

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

Физический факультет

Кафедра электроники

**Генератор сверхкоротких импульсов с регулировкой времени накачки и
рассасывания заряда**

Научно-исследовательская работа

03.04.03 «Радиофизика»

Системы телекоммуникаций и радиоэлектронной борьбы

Зав. кафедрой	_____	д.ф.-м.н., доцент	Г.К. Усков __.__.20__г.
Обучающийся	_____		А.С. Величкина
Руководитель	_____	д.ф.-м.н., доцент	Г. К. Усков

Воронеж 2023

Содержание

Введение	3
1. Схема генератора СКИ с двумя ВЧ полевыми транзисторами	5
1.1. Модель устройства и изучение запускающего каскада	7
1.2. Экспериментальное исследование	10
1.3. Эксперимент с длительностями запускающих импульсов	13
2. Оценка импульсов	17
Заключение	21
Литература	22

Введение

Квазигауссовские электрические импульсы пикосекундного диапазона длительностей (порядка 10^{-9} - 10^{-12} с) представляют большой интерес для науки и техники. Практические приложения таких импульсов включают высокоточную, подземную и ближнюю радиолокацию [1-3], высокоскоростные системы связи, медицинские исследования [4-5, 7] и высокоточные измерения [1]. Использование подобных сигналов перспективно также в исследованиях в области ядерной физики, физики высоких энергий [8] и физики твердого тела [9, 10]. Основной задачей при формировании пикосекундных импульсов является достижение максимально возможной амплитуды при минимально возможной длительности. От амплитуды импульса зависит дальность его распространения в пространстве, и, следовательно, дальность действия коммуникационных и локационных систем. От длительности импульса зависит ширина его спектра, которая влияет на разрешающую способность локационных систем и пропускная способность систем связи. Одним из широко распространённых вариантов.

Одним из вариантов проектирования генераторов сверхширокополосных квазигауссовских импульсов, позволяющих достичь оптимального отношения длительности импульса к его амплитуде, являются схемы, основанные на использовании токоразмыкающих элементов с быстрым переключением, таких как диоды с накоплением заряда (ДНЗ) [6].

Также большой интерес для практических приложений представляют импульсы сложных форм, такие как дуплет и моноцикл Гаусса. Это объясняется тем, что спектры этих импульсов сосредоточены на более высоких частотах, следовательно, их проще излучать и обрабатывать, они позволяют организовать модуляцию для кодирования информации. Формирование таких импульсов также представляет собой нетривиальную задачу. В частности, эта задача решается с помощью применения конструкций сверхширокополосных сумматоров, таких как конструкции Уилкинсона [11]. Классическая конструкция имеет узкую рабочую полосу, которая может быть

расширена для суммирования сверхкоротких импульсов (СКИ) с помощью каскада четвертьволновых преобразователей [12].

Такой метод хоть и позволяет формировать импульсы в форме моноциклов и дуплетов Гаусса с минимальными потерями в энергии и низким взаимным влиянием, однако он не помогает в борьбе с таким эффектом, как «звон» на выходе генераторов СКИ. Негативное влияние этого эффекта заключается в искажении формы спектров результирующих импульсов, из-за которого теряются полезные для приема и обработки сигналов свойства гауссовых сигналов. Поэтому в ходе выполнения данной работы основным направлением была разработка генератора СКИ с минимальным уровнем звона и максимальной амплитудой. В работе рассмотрен новый подход к проектированию генераторов на основе ДНЗ и исследованы полученные результаты.

1. Схема генератора СКИ с двумя ВЧ полевыми транзисторами

Как известно [2], различные диоды с накоплением заряда, даже выпущенные в одной серии, имеют некоторый разброс параметров, который влияет на переходные процессы в полупроводниковой структуре и, следовательно, на время переключения. Такой разброс может составлять порядка 10%, что существенно влияет на скорости работы диодов.

При последовательном соединении ДНЗ в схемах генерации различное время переключения негативно сказывается на результирующем импульсе. Показано [2], что чем больше разница во временах переключения диодов, тем медленнее спадает задний фронт СКИ, что приводит к увеличению общей длительности импульса и ухудшению его спектральных характеристик. Существуют различные подходы к изменению скорости переходных процессов в ДНЗ в схемах с последовательным включением, включающие измерение переходных характеристик и индивидуальный подбор диодов для каждого генератора [2], использование дополнительных емкостей и резистивных соединений с регулируемым сопротивлением.

Ещё одним негативным эффектом, связанным как с разницей во временах переключения диодов, так и с релаксационными процессами, является эффект звона. Он заключается в искажении заднего фронта СКИ и появлении высокочастотных (ВЧ) колебаний после самого импульса. Это приводит к искажению формы спектров сигналов и потере полезных свойств гауссовых импульсов. Также высокий уровень звона не позволяет использовать СКИ в различных практических приложениях, например, при формировании импульсов сложной формы с помощью сумматоров. Высокий уровень колебаний после фронтов СКИ не позволяет достаточно точно предсказать результат суммирования, так как ВЧ колебания могут сложиться с неизвестными фазами и амплитудами и повлиять на форму самих импульсов.

В данной работе рассматривается методика изменения времен переключения ДНЗ за счет изменения параметров запускающих импульсов. Предлагается регулировать длительности обоих импульсов и времена

задержки между ними. Длительности импульсов регулируют количество накопленного заряда, а задержки между импульсами отвечают за начало и конец переходных процессов.

Чтобы получить возможность управления процессами накопления и рассасывания заряда в структуре ДНЗ за счет параметров запускающего импульса, была разработана схема генератора с двумя полевыми транзисторами (ПТ), предназначенными для работы с высокочастотными сигналами и сигналами с широкой полосой. Принципиальная электрическая схема разработанного устройства приведена на рис. 1.

