

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУК  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Ефанов Михаил Владимирович

РАЗРАБОТКА СВЕРХМОЩНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ  
НАНО-ПИКОСЕКУНДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.

Специальность 1.3.13 – электрофизика и электрофизические установок

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Лебедев Е.Ф.

Москва – 2022

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Проблемы и анализ существующих традиционных и современных технологий построения мощных нано-пикосекундных генераторов .....	11
1.1. Нано-пикосекундные генераторы на SOS технологиях.....	11
1.2. Гигаваттные нано-пикосекундные генераторы на магнитных ключах.	19
1.3. Мегавольтовые генераторы на разрядниках с лазерным поджигом ....	23
1.4. Разработки нано-пикосекундных ключей на основе SiC, GaAs .....	27
1.5. Генераторы напряжения с фронтом 10-30 пс на туннельных диодах и диодах с накоплением заряда ДНЗ.....	30
1.6. Актуальность исследования происхождения СШП сигналов в атмосфере Земли .....	33
Выводы и постановка задачи .....	37
Глава 2. Компактные высокоэффективные генераторы наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии.....	40
2.1. Компактный генератор наносекундных импульсов с амплитудой 500 кВ .....	40
2.2. Высоковольтные высокостабильные генераторы наносекундных импульсов для применений в отклоняющих системах ускорителей.....	45
2.3. Функциональная блок схема высокостабильного генератора наносекундных импульсов напряжения .....	46
2.4. Тестирование рабочих параметров высокостабильного генератора наносекундных импульсов напряжения. ....	49
Глава 3. Высокочастотные нано-пикосекундные генераторы с частотой повторения импульсов в диапазоне более 1МГц.....	55

3.1. Высокоэффективный высокочастотный четырехканальный генератор с субнаносекундными фронтами и максимальной частотой повторения 15 МГц.....	56
3.2. Мощный высокоэффективный высокочастотный генератор с амплитудой 10 кВ на нагрузке 75 Ом и максимальной частотой повторения 1 МГц.....	60
3.3. Высокочастотный генератор с амплитудой 5 кВ на нагрузке 50 Ом и максимальной частотой повторения 5 МГц.....	64
Глава 4. Пикосекундные сверхстабильные генераторы импульсов напряжения мегаваттной пиковой мощности .....	69
4.1. Принципиальная схема формирования высоковольтных пикосекундных импульсов.....	69
4.2. Калибровка измерительного оборудования, используемого для измерения пикосекундных импульсов напряжения .....	71
4.3. Результаты измерения сверхкоротких фронтов высоковольