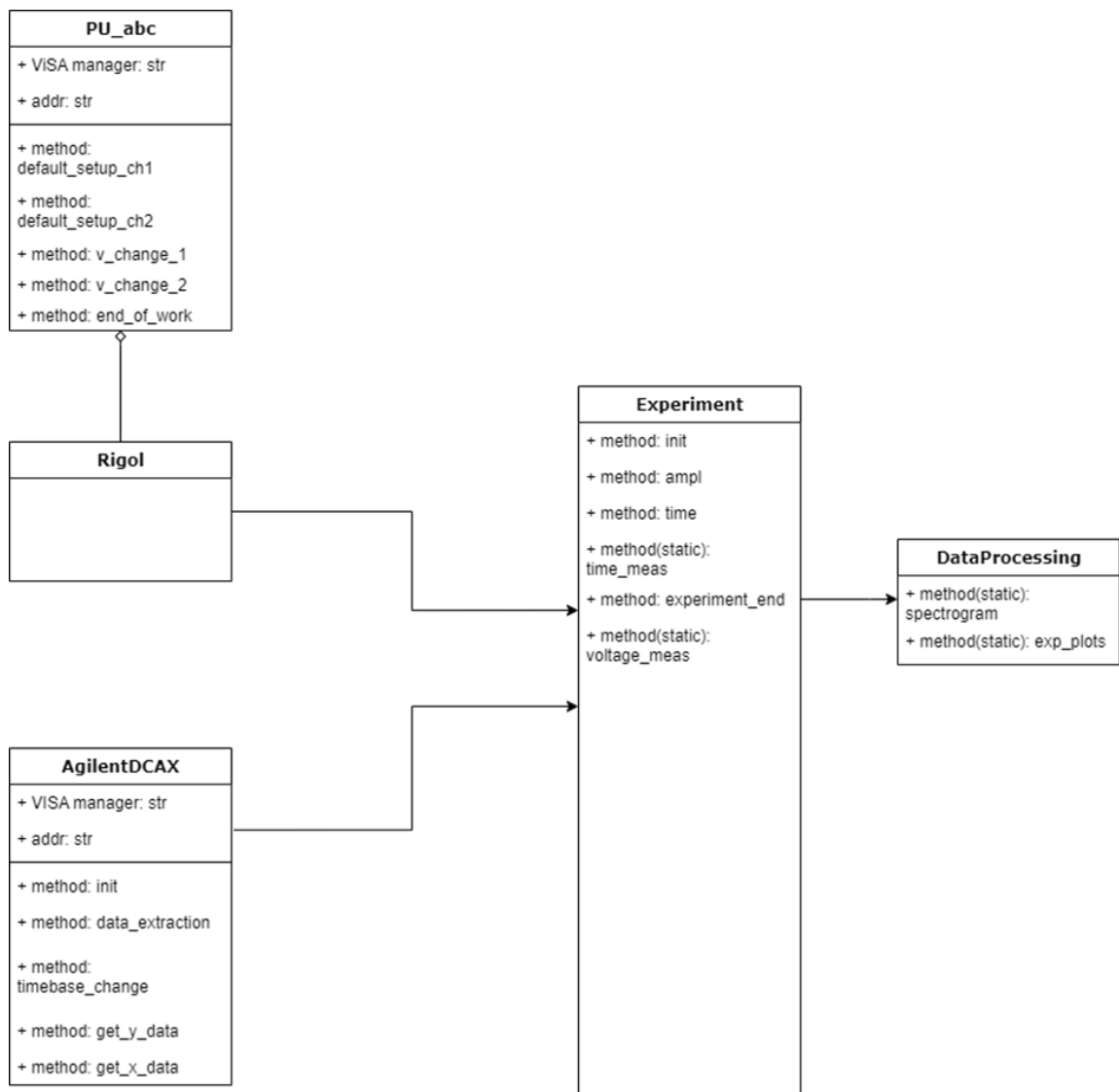


Рис. 53 - Архитектура классов разработанного модуля ПО из состава ПАИК.

Структура ПО представлена на рисунке 53. Она позволяет повторно использовать его блоки в различных модулях. Это возможно благодаря применению принципов ООП: абстракций, полиморфизма и наследования. Ниже рассмотрим все модули, входящие в комплекс.

Модуль работы с лабораторным оборудованием выполнен так, чтобы изменения в нём не требовали коррекций в алгоритмах обработки, визуализации и управления. Этот модуль включает в себя набор интерфейсов для работы с конкретным типом приборов — блоками питания, осциллографами, генераторами прямоугольных импульсов — а также реализации этих интерфейсов для каждой модели используемого оборудования. Если необходимо добавить код для работы с новым прибором, достаточно реализовать интерфейс, используя документацию производителя. Затем его можно применять в модулях измерения и управления, не меняя исходный код алгоритмов.

Для наглядности рассмотрим блок-схему ПАИК. В примере на рисунке 52 ПО взаимодействует с генератором запуска, блоком питания и осциллографом. При помощи модуля управления меняются задержки запускающих прямоугольных импульсов и напряжения на БП. Хотя в этом примере используется лишь один генератор запускающих импульсов и БП, в других измерительных схемах может требоваться несколько приборов одного типа. Например, в схеме с пятипортовым сумматором Уилкинсона (описанным в разделе 3.3) используется четыре источника питания и два генератора. В ПО ПАИК в таком случае достаточно создать необходимое количество экземпляров классов управления для используемых в стенде приборов. Эти объекты будут отличаться только уникальным IP-адресом для общения в локальной сети. Затем инициализированные приборы можно использовать в алгоритмах измерения и управления.

Модуль получения данных отвечает за приём информации от измерительного оборудования: осциллографов, амперметров и вольтметров. Комплекс позволяет усреднять данные, используя для этого как возможности прибора, так и вычислительные мощности ЭВМ. Полученная информация может

храниться в оперативной памяти или записываться на жесткий диск в табличном формате CSV (Comma-Separated Values).

Модуль позволяет преобразовать отсчеты в универсальный формат данных *numpy.array* из библиотеки NumPy [46].

Модуль обработки характеристик СКИ принимает на вход массивы отсчетов импульса. Эта часть ПО анализирует характеристики СКИ. Вычисляет амплитуду и размах для видеоимпульсов разного типа: колокола, моноцикла и дуплета. Может рассчитывать длительность СКИ по заданному уровню от максимального значения. Оценивает относительный уровень послеимпульсных искажений.