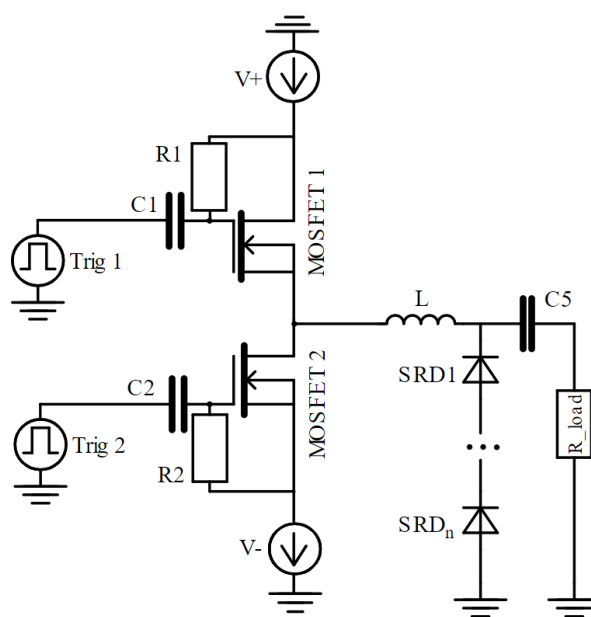


Рис. 2. Схема генератора СКИ с использованием двух транзисторов

Запускающий импульс Trig 1, проходящий через ПТ MOSFET1, отвечает за накопление заряда в структуре ДНЗ, а импульс с Trig 2 за рассасывание заряда соответственно.

Также для обеспечения резких фронтов и малых длительностей СКИ важно сохранить параметры запускающего импульса при прохождении через ПТ. При прохождении через устройства, не подходящие для работы с ВЧ широкополосными сигналами, фронты запускающих импульсов «распадаются», на их фронтах могут появляться высокочастотные паразитные колебания, что приводит к увеличению длительностей импульсов и

ухудшению формы их фронтов. Чтобы бороться с этим эффектом было предложено использовать LDMOS транзисторы (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors). Такие полупроводниковые элементы вносят значительно меньшие искажения в форму запускающего импульса и лучше работают с высокочастотными и широкополосными сигналами [13].

Еще одной целью при проектировании устройства было достижение меньших значений напряжений постоянного питания с целью повышения КПД устройства. Улучшить эту характеристику также предлагается за счет использования транзисторных кристаллов с низкими значениями напряжений открывания.

1.1. Модель устройства и изучение запускающего каскада

Для исследования функционирования предложенной модели была использована среда автоматизированного проектирования Microwave Office 17. Особый интерес для анализа представляет входной каскад. Для исследования использовалась модель транзистора Ampleon BLF BLF574 [15]. Полоса рабочих частот транзистора составляет 500 МГц, при ширине запускающего импульса в 6 нс и длительности фронтов 3 нс ширина спектра составляет порядка 200 МГц, что укладывается в полосу рабочих частот транзистора.

Электрическая схема, составленная в пакете автоматизированного проектирования для анализа, представлена на рис. 3 и 4.

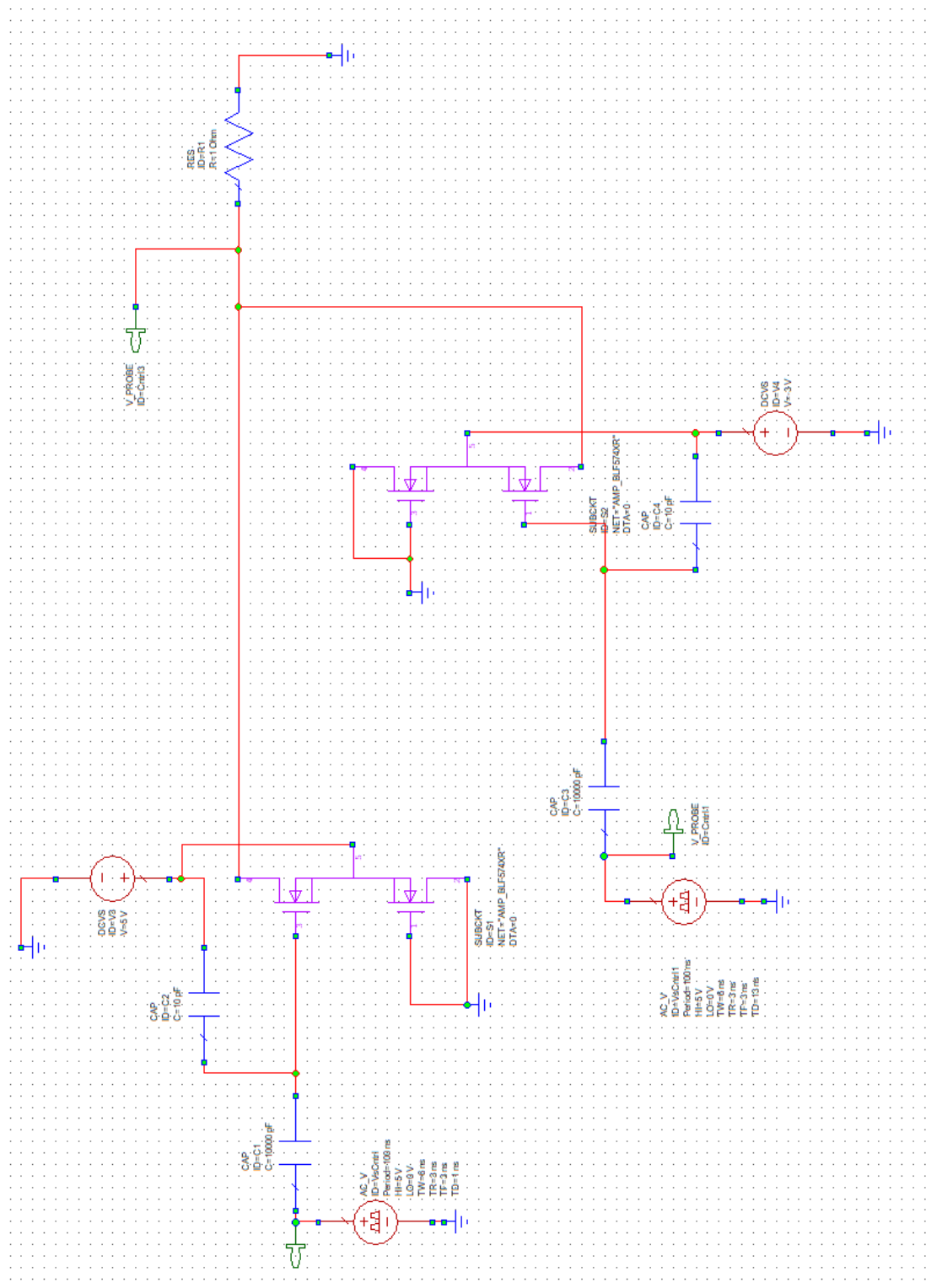


Рис. 5. Модель генератора СКИ в пакете автоматизированного проектирования.

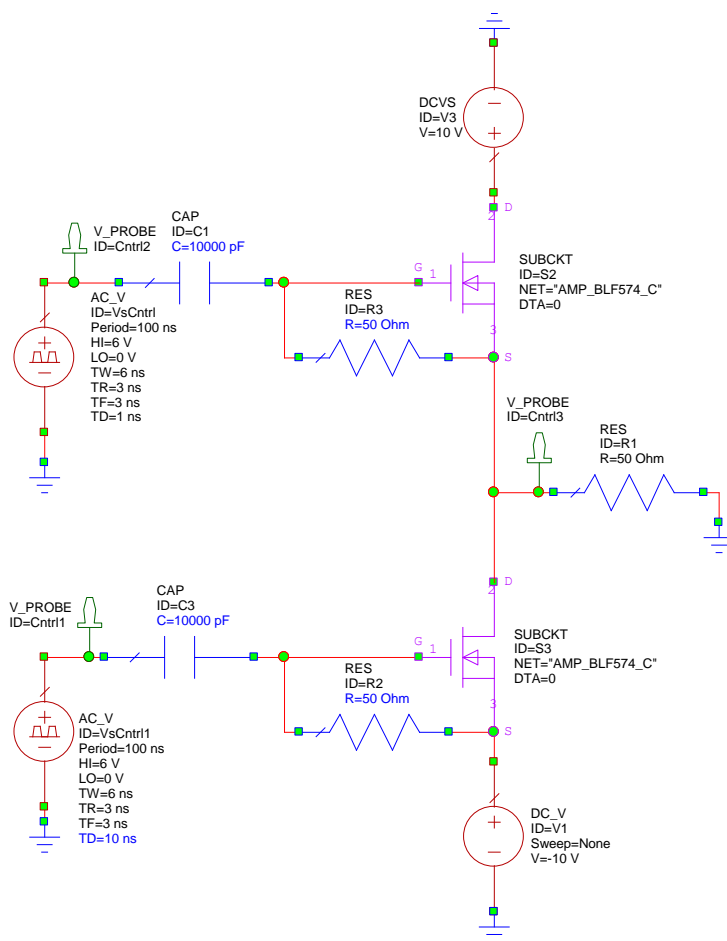


Рис. 6. Модель для изучения запускающих импульсов

На графике изображены импульсы с пробников на схеме, представленной на рис. 7.: импульс рассасывания и накопления заряда на ДНЗ с генераторов запускающих импульсов с различными задержками и одной длительностью (Probe1 и Probe2 соответственно) и импульс на выходной 50-Омной резистивной нагрузке. Приведенный рисунок демонстрирует техническую возможность перестройки разработанной схемы: управлять накоплением и рассасыванием заряда в структуре ДНЗ за счет изменения задержек между импульсами с запускающих генераторов и их длительностей, и позволяет посмотреть вид импульса, который попадет на выход устройства.

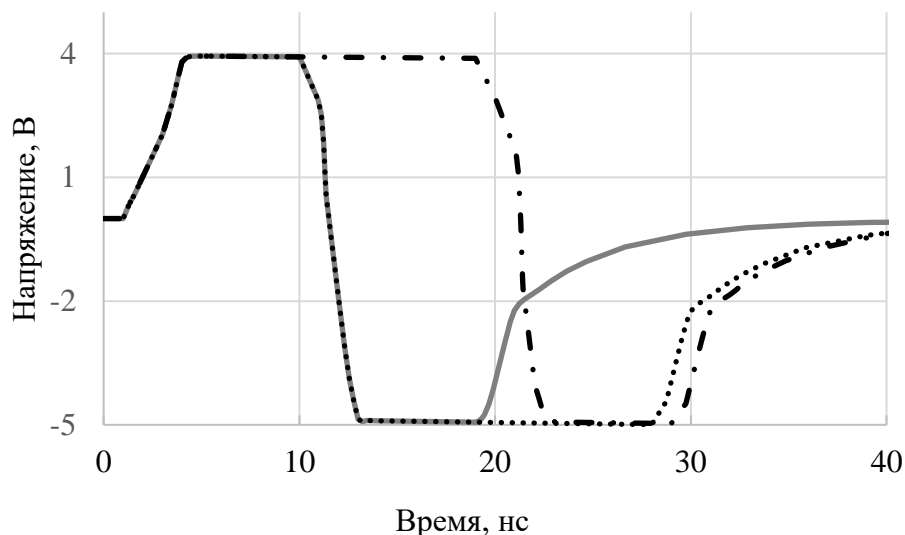


Рис. 8. Результаты моделирования

1.2. Экспериментальное исследование

Для проверки результатов моделирования был изготовлен экспериментальный образец генератора СКИ с двумя высокочастотными транзисторными кристаллами. В качестве подложки был использован диэлектрик Rogers RO4350D, диэлектрическая проницаемость 3.48, толщина диэлектрика 0.76 мм. В качестве транзисторов были использованы кристаллы Ampleon BLF574 [15], в качестве токоразмыкающих элементов использовались SRD Macom MAVR-044769-12790T [14]. Для пайки транзисторов на текстолит была нанесена никелевая и золотая металлические пленки. Для защиты от внешних механических повреждений и пыли, а также для уменьшения внешних электромагнитных воздействий в окружающей электромагнитной обстановке, устройство было помещено в корпус. Экспериментальный образец приведен на рис. 9.