При физической реализации генераторов используются схемы с ДНЗ, микрополосковые линии задержки, дифференциаторы, оптические методы и т. д. Импульсы, сформированные таким образом, отличаются от идеальных Гауссовских кривых, рассчитанных по формулам, поэтому их называют квазигауссовскими. Как правило, в статьях оценивают отклонения какого-то из параметров импульса, например, форму послеимпульсных искажений. Однако это не в полной мере описывает различие. Иногда полезно совокупно оценивать «звон», скорость спада фронтов и форму пика СКИ. Для более полного анализа формы импульсов в работе предложено использовать методику поточечной оценки. Для этого в состав ПО ПАИК включен широко используемый в области анализа сигналов и их спектров алгоритм вычисления нормированной среднеквадратической ошибки, в зарубежной литературе используют термин Normalized mean square error (NMSE) [82, 83]. С помощью этого алгоритма вычисляют разницу между истинным значением y и полученным на практике x . Нормировка необходима, чтобы получить безразмерную, в отличие от MSE, величину. Значение NMSE, равное 0, означает идеальное соответствие прогноза и фактических данных. Коэффициент вычисляется по формуле:

$$NMSE = \frac{\sum_i (x_i - y_i)^2}{N} * \sum_i (x_i)^2 \quad (38)$$

Последовательность работы алгоритма может быть описана следующим образом. В первую очередь задается форма анализируемого импульса: колокол, моноцикл или дуплет. Затем необходимо получить математическое представление импульса с такими же характеристиками, как и у экспериментального. В качестве входных данных используется массив отсчетов сигнала, измеряемого осциллографом. Используя эти данные, определим длительность по полувысоте и амплитуду СКИ. Используем эти параметры для вычислений массивов точек колокольного видеоимпульса (39), моноцикла (40) и для дуплета (41).

$$S(t) = A e^{-4 \ln(2) \frac{(t-\Delta t)^2}{\tau^2}}, \quad (39)$$

$$S(t) = A \sqrt{2e} \frac{(t - \Delta t)}{\tau} e^{\left(0.5 - \frac{(t-\Delta t)^2}{\tau^2}\right)}, \quad (40)$$

$$S(t) = A(-\tau + 2(t - \Delta t)^2) e^{\left(-\frac{(t - \Delta t)^2}{\tau}\right)}, \quad (41)$$

где:

A - амплитуда (размах для моноцикла и дуплета) импульса;

Δt - сдвиг импульса во времени относительно начала координат;

τ - длительность импульса по полувысоте для колокольного импульса; от максимального значения до минимального для моноцикла; от пика до пика для дуплета.

Затем рассчитанные (прогнозные) и экспериментальные векторы отсчетов используются для расчета NMSE. Результатом его работы является числовой коэффициент, который может быть пересчитан в процентах или децибелах.

Полученные данные могут быть выведены на экран или сохранены в файл отчета на жесткий диск.

Модуль визуализации ПАИК позволяет представить анализируемые данные в виде графиков. Такое представление позволяет упростить понимание характеристик, а также подготовить иллюстрации для публикаций в периодических изданиях и конференциях. Модуль позволяет выводить графики на экран ЭВМ, а также сохранять их в растровых и векторных форматах на жесткий диск. Для визуализации используется библиотека Matplotlib. Модуль позволяет настраивать внешнее представление графиков (шрифты, цвета и т. д.) в соответствии с требованиями к оформлению. С его помощью происходит сохранение иллюстраций в заданном формате.

Модуль управления формой СКИ содержит алгоритм выбора задержек запускающих импульсов. Используемые в диссертации лабораторные генераторы имеют возможность программного управления. Это свойство позволяет менять задержки сигналов на входе сумматора, а следовательно, задавать форму результирующего видеоимпульса на выходе формирователей. Описанный подход продемонстрирован в экспериментах с генератором колокольных СКИ с двумя каналами управления (раздел 2.3) и в опытах с формирователем с сумматором (раздел 3.4).

Приведем пример работы алгоритма, управляющего работой формирователя СКИ. На первом шаге алгоритм анализирует характеристики импульсов — длительности и амплитуды. На втором шаге программа получает входные данные от оператора или другого алгоритма. На третьем шаге, используя полученные данные, модуль рассчитывает задержки для формирования импульсов разных форм. На четвертом шаге ПО устанавливает режим работы лабораторных приборов, согласно которому формируются вычисленные задержки. Реализуя этот подход, ПАИК позволяет сформировать последовательность квазимоноциклов Гаусса разной полярности. Конкретные примеры работы этого модуля с экспериментальными подтверждениями будут рассмотрены в отдельном разделе этой главы.

Реализованный ПАИК и ПО, входящее в его состав, позволяют автоматизировать множество процессов измерений и экспериментов, связанных с формированием СКИ. Кроме того, предложены базовые алгоритмы управления для формирования видеоимпульсов разных форм. Эти методы могут быть применены для модуляции последовательности СШП-видеоимпульсов. Гибкая структура ПО позволяет добавлять в его состав новые модули и алгоритмы измерений. Далее будет описано несколько практических примеров применения ПАИК для вычисления характеристик генераторов СКИ и управления их формой.

4.2 Измерение характеристик генераторов и параметров СКИ

Одна из основных задач этой диссертационной работы — изучение методов управления формой колокольных импульсов. Менять форму можно, регулируя токи инъекции и экстракции заряда в ДНЗ. Один из способов контроля объёма заряда был показан в главе 1 и предполагает управление временем накопления и рассасывания. Ещё один подход к управлению формой — задавать напряжения питания схемы, меняя тем самым силу токов инъекции и экстракции. Предложенный подход имеет свои недостатки. Так, при изменении силы тока, инжектирующего заряд в ДНЗ, меняется как форма импульса, так и момент его формирования. Это усложняет применение такого подхода вместе с сумматорами в схеме управляемого генератора СКИ. Итерационный алгоритм подбора напряжений питания в нашем случае не подойдет, так как внесет в последовательность лишние видеоимпульсы, не несущие информации. Для решения этой проблемы предлагается провести предварительные измерения (будем называть этот процесс калибровкой) при помощи ПАИК. С их помощью получим матрицы характеристик импульсов (амплитуды, длительности, момента формирования) в зависимости от напряжений питания. Затем полученные данные будем применять при выборе требуемой формы импульса и задавать необходимые напряжения питания схемы.

В процессе калибровки необходимо измерять параметры импульсов при N^2 комбинаций напряжений питания. То есть количество измерений будет квадратично расти в зависимости от желаемого шага изменения напряжений. ПАИК позволяет автоматизировать этот процесс при помощи управляемых БП и алгоритмов, входящих в модуль анализа данных. Матрица напряжений питания в таком эксперименте состоит из N значений, задающих ток инъекции, и такого же количества напряжений для экстракции заряда. Оператор может задавать диапазоны напряжений и шаг в сетке. Затем модуль ПО последовательно переберёт все заданные значения в матрице. Команды изменения напряжений будут направлены в управляемый блок питания. При помощи осциллографа фиксируются осциллограммы импульсов для разных напряжений питания, затем массивы точек передаются на ЭВМ. При помощи ПО вычисляются характеристики СКИ. Полученные результаты могут быть представлены в виде графиков для анализа зависимостей и сохранены в файл.