Целью эксперимента было получение двух СКИ: импульс с максимально возможной амплитудой, минимальным уровнем звона и наименее отклоняющийся по форме от идеального гауссовского импульса.

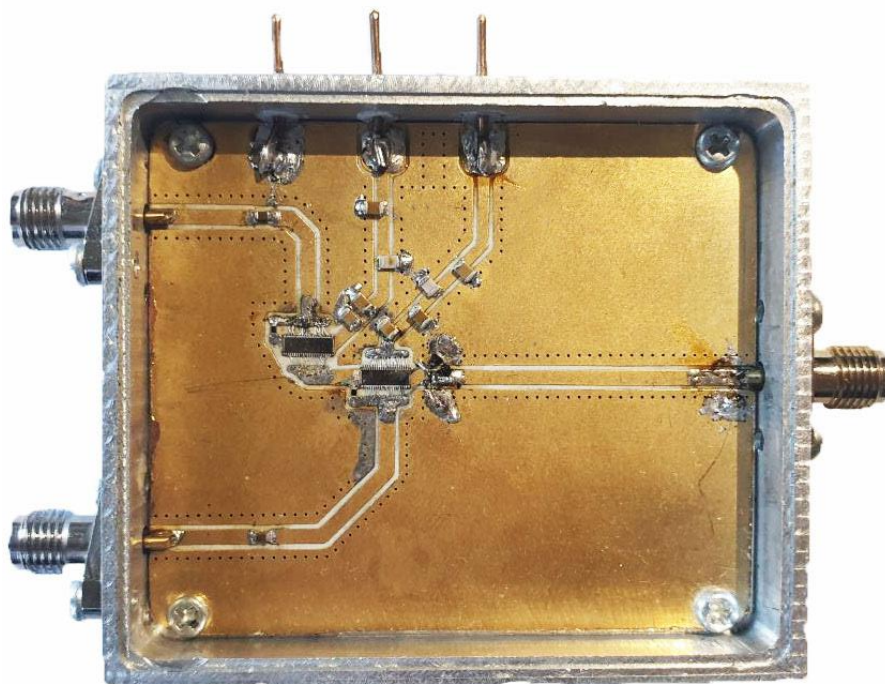


Рис. 10. Экспериментальный образец

С изготовленным макетом был проведен натурный эксперимент. Схема подключения генератора соответствует приведенной на рис. 2-3. В качестве запускающих генераторов использовались два Agilent 81104A, в качестве источников постоянного тока использовались БП Keysight U8031A. Выход установки был подключен через аттенюатор 46 дБ к стробоскопическому осциллографу Agilent DCA-X 86100D.

Осциллограммы импульсов, полученные в результате эксперимента, приведены на рис. 11 и 12. Амплитуда составила от 38 до 52 В, длительность от 200 пс до 320 пс. Уровень звона составляет порядка 4-6% процентов от амплитуды импульсов. Также следует отметить отсутствие высокочастотных колебаний после заднего фронта импульсов, что позволяет сохранить полезные свойства спектров гауссовских колокольных импульсов. Формы импульсов во временной области также были оценены с использованием метода NMSE, что подробнее описано в следующем разделе работы.

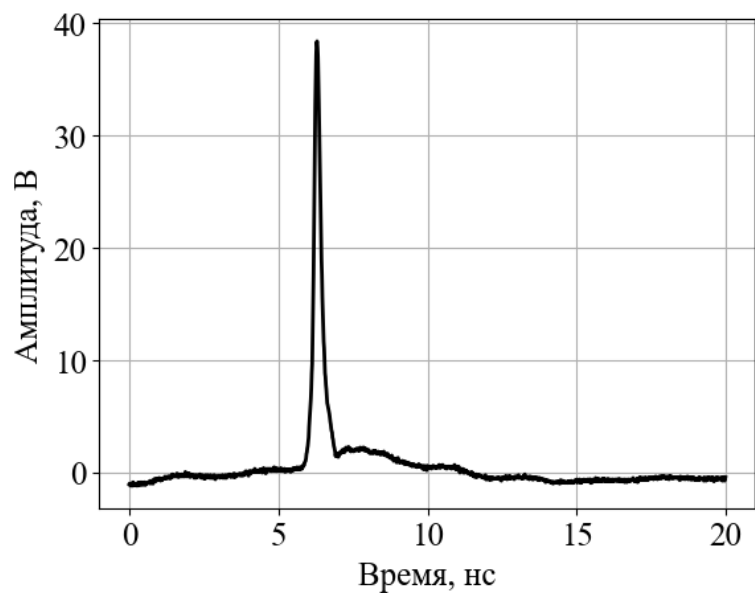


Рис. 13. Осциллограмма импульса с низким уровнем звона на выходе прототипа.

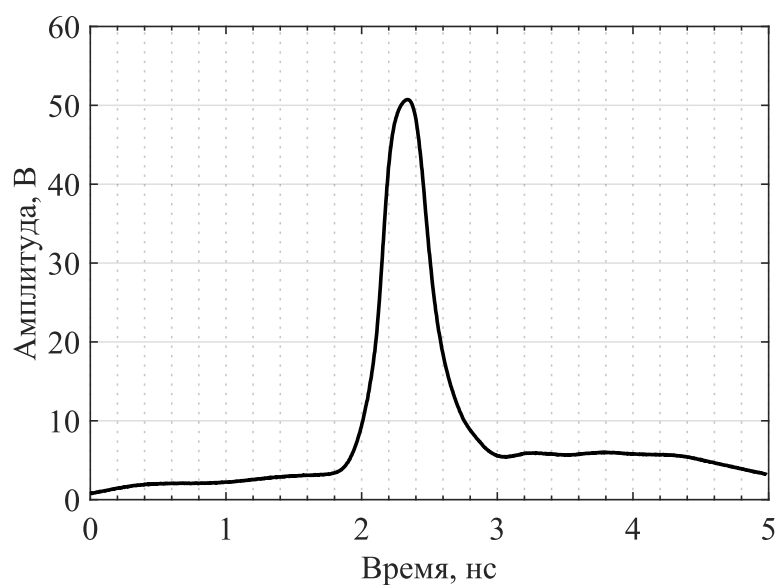


Рис. 14. Осциллограмма импульса с максимальной амплитудой.

Проанализируем полученные импульсы. Параметры импульса с минимальным уровнем «звона»:

- амплитуда: 38 В;
- длительность: 210 пс;
- уровень звона в процентах: 4.

Параметры импульса с максимальной амплитудой:

- амплитуда: 52 В;

- длительность: 320 пс;
- уровень звона в процентах: 10.

Следует также отметить, что для получения импульса на Рис. 13, постоянное напряжение питания составляло 3 В и –2 В. Эти значения значительно меньше, чем использованные в предыдущих аналогах генераторов СКИ на основе ДНЗ [2]. Следовательно, КПД данного прототипа лучше, чем у ранее используемых устройств.

1.3. Эксперимент с длительностями запускающих импульсов

Для исследования зависимостей амплитуды и длительности СКИ на выходе генератора был проведен следующий эксперимент. Импульсы запуска, отвечающие за накачку и рассасывание заряда в структуре ДНЗ сначала были установлены так, чтобы сразу после окончания заднего фронта импульса накачки следовал импульс рассасывания. Затем увеличивалась длительность импульса, отвечающего за накачку и на равное этому увеличению время смещался импульс рассасывания. Блок-схема эксперимента приведена на рис.

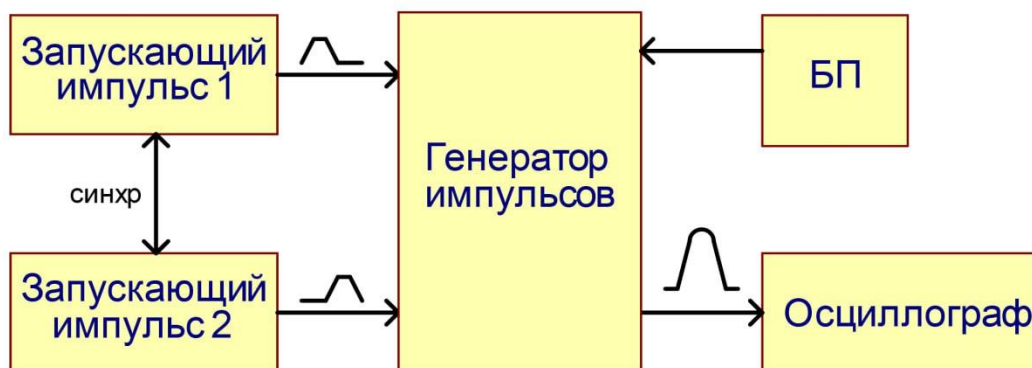


Рис. 8. Блок-схема экспериментальной установки для проведения эксперимента.

Запускающий импульс 1 в приведенной выше схеме отвечает за накопление заряда ДНЗ, запускающий импульс 2 за рассасывание заряда. Примерная конфигурация запускающих импульсов во временной области также приведена на схеме. На резистивной нагрузке в виде осциллографа наблюдался результирующий СКИ.

Параметры эксперимента:

- фронты запускающих импульсов: 3 нс;
- амплитуды запускающих импульсов: 6 В;
- напряжения питания: 5 В и – 3 В.

Для нивелирования длинны кабеля синхронизации была выставлена задержка основного импульса на управляющем генераторе на 17.25 нс. Результаты эксперимента представлены в Таблица 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Запускающий импульс, нс						Рез. импульс	
3.1, нс	Длит.1, нс	Длит1 + Фронт1, нс	3.2, нс	Длит. 2. нс	3.2 + Фронт2	Ампл, В	Длит, нс
17,25	6	12	12	6	12	34,4	185
17,25	6,5	12,5	12,5	6	12	35,6	194
17,25	7	13	13	6	12	36,6	196
17,25	7,5	13,5	13,5	6	12	37	200
17,25	8	14	14	6	12	37,8	206
17,25	8,5	14,5	14,5	6	12	38,3	211
17,25	9	15	15	6	12	38,7	213
17,25	9,5	15,5	15,5	6	12	39,1	215
17,25	10	16	16	6	12	39,3	220
17,25	10,5	16,5	16,5	6	12	39,6	223
17,25	11	17	17	6	12	39,9	224
17,25	11,5	17,5	17,5	6	12	40,2	227
17,25	12	18	18	6	12	40,3	228
17,25	12,5	18,5	18,5	6	12	40,4	227
17,25	13	19	19	6	12	40,6	232
17,25	13,5	19,5	19,5	6	12	40,7	237
17,25	14	20	20	6	12	40,8	234
17,25	14,5	20,5	20,5	6	12	40,9	236

17,25	15	21	21	6	12	40,9	233
17,25	15,5	21,5	21,5	6	12	40,9	236
17,25	16	22	22	6	12	40,9	236

Полученные зависимости амплитуд и длительностей результирующих импульсов представлены на графиках ниже.