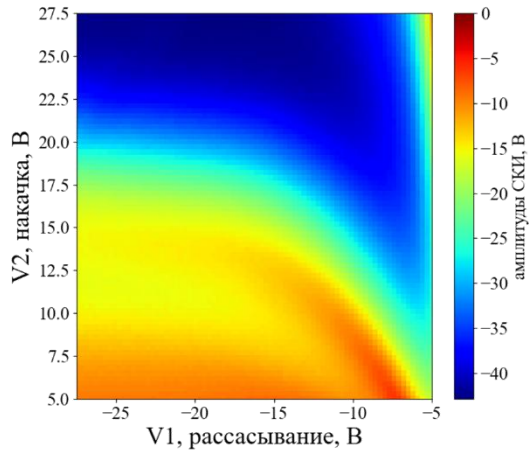
Для выбора напряжений питания в алгоритме управления формой задействуют полученные калибровочные данные. Используя заранее известные характеристики, модуль может формировать последовательность видеоимпульсов разной формы. Эта методика позволяет организовать разные виды модуляции, например, амплитудно-импульсную, широтно-импульсную и др.

Для подтверждения работы алгоритма был проведен натурный эксперимент. Измерительный стенд был собран согласно блок-схеме на рисунке 52. В опыте использовался управляемый БП Rigol DP832A. В качестве генератора запускающих импульсов был применен Agilent 81104A. Выход генератора СКИ через аттенюаторы с общим ослаблением в 46 дБ был подключен к осциллографу Agilent DCA-X 8600D. Был выбран диапазон измерений перестройки напряжений от 5 до 28 В с шагом сетки 0.25 В. Эксперимент был проведен для двух схем генераторов СКИ с разной полярностью. Всего было проведено 17 тысяч измерений. Из-за высокого количества измерений без применения ПАИК потребовалось бы кратно больше времени для проведения такого эксперимента, если бы управление оборудованием происходило вручную.

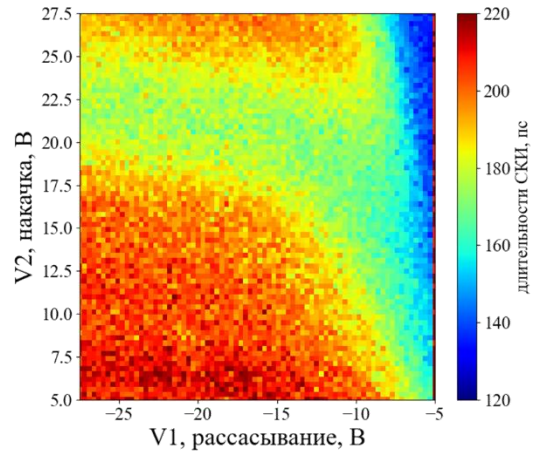
Эксперимент состоял из следующих основных шагов. Перед началом обработки данных ПО включает выход БП, задавая начальное напряжение инжекции и экстракции: 5 В соответственно. Затем алгоритм начинает работу в цикле, перебирая значения матрицы напряжений. Каждый шаг цикла состоял из следующих этапов. При помощи SCPI команды задается очередное значение напряжений для БП. Сформированный импульс поступает на Agilent DCA-X 8600D. Массив точек передается в оперативную память ЭВМ. Алгоритм вычисляет характеристики импульса и сохраняет их в калибровочный массив. Затем цикл повторялся для нового значения пары напряжений.

После завершения серии измерений полученные данные передавались в модуль визуализации. С его помощью были построены трёхмерные графики. Для удобства третье измерение на них отображено при помощи цветового градиента. Полученные зависимости для импульсов разных полярностей приведены на рисунке 54. Подобный подход позволяет четко выделить области напряжений, при которых формирование импульса фактически невозможно. Показано, что при помощи изменения напряжений питания можно задавать силу тока инжекции и экстракции заряда, что, в свою очередь, позволяет менять форму видеоимпульса. Было также подтверждено, что при измерениях необходимо фиксировать момент формирования импульса, так как он также меняется при изменении токов. Это также необходимо учитывать для работы алгоритмов, формирующих последовательность СКИ.

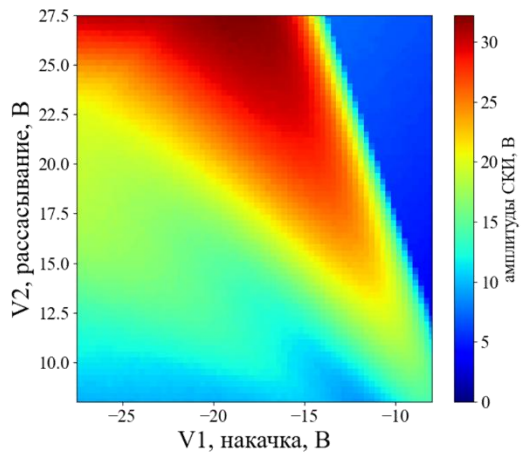
Ещё одной возможностью измерительного модуля ПАИК является оценка сходства двух разных импульсов при помощи алгоритма NMSE. Сравнение можно проводить как между двумя заранее известными массивами точек, так и с массивом полученных по формулам для гауссовских кривых. В последнем случае сначала задается тип СКИ. Модуль способен обрабатывать колокольные импульсы, моноциклы и дуплеты. Полярность СКИ алгоритм способен определить автоматически. Затем вычисляется амплитуда (размах для моноциклов и дуплетов), и длительность СКИ.



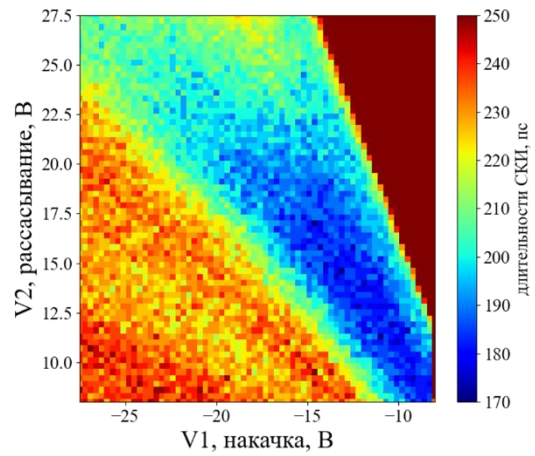
(а)



(б)



(в)



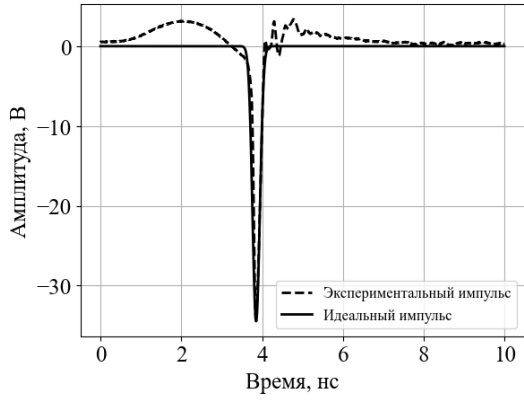
(г)

Рис. 54 - Зависимость параметров SKI от напряжений накачки и рассасывания: амплитуд (а) и длительностей (б) для отрицательного импульса, амплитуд (в) и длительностей (г) для положительного импульса.