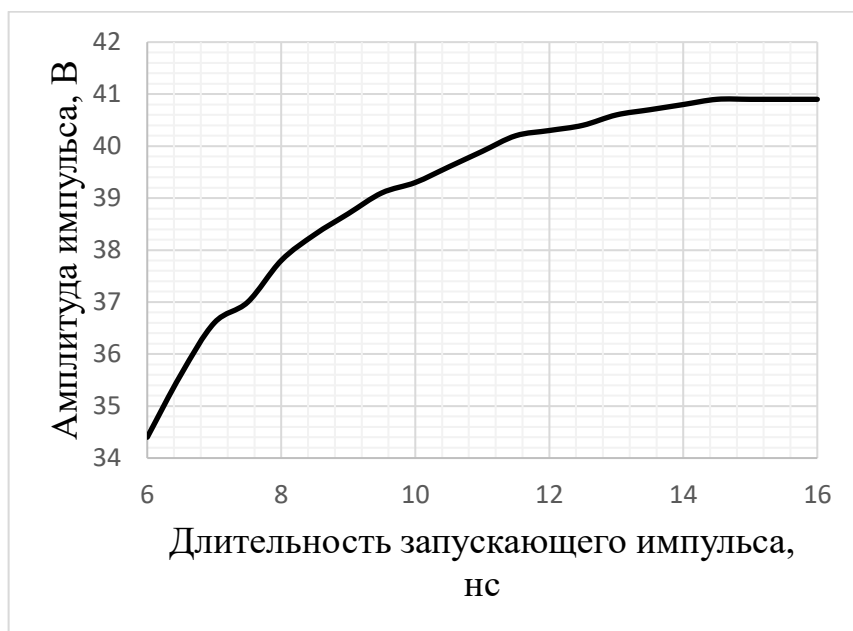


Рис. 9. График зависимости амплитуды СКИ от длительности запускающего импульса

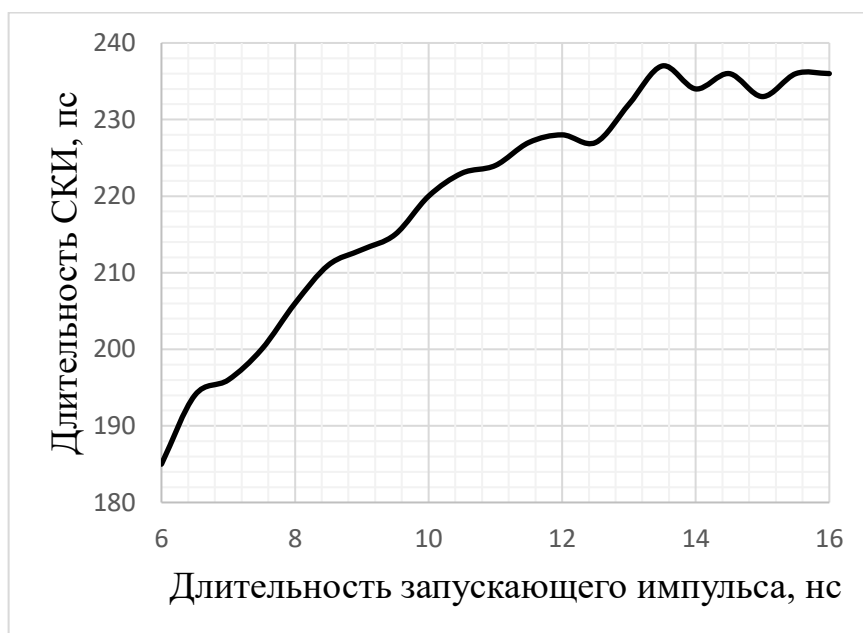


Рис. 10. График зависимости длительности СКИ от длительности запускающего импульса

Проанализируем полученные результаты. Сначала амплитуда выходного импульса увеличивается, а затем достигает максимального значения в 41 В. Это связано с «насыщением» структуры ДНЗ и стабилизацией переходных процессов.

Изменения длительности выходного импульса имеет несколько более сложный характер, но, в целом, подчиняется аналогичным зависимостям. Полученный разброс параметров может быть объяснен погрешностью определения длительности импульса осциллографа.

Таким образом, подтвердилось изначальное предположение, однако при увеличении амплитуд импульсов увеличиваются и их длительности. Это свойство может быть удобно для организации систем локации, где в зависимости от конкретных задач нужно управлять амплитудой или шириной спектра. Возможность управления этим параметром позволяет регулировать разрешающую способность систем локации.

Под разрешающей способностью понимается точность определения местоположения объектов в пространстве или точность их различения. Зависимость разрешающей способности от ширины спектра в импульсных системах локации определяется формулой:

$$R \cong \frac{V}{2 * n * \Delta F} \quad (2)$$

где:

- R — разрешающая способность;
- V — скорость распространения в среде;
- n — база сигнала (для СШП считают ~ 1);
- F — относительная ширина спектра (как правило по уровню - 10 дБ).

Соответственно, при увеличении ширины спектра излучаемого сигнала, пропорционально изменяется и разрешающая способность системы.

2. Оценка импульсов

К разработанному ранее программно-аппаратному измерительному комплексу (ПАИК) для автоматизированной оценки амплитуд и длительностей импульсов была добавлена автоматизированное сравнение импульсов, полученных с генераторов СКИ, импульсам, вычисленным с помощью формул. Также в ПАИК была добавлена автоматизация оценки уровня «звона». В дальнейшем планируется также расширить возможность комплекса и настроить для него графический пользовательский интерфейс (GUI).

Оценка отклонения реальных СШП-импульсов от идеальных основана на использовании метода нормированной среднеквадратической ошибки, в зарубежной литературе *normalized mean square error* (NMSE). Эта величина вычисляется по формуле (1):

$$NMSE = \sum_i \frac{(x_i - y_i)^2}{N} * \sum_i x_i^2 \quad (3)$$

В качестве входных данных программы используется массив отсчетов, описывающих экспериментальный импульс (снятый осциллографом). Программа определяет длительности по полувысоте и максимальное значение импульса. Исходя из этих параметров строится идеальный импульс по известным инженерным формулам:

$$s(t) = A * \exp\left(-4 * \ln(2) * \frac{(t - \Delta t)^2}{\tau^2}\right) \quad (4)$$

$$s(t) = A * \sqrt{2 * e} \frac{(t - \Delta t)^2}{\tau} * \exp\left(-\frac{(t - \Delta t)^2}{\tau^2}\right) \quad (5)$$

где:

A – амплитуда импульса;

t – сдвиг импульса во времени относительно начала координат;

τ – длительность импульса по полувысоте (для колокольного импульса) и от максимального значения до минимального (для моноцикла Гаусса)

Аналитический и экспериментальный импульс могут быть отображены на графиках для визуального анализа. Импульсы автоматически совмещаются по времени достижения максимального значения (пика) и длительность по полувысоте идеального импульса соответствует вычисленной длительности реального импульса. Затем вычисляются отклонения и численный коэффициент NMSE в децибелах.

Алгоритм был реализован на языке программирования Python (v3.11.1) с использованием библиотек NumPy v.1.24.2 [16] и Matplotlib v.3.6.3 [17], автоматизация управления радиоизмерительным оборудованием осуществлялось с помощью библиотеки PyVISA[18].

Полученные в результате эксперимента с описанным выше генератором СКИ импульсы были проанализированы с помощью разработанного алгоритма. Графики осциллограмм в сравнении с «идеальными» импульсами приведены на рис. 15.

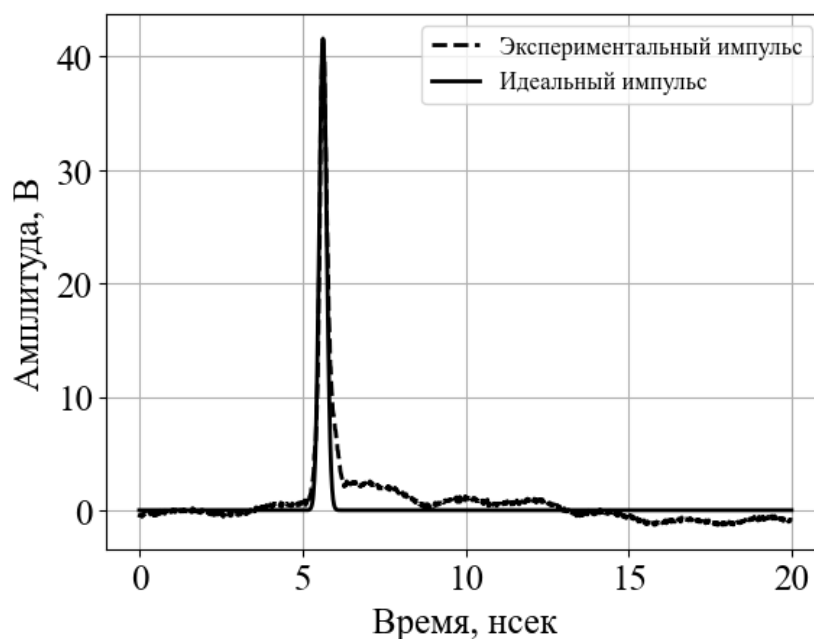


Рис. 16. «Идеальный» и реальный импульсы, построенные с помощью ПАИК

Уровень отклонения от идеальных значений составил порядка .

- Для импульса с максимальной амплитудой – 10.87 дБ;
- для импульса с минимальным уровнем звона – 15 дБ.

Стоит также отметить возможность разработанного ПО оценивать форму не только гауссовых колокольных импульсов, но и импульсов в форме моноцикла Гаусса. ПАИК автоматически оценивает амплитуду моноциклов (по размахам импульсов) и длительность по принципу peak to peak (временной интервал между пиками импульса). Полярность (или фаза) импульсов также оценивается автоматически. Исходя из данных оценки, по формуле (3) строится «идеальный» импульс, оценка соответствия форм полученных кривых также происходит с помощью метода NMSE.

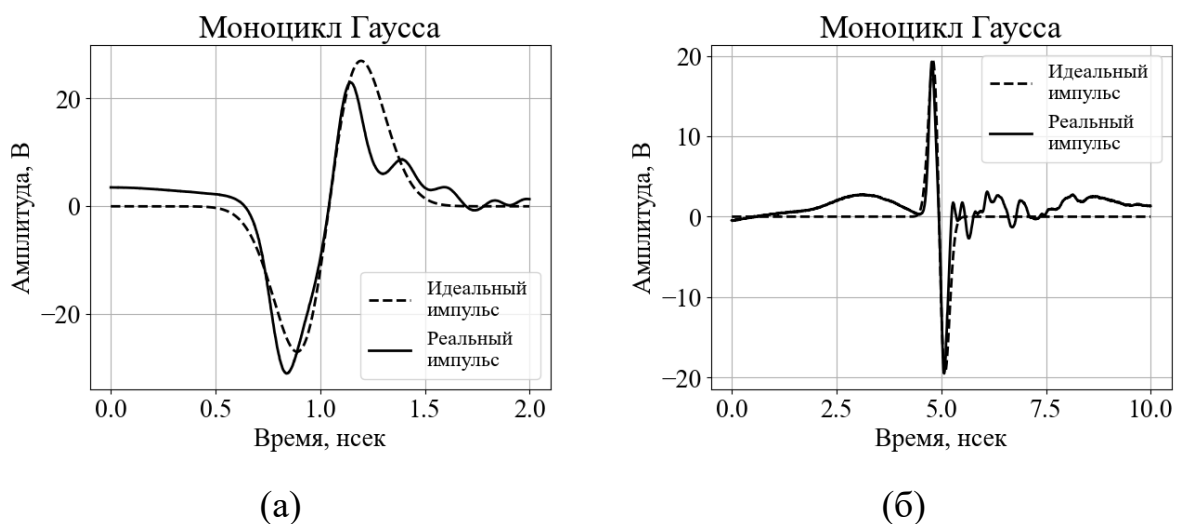


Рис. 12. Идеальный и реальный импульсы в форме моноцикла Гаусса, построенные с помощью ПАИК

Для приведенных на рис. 11 импульсов значение NMSE составляет:

1. -8.97 дБ (а);
2. -10.42 дБ (б).