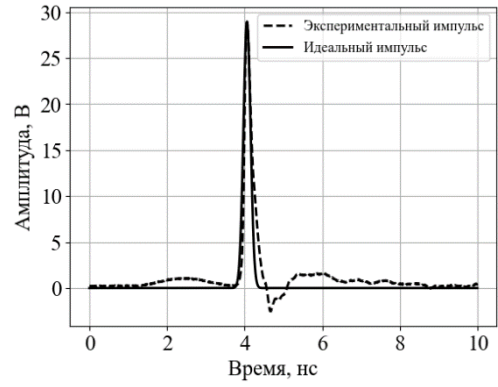
На следующем шаге с помощью аналитических формул формируется массив точек, в зависимости от типа импульса применяют выражения (39)-(41). Массивы экспериментального и рассчитанного по формуле сигналов передаются для вычисления нормированного коэффициента среднеквадратической ошибки. Для этого используется формула (38).

Для демонстрации работы алгоритмы коэффициента вычисления были проведены для всех вышеперечисленных форм СКИ. Изображение квазигауссовских импульсов колокольной формы разной полярности приведено на рисунке 55 (а, б). Аналогичные изображения для квазимоноциклов Гаусса приведены на рисунке 55 (в, г), для дуплетов на 55 (д, е). Изображения демонстрируют способность алгоритма определять характеристики видеоимпульсов — полярность, длительность и амплитуду, а затем использовать их для вычисления вектора точек по формулам. Вычисленные значения коэффициентов NMSE для видеоимпульсов: минус 9.98 дБ для отрицательного колокольного; минус 10.1 дБ для положительного; минус 8.98 дБ для квазимоноцикла; минус 6.64 дБ для квазимоноцикла с противоположной полярностью; минус 9.7 дБ для квазидуплета; 9.1 дБ для дуплета противоположенной полярности.

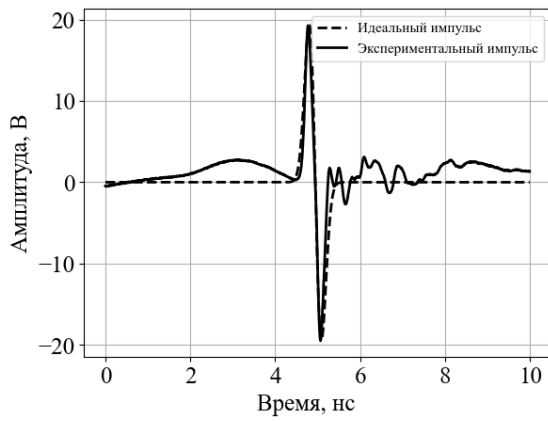
В качестве источника анализируемых сигналов можно использовать данные, полученные из моделирования, или осциллограммы, сформированные экспериментальными макетами генераторов. Также можно проводить сравнение с результатами из научных публикаций. Для формирования массива точек по изображениям осциллограмм видеоимпульсов, приведенным в статьях и книгах, можно использовать программу WebPlotDigitizer [78]. Из приведенных примеров видно, что ПАИК позволяет автоматизировать большое количество измерений характеристик СКИ. Методика сравнения импульсов с разных источников позволяет оценить совпадения осциллограмм СКИ или сопоставить данные с идеальными гауссовскими кривыми, а также результатами из экспериментов и исследований, встречающихся в литературе. Подобный способ позволяет верифицировать данные моделирования и эксперимента.



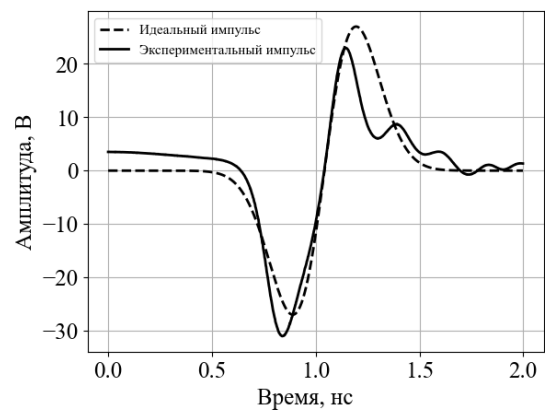
(а)



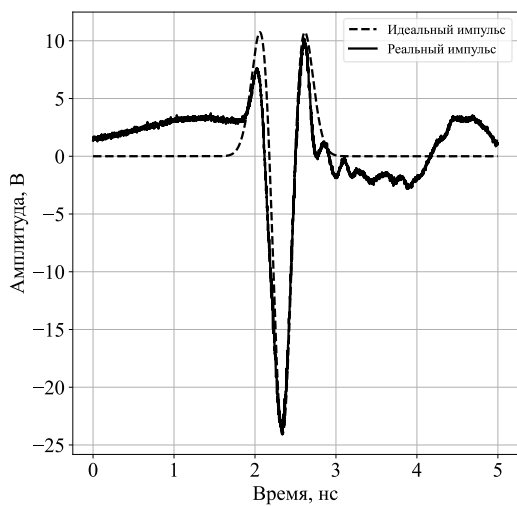
(б)



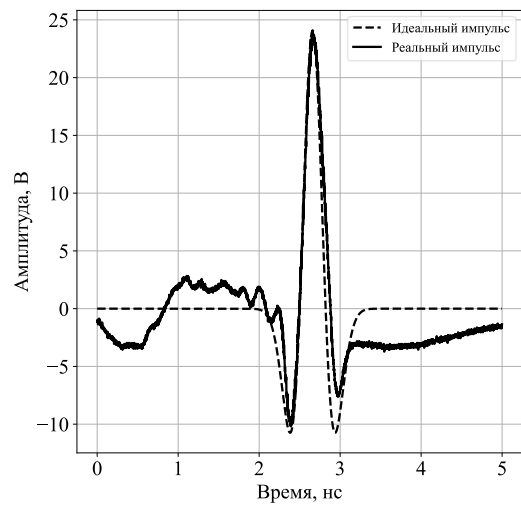
(в)



(г)



д)



е)

Рис. 55 – Осциллограммы экспериментальных импульсов и полученных по формулам. Колокольной формы (а, б), моноциклы (в, г) и дуплеты (д, е).

4.3 Алгоритмы управления формой СКИ

В состав программного обеспечения ПАИК входит модуль управления генераторами СКИ. Реализованные в нём алгоритмы позволяют формировать видеоимпульсы заданных форм. Благодаря этому становится возможным организовать модуляцию последовательности импульсов.

Блок-схема ПАИК для работы в таком режиме изображена на рисунке 56. В состав управляемого генератора входят два формирователя СКИ колокольной формы разной полярности и трёхпортовый сумматор Уилкинсона. Источниками постоянного тока для питания генератора служат двухканальные БП №1 и №2. В эксперименте применялись модели Rigol DP832A. Управление задержками запуска происходит при помощи генераторов прямоугольных импульсов Agilent 81104A. Эти лабораторные генераторы позволяют управлять процессами инжекции и экстракции заряда в ДНЗ. С их помощью задается момент формирования колокольных импульсов и их форма, что было показано ранее в диссертационной работе. Выход формирователя моноциклов подключен к осциллографу Agilent DCA-X 8600D через аттенюаторы с общим ослаблением 46 дБ. Лабораторные генераторы соединены между собой и с осциллографом общей линией синхронизации.