Таким образом, ПАИК позволяет сравнивать формы экспериментальных импульсов с импульсами, полученными математически, во временной области. Уровень совпадения определяется из конкретных практических приложений и может быть задан пользователем. Также во временной области автоматизировано оценивается уровень высокочастотных колебаний после заднего фронта импульса относительно амплитуды импульса. Оценка производится следующим образом. Программно определяется задняя граница

импульса по уровню 0.1 от амплитуды и исследуется полученный массив с данными. Определяется его максимальное и минимальное значение, затем определяется отношение этого значения к амплитуде импульса. Оценка производится для импульсов любой конфигурации и полярности. В частности, для импульса, приведенного на рис. 10, уровень звона составляет 4,86%.

Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательской работы была разработана принципиально новая схема генератора СКИ квазигауссовой формы с возможностью управления процессами накопления и рассасывания заряда в токоразмыкающем элементе (ДНЗ). В ходе исследований была разработана его модель, позволяющая изучить перестройку параметров запускающих импульсов, получен и протестирован экспериментальный макет. В ходе экспериментов удалось сформировать два импульса: с минимальным уровнем звона (порядка 4%) и импульс с максимальной амплитудой (52 В).

Была продолжена работа над ПАИК, в ходе которой был разработан модуль, позволяющий сравнивать экспериментальные импульсы с математическими моделями. Количественная оценка различия была получена с помощью вычисления коэффициента NMSE. Для полученных с помощью нового генератора СКИ импульсов отклонения от математической модели составили -15 дБ (для импульса с минимальным уровнем звона) и – 10 дБ (для импульса с максимальной амплитудой). Также были оценены полученные ранее с помощью сумматора конструкции Уилкинсона импульсов в форме моноцикла Гаусса, уровень отклонения составил порядка -9 дБ. Также с помощью ПАИК был оценен уровень звона импульсов как отношения размаха амплитуды высокочастотных колебаний к амплитуде самого импульса. Для импульсов с нового генератора эти значения составили порядка 4-6 %.

В дальнейшем планируется расширять возможности ПАИК для оценки импульсов не только во временной, но и в частотной области, и исследовать процессы накопления и рассасывания заряда в ДНЗ с помощью разработанного генератора с возможностью управления запускающими импульсами.

Литература

1. Пикосекундная импульсная техника / В. Н. Ильюшенко [и др.], под ред. В. Н. Ильюшенко – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 386 с.
2. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, A. D. Ryazantsev, V. A. Stepkin and G. K. Uskov, "Improvement of ultrashort pulses by serial connection of step recovery diodes," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 2, pp. 204-206, Feb. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2020.3046925.
3. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin and G. K. Uskov "Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator With High Amplitude and Low Ringing Level", IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 27, no. 11, pp. 1013–1015, November 2017.
4. P. Krishnaswamy, A. Kuthi, P. T. Vernier and M. A. Gundersen, "Compact Subnanosecond Pulse Generator Using Avalanche Transistors for Cell Electroperturbation Studies," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 4, pp. 873-877, Aug. 2007
5. I. V. Grekhov, S. V. Korotkov, A. L. Stepaniants, D. V. Khristyuk, V. B. Voronkov and Y. V. Aristov, "High-power semiconductor-based nano and subnanosecond pulse Generator with a low delay time," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, no. 4, pp. 1240-1244, Aug. 2005
6. A. De Angelis, M. Dionigi, R. Giglietti and P. Carbone, "Experimental Comparison of Low-Cost Sub-Nanosecond Pulse Generators," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, no. 1, pp. 310-318, Jan. 2011
7. T. Toyooka and Y. Minamitani, "Development of a cluster burst pulse generator based on a SOS diode switch for bioelectrics applications," 2011 IEEE Pulsed Power Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1186-1189
8. Z. Pei, X. Li, Q. Zhang, Z. Wu, Y. Zhao and X. Chen, "Development of a high voltage, 240ps pulse generator in GIS for PD testing," 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Jackson, WY, USA, 2018, pp. 261-263, doi: 10.1109/IPMHVC.2018.8936712.

9. I. V. Grekhov, "Pulse Power Generation in Nano- and Subnanosecond Range by Means of Ionizing Fronts in Semiconductors: The State of the Art and Future Prospects," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, no. 5, pp. 1118-1123, May 2010

10. Qing Wang and Jianping Yao, "Switchable optical UWB monocycle and doublet generation using a reconfigurable photonic microwave delay-line filter," Opt. Express 15, 14667-14672 (2007)

11. E. J. Wilkinson, "An N-Way Hybrid Power Divider," in IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 8, no. 1, pp. 116-118, January 1960

12. Величкина А. С., Елфимов А. Е., Смусева К. В., Усков Г. К. Расширение частотного диапазона сумматора Уилкинсона для формирования сверхкоротких импульсов// Радиолокация, навигация, связь: XXVIII Международная научно-техническая конференция. 2022. Т. 4. С. 315-322.

13. Кожевников В., Дикарев В., Горохов В., Цоцорин А. Мощные СВЧ LDMOS-транзисторы ОАО «НИИЭТ» для средств радиосвязи и радиолокации// Электронные компоненты — №4 — 2015 г. — с. 60-63.

14. MAVR-044769-12790T Datasheet, Macom.com. Accessed: Dec. 30, 2020. [Online]. Available: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAVR-044769-12790T>

15. Ampleon BLF574 HF / VHF power LDMOS transistor Datasheet, Ampleon.com/. Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. <https://www.ampleon.com/documents/data-sheet/BLF574.pdf>

16. NumPy documentation – URL: <https://numpy.org/doc/1.24> (дата обращения: 16.01.2023).

17. Matplotlib 3.6.3 documentation – URL: <https://matplotlib.org/stable/index.html> (дата обращения: 16.06.2023)

18. PyVISA: Control your instruments with Python – URL: <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 16.06.2023)