Алгоритм управления формой работает следующим образом. На первом шаге измеряются моменты формирования и длительности колокольных импульсов. Включается БП, подключенный к генератору СКИ положительной полярности. Затем включается генератор запускающего импульса. Начинает работу схема формирования с ДНЗ. Колокольный импульс с выхода генератора через сумматор поступает на вход осциллографа. Полученный вектор точек, описывающий СКИ, поступает из осциллографа в оперативную память ЭВМ. С помощью полученных данных вычисляется положение максимального значения колокольного импульса. По уровню 0.1 от максимума вычисляется длительность СКИ. Затем БП и запускающий генератор выключаются.

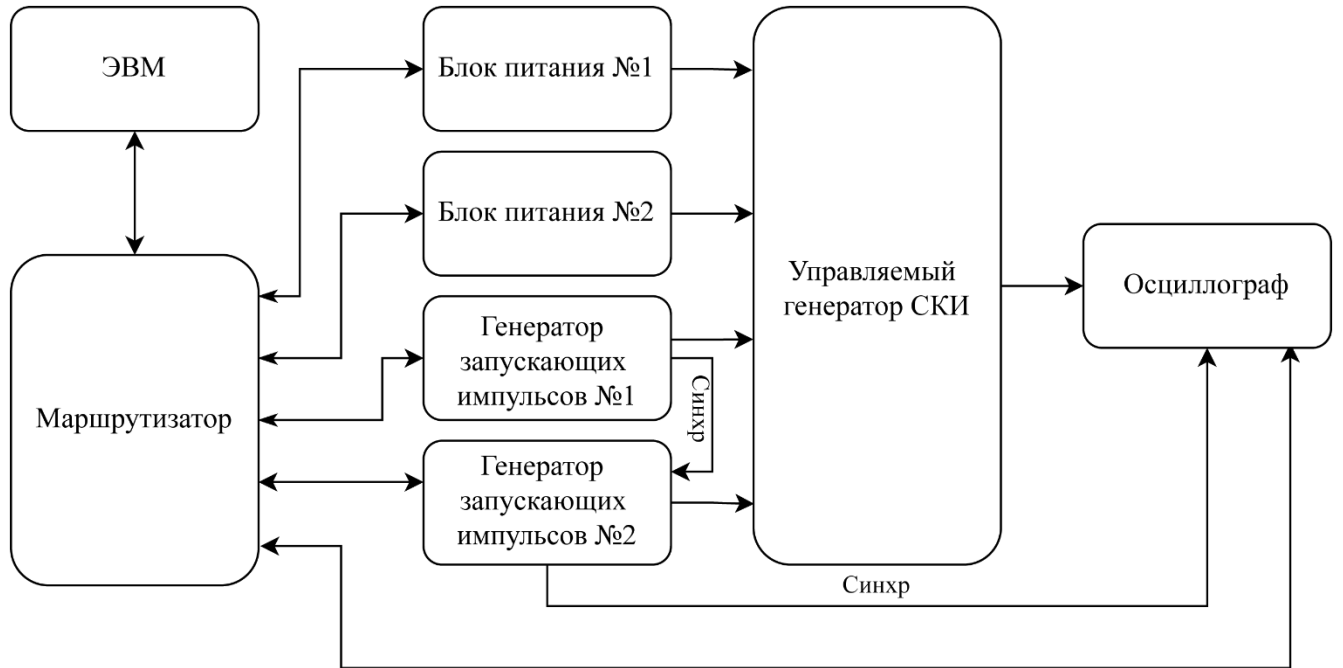


Рис. 56 – Блок-схема ПАИК для работы с управляемым генератором СКИ гауссовских форм.

Включаются управляющий БП и тракт формирования отрицательного видеоимпульса. Аналогичное измерение амплитуды и длительности проводится для второго генератора СКИ. При помощи полученных характеристик вычисляются задержки запускающих генераторов — так, чтобы на вход сумматора поступал вначале импульс одной полярности, затем с задержкой, равной его длительности, импульс другой полярности. Собранные сведения позволяют формировать моноциклы с разной фазой. Для этого достаточно определить задержки запусков. Кроме того, можно корректировать задержки между отдельными моноциклами в последовательности. Допустимо также менять общую длительность моноцикла, используя подход, описанный в разделе 3.2. Включая и выключая питания отдельных генераторов с ДНЗ, можно получить последовательность колокольных сигналов разных полярностей. Дополнительно можно корректировать форму отдельных частей моноцикла, меняя напряжения питания, как было продемонстрировано в разделе 4.2. Описанные возможности позволяют организовать модуляцию последовательности видеоимпульсов, чередуя различные полярности и формы видеоимпульсов.

Для демонстрации работы алгоритма был проведен эксперимент, в котором при помощи ПАИК были сформированы моноциклы разной полярности. Зафиксированные с помощью осциллографа СКИ изображены на рисунке 57. Так продемонстрирована возможность ПАИК по управлению формой импульса на выходе генератора. Подобный алгоритм взаимодействия также может быть применен для генератора с пятипортовым сумматором. Для такого формирователя потребуются дополнительные БП и источники запускающего импульса. Однако с его помощью можно будет формировать последовательность импульсов колокольной формы, моноциклов и дуплетов, а также чередовать типы и менять полярность СКИ. Это дает ещё больше возможностей для организации модуляции сигнала. В распоряжении автора работы было недостаточно приборов для управления четырьмя генераторами колокольного СКИ. Поэтому такой натурный эксперимент не был проведен.

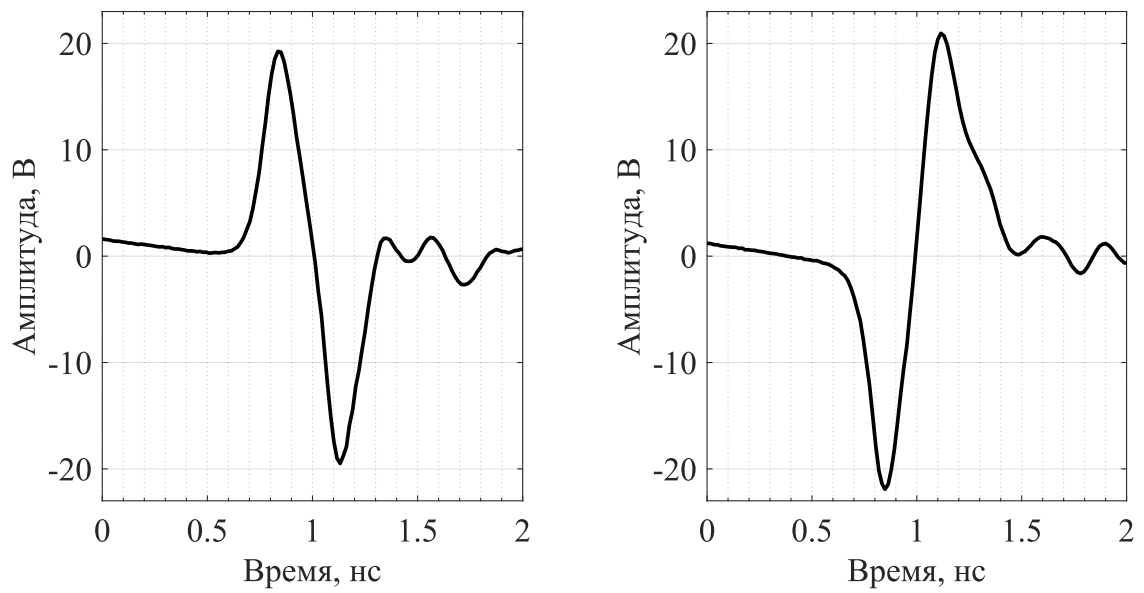


Рис. 57 – Осциллограммы моноциклов Гаусса разной фазы.

Выводы

В целях автоматизации процесса измерений в работе реализован программно-аппаратный измерительный комплекс. Аппаратная часть комплекса позволяет управлять лабораторными генераторами, источниками питания и осциллографом. Программное обеспечение, входящее в состав ПАИК, позволяет автоматизировать измерения параметров формирователей СКИ. ПО в составе ПАИК реализовано согласно принципам модульности, что позволяет быстро реализовывать управление новыми приборами и добавлять алгоритмы измерения видеоимпульсов и управления формирователями СКИ.

Комплекс позволил автоматизировать измерения зависимости формы импульсов от напряжений питания. В ходе экспериментов была обнаружена зависимость формы видеоимпульсов от сил токов инжекции и экстракции заряда. Полученные данные могут быть использованы для формирования импульсов заданной формы.

Измерительный модуль ПАИК также позволяет оценивать характеристики СКИ, измерять амплитуды и длительности импульсов разных форм. При помощи алгоритма NMSE ПО комплекса позволяет сравнивать импульсы между собой, получая численную оценку их идентичности. Модуль позволяет сопоставлять импульсы, полученные при моделировании, разных экспериментах, либо сформированные по формулам.

Алгоритм управления позволяет формировать моноциклы разной полярности, используя формирователь СКИ в составе с сумматором СШП-сигналов. В основе алгоритма лежит подход к сложению СКИ, предложенный ранее в диссертационной работе. Его реализация может быть использована для организации управления для формирователя модулированной последовательности видеоимпульсов гауссовских форм.

Заключение

После проведения теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты.

Рассмотрен одноканальный подход к управлению объемом заряда в ДНЗ. При помощи моделирования выявлены недостатки такой методики, связанные с невозможностью управления объемом накопленного заряда, а также высоким уровнем послеимпульсных искажений. Предложена методика независимого изменения длительности инжекции и начала момента экстракции заряда диода, опирающаяся на двухканальную схему управления. Проведено моделирование генератором СКИ с двухканальной схемой управления. Продемонстрирована возможность управления объемом заряда за счет изменения длительности импульса накачки. Приведены зависимости формы импульса на выходе формирователя от длительности процесса инжекции и начального момента экстракции. Проведены эксперименты с натурным макетом, подтверждающие работоспособность методики и результаты моделирования. В ходе экспериментов продемонстрирована возможность задавать форму квазигауссовского импульса. Диапазон перестройки по амплитуде составил 44%, по длительности 97%. В осциллограмме, сформированной при помощи генератора с двумя каналами управления СКИ, зафиксирован относительный уровень послеимпульсных искажений, равный 4,2%, что является низким показателем для генераторов такого типа.

В третьей главе описаны преимущества использования импульсов формы первой и второй производных от гауссовской кривой: моноцикла и дуплета. Проведено моделирование различных схем для формирования моноциклов. Выявлены недостатки известных схем, не позволяющие управлять формой сигнала. Предложен метод формирования моноцикла и дуплета при помощи сложения нескольких однополярных импульсов. Произведен расчет параметров многозвенной конструкции сумматора Уилкинсона, что позволило расширить

рабочую полосу устройства и использовать его для сложения СШП-сигналов. Проведены эксперименты с натурным образцом сумматора, подтверждающие возможность сложения СКИ. Проведена серия экспериментов по формированию импульсов формы квазимоноциклов и квазидуплета разных полярностей. При помощи изменения задержек входных сигналов формирователь позволил менять длительности моноцикла в диапазон перестройки, равный 60%.

В рамках работы разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий измерять параметры видеоимпульсов: амплитуду, длительность, послеимпульсные искажения. Реализован алгоритм расчета коэффициента среднеквадратической ошибки для сравнения двух осциллограмм импульсов одного типа. С помощью ПАИК исследована зависимость формы импульсов от напряжений питания. В комплексе реализован алгоритм формирования квазимоноциклов заданной формы при помощи управления задержками входных сигналов в формирователе с сумматором.

Литература

1. FCC First Report and Order 02-48 / In the matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems. // April 2002.
2. ECC Decision (06)04 / On the harmonized conditions for devices using Ultra-Wideband (UWB) technology in bands below 10.6 GHz. // July 2007.
3. Wilkinson, E. J. An N-way Power Divider // IRE Transaction on Microwave Theory and Techniques, №8, p. 116-118, Jan. 1960.
4. Jeongwoo, H. Tunable Monocycle Pulse Generator Using Switch Controlled delay Line and Tunable RC Network for UWB Systems / Jeongwoo H., Cuong H., Cam N. // report conference «Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)» — 2010, IEEE.
5. Qi Yin. Design of a High-Performance Ultra-Wideband Monocycle Pulse Generator. / Zhongming Pan, Zhuohang Zhang // 2nd International Conference on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018) — 2018 — volume 149.
6. Ильюшенко, В. И. Пикосекундная импульсная техника / В. Н. Ильюшенко, Б. И. Авдоченко, В. Ю. Баранов и др. // Энергоатомиздат, 1993 г. 368 с.
7. Белкин, В. С. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе / В. С. Белкин, Г. И. Шульженко. – Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1990. – 36 с.
8. Белкин, В. С. Формирователи высоковольтных наносекундных импульсов на серийных диодах / Белкин В. С., Марин О. Ю., Шульженко Г. И. // Приборы и техника эксперимента, 1992. – № 6. – с. 120–124.
9. Бобрешов, А. М. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / Бобрешов А. М., Степкин В. А., Китаев Ю. И., Усков Г. К. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2011. - Т14. №3. - С. 103.

10. Bobreshov, A. M. Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator with High Amplitude and Low Ringing Level / A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin, G. K. Uskov // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – Nov. 2017. Vol 27. – P. 1013–1015.

11. Бобрешов, А. М. Генератор сверхкоротких импульсов с электронным управлением длительностью / А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Успехи современной радиоэлектроники №11, 2015г. – С.24-28.

12. Бобрешов, А. М. Генератор сверхширокополосных импульсных сигналов субнаносекундной длительности с высокой частотой повторения / А. М. Бобрешов, Ю. И. Китаев, В. А. Степкин, И. С. Коровченко, Г. К. Усков // 66 Научная сессия, посвященная Дню радио, 11-12 мая 2011 г., Москва: труды. – М., 2011. – С. 340-342.

13. MAVR-044769-12790T Datasheet / Macom.com – URL: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAVR-044769-12790T> (04.12.2022).

14. Bobreshov, A. M. Improvement of Ultrashort Pulses by Serial Connection of Step Recovery Diodes / A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, A. D. Ryazantsev, V. A. Stepkin and G. K. Uskov // IEEE Microwave and Wireless Components Letters - Feb. 2021, vol. 31, № 2, pp. 204-206.

15. Kyhl, J. An Advanced PIN-diode Model. / Kyhl J., Andersson M. // Microwave Journal. – 2005. – № 48. – P.206-212.

16. PIN_diode (PIN Diode). Help / keysight.com – [Электронный ресурс]: <https://edadocs.software.keysight.com/pages/viewpage.action?pageId=5918745> (27.05.2023).

17. Moll, J. L. Physical modeling of the step recovery diode for pulse and harmonic generation circuits / J. L. Moll, S. A. Hamilton // Proceedings of the IEEE. – 1969. – № 7. – P. 1250-125. – July.

18. Step-Recovery Diode Model: STEPRD help-page / awrcorp.com – [Электронный ресурс]: <https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Elements/STEPRD.htm> (дата обращения: 04.12.2022).

19. Protiva, P. High power monocycle pulse generator for through-the-wall radar transmitter / Pavel Protiva, Jan Mrkvica, Jan Machác // Asia Pacific Microwave Conference. – 2009. – P. 7-10 – December.
20. Taub J. J., A Note on N-Way Hybrid Power Dividers / J. J. Taub, B. Fitzgerald// IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1964. – №12. – P. 260-261. – March.
21. Zhang, H. A novel UWB pulse generator / H. Zhang, X. Liu, N. Li, T. A. Gulliver // Proceedings of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. – 2011. – P. 691-695.
22. Kikkawa, T. Gaussian Monocycle Pulse Transmitter Using 0.18 μm CMOS Technology with On-Chip Integrated Antennas for Inter-Chip UWB Communication / T. Kikkawa, P. K. Saha, N. Sasaki, K. Kimoto // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2008. – №5ю – P. 1303-1312.
23. Wang, Q. Switchable optical UWB monocycle and doublet generation using a reconfigurable photonic microwave delay-line filter / Qing Wang, Jianping Yao // Opt. Express. – 2007. – №22. – P. 14667-14672.
24. Öztürk, H. High Fidelity Gaussian Monocycle Generation Using Microstrip Lines / H. Öztürk, K. Yeğın and H. Nazlı // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2014. – №10. – P. 722-724.
25. Jeongwoo, H. A new ultra-wideband, ultra-short monocycle pulse generator with reduced ringing / Jeongwoo Han and Cam Nguyen // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2002. №6. – P. 206–208.
26. Zito, F. UWB CMOS Monocycle Pulse Generator / F. Zito, D. Pepe // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2010. - №10. - P. 2654-2664.
27. Rahman, M. A. Reconfigurable Picosecond Pulse Generator in Non-linear Transmission Line for Impulse Radar Ultrawideband Applications / M. Rahman, K. Wu. // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2022. – №5. – P. 448-451.
28. Рязанцев, А. Д. Совершенствование характеристик генераторов на основе диодов с накоплением заряда: дис. канд. физ. мат. наук: 1.3.4 / Рязанцев Александр Дмитриевич. – Воронеж. 2022. – 136 с.

29. Sisma, O. UWB Radar: Vision through a wall / Ondrej Sisma, Alain Gague, Christophe Liebe, Jean-Marc Ogier // *Personal Wireless Communications*. – 2007. – p.241-251.
30. Taylor, J. D. Ultra-wideband radar technology / James D. Taylor – USA: CRC Press LLC, 2000. – 421 p.
31. Skolnik, M. I. Radar Handbook / Merrill I. Skolnik – 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2008. – 1352 p.
32. Oloumi, D. Design of Pulse Characteristics for Near-Field UWB-SAR Imaging / Daniel Oloumi, Jui-Wen Ting, Karumudi Rambabu. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2016. – Vol. 64., №8. – p. 2684-2693.
33. HF / VHF power LDMOS transistor BLF574 Datasheet / Ampleon.com – [Электронный ресурс]: <https://www.ampleon.com/products/general-purpose-wideband/50-v/BLF574.html> (дата обращения: 30.05.2023).
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Смусева, К. В. Расширение частотного диапазона сумматора Уилкинсона для формирования сверхкоротких импульсов / К. В. Смусева, А. Е. Елфимов, Г. К. Усков, А. С. Величкина // *Радиолокация, навигация, связь:*

Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции – 2022 г. – №4. – С. 315–322. – 29 сентября.

38. 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.

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

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. PyVISA: Control your instruments with Python – [Электронный ресурс]: <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 16.01.2023).

46. NumPy documentation – [Электронный ресурс]: <https://numpy.org/doc/1.24> (дата обращения: 16.01.2023).

47. Matplotlib 3.6.3 documentation – [Электронный ресурс]: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения: 16.01.2023).

48. Zhou Yuan. Ultra-low-power UWB-RFID system for precise location-aware applications. / Zhou Yuan, Law Choi Look, Xia, Jingjing // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). – 2012 – P. 154–158.

49. Kshetrimayum, R. S. An introduction to UWB communication systems / R. S. Kshetrimayum // IEEE Potentials. – 2009 – № 2. – P. 9–13. – March-April 2009.

50. Yu, Y. UWB Monocycle Generation and Bi-Phase Modulation Based on Mach–Zehnder Modulator and Semiconductor Optical Amplifier / Y. Yu, J. Dong, X. Li and X. Zhang // IEEE Photonics Journalю – 2012 – №2 – P. 327-339. – April.

51. Rius, M. Generation of an UWB monocycle employing cross-phase modulation in a SOA-MZ interferometerю / M. Rius, J. Mora, J. Capmany, V. Moreno and M. A. Muriel. // IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) – 2013 – P. 194-197 – Alexandria, VA, USA.

52. Hassan, K. QPSK Modulation Scheme Based on Orthogonal Gaussian Pulses for IR-UWB Communication Systems / K. Hassan, G. Vahid // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 2019. – №1.

53. Amiri, IS R. Rashed Effects of Order Super Gaussian Pulses on the Performance of High Data Rate Optical Fiber Channel in the Presence of Self Phase Modulation / Amiri IS Rashed, Ahmed Nabih Zaki, P. Yupapin // Journal of Optical Communications. – 2023 Vol. 44, №1. – P. 117-123.

54. Feghhi, R. Design of a Low-Cost UWB Time-Domain Radar System for Subcentimeter Image Resolution / R. Feghhi, R. S. C. Winter, F. M. Sabzevari,

K. Rambabu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2022. – Vol. 70, №7. – P. 3617-3628. – July.

55. Omi, A. I. A New Analytical Design Methodology for a Three-Section Wideband Wilkinson Power Divider / A. I. Omi, Z. N. Zafar, H. Al-Shakhori, A. N. Savage, R. Islam, M. A. Maktoomi, C. Zakzewski, P. Sekhar. // Electronics. – 2021. – № 10. – P.2332.

56. Matthaei, G. L. Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures. / G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones // McGraw-Hill. – 1964. – P. 526.

57. Носов, Ю. Р. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / С. А. Еремин, О. К. Мокеев, Ю. Р. Носов. – М.: Издательство «Советское радио», 1966. – 152 с.

58. Носов, Ю. Р. Полупроводниковые импульсные диоды / Ю. Р. Носов. – М.: Издательство «Советское радио», 1965. – 224 с.

59. Maktoomi, M. A. On the Dual-Frequency Impedance/Admittance Characteristic of Multisection Commensurate Transmission Line, in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 64, no. 6, pp. 665-669, June 2017, doi: 10.1109/TCSII.2016.2604425.

60. Pozar, D. M. Microwave Engineering // 4th JohnWiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 2012.

61. Браммер, Ю. А. Импульсные и цифровые устройства / Ю. А. Браммер, И. Н. Пащук // Высшая школа, 2003 г. 351 с.

62. Дмитриев, В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB). Часть 1. / В. Дмитриев // Компоненты и технологии. – 2003. – №9. – С. 1–5.

63. Дмитриев, В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB). Часть 2. / В. Дмитриев // Компоненты и технологии – 2004. – №1. – С. 1-4.

64. Wang. A Novel Wideband Wilkinson Pulse Combiner with Enhanced Low Frequency Isolation / Wang, Zitong & Wu, Qi & Su, Donglin // Chinese Journal of Electronics. 2022. PP. 127-133.
65. Кислинский, В. Д. Применение вейвлетов и функций Эрмита для моделирования СШП-импульсов под требования маски ГКРЧ / Кислинский В. Д., Грахова Е. П., Абдрахманова Г. И. // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т3. №4. – с. 391–398.
66. Giuseppe, T. F. Orthogonal Hermite Pulses for Ultra-Wideband Impulse Radio Communications / Giuseppe Thadeu Freitas de Abreu, Mitchell C. J., Kohno, R. // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. – 2005. - PP. 369–381.
67. Gomes, J. Hermite based UWB wireless link with simplified receiver / J. Gomes and B. K. Mishra // 2011 World Congress on Information and Communication Technologies, Mumbai, India. – 2011. - PP. 962-967.
68. Sava, V. S. Closed-form expressions for time-correlations of deterministic signals presented by Gauss-Hermite pulses / Sava, V. Savov. // Journal of Applied Electromagnetism. – 2021. Vol 23. – №2. PP. 1–10.
69. Zaman, A. Al. Modulation schemes and pulse shaping in ultra-wideband / A. Al. Zaman, N. Islam // IEEE SoutheastCon 2008, Huntsville, AL, USA. – 2008. PP. 142-146.
70. Gelig, A. Kh. Stability and Oscillations of Nonlinear Pulse-Modulated Systems / Arkadii Kh. Gelig, Alexander N. Churilov // Birkhauser, 1998 г, 264 с.
71. Kshetrimayum, R. S. An introduction to UWB communication systems / R. S Kshetrimayum // IEEE Potentials. – 2009. Vol. 28. №2. – PP. 9-13.
72. Siwiak K. Ultra-wideband Radio Technology / Kazimierz Siwiak, Debra McKeown // Wiley, 2nd Edition, 2004, 264 p.
73. Tas, V. An optimized isolation network for the Wilkinson divider / V. Tas, A. Atalar // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2014. – PP. 3393–3402.
74. Salman, M. Design of miniaturized Wilkinson power divider with higher order harmonic suppression for GSM application // M. Salman, Y. Jang, J. Lim, D. Ahn, S.-M. Han // Progress In Electromagnetics Research C. – 2018. – №85. – PP. 25–34.

75. Mohamed, E. N. A novel compact size Wilkinson power divider with two transmission zeros for enhanced harmonics suppression / E. N. Mohamed, A. G. Sobih, A.M.E. El-Tager // Progress In Electromagnetics Research C. – 2018. – №82. – PP. 67–76.
76. Wang, X. A generalized dual-band Wilkinson power divider with parallel L, C, and R components / X. Wang, I. Sakagami, K. Takahashi, S. Okamura. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – №60. – PP. 952–964.
77. Cohn, S. B. A class of broadband three-port TEM-mode hybrids // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1968 – №16. – PP. 110–116.
78. Rohatgi A. Web Plot Digitizer; 2015. [Электронный ресурс] <https://automeris.io/WebPlotDigitizer.html> (дата обращения: 23.04.2024).
79. Matplotlib 3.6.3 documentation – [Электронный ресурс]: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения: 16.01.2023).
80. Git Book 2.32 documetation - [Электронный ресурс]: <https://git-scm.com/book/ru/v2> (дата обращения: 3.05.2024).
81. Python 3.10.13 documentation [Электронный ресурс]: <https://docs.python.org/3.10/index.html>
82. Poli A., On the use of the normalized mean square error in evaluating dispersion model performance / A. Poli, M. Cirillo // Atmospheric Environment. Part A. General Topics – 1993. - №27. – PP. 2427-2434.
83. Ahmed Q. Z., Normalised Least Mean-Square Aided Decision-Directed Adaptive Detection in Hybrid Direct-Sequence Time-Hopping UWB Systems / Q. Z. Ahmed and L. L. Yang // IEEE 68th Vehicular Technology Conference, Calgary, AB, Canada. – 2008. – PP. 1-5.
84. Staderini E. M. UWB radars in medicine / E. M. Staderini // in IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. - 2002ю - № 17, PP. 13-18.
85. R. Chavez-Santiago R. Ultrawideband Signals in Medicine / R. Chavez-Santiago, I. Balasingham // IEEE Signal Processing Magazine. – 2014. - vol. 31. - №6. - PP. 130-136.

86. Dayang L. UWB in Medicine – High Performance UWB Systems for Biomedical Diagnostics and Short Range Communications / Dayang Lin, Michael Mirbach, Thanawat Thiasiriphet, Jürgen Lindner, Wolfgang Menzel, Hermann Schumacher, Mario Leib and Bernd Schleicher. InTech, 2013. P. 439.

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

88. 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. Величкина, А. А. Кононов, А. Е. Елфимов. — Москва, 2024. — (заявка №2024665275, дата поступления 03.07.2024, опубл. 15.07.2019, Бюл. №7).

89. 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. Величкина, А. А. Кононов, А. Е. Елфимов. — Москва, 2024. — (заявка №2024665273, дата поступления 03.07.2024, опубл. 15.07.2019, Бюл. №7).

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

91. 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. Величкина, А. А. Кононов, А. Е. Елфимов. — Москва, 2024. — (заявка № 2024680205, дата поступления 29.08.2024, опубл. 09.09.2019, Бюл. №7).

92. Елфимов А.Е. Перестраиваемый генератор СКИ с низким уровнем звона / А. Е. Елфимов, А. С. Величкина, 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.

93. 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.

94. 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.

95. 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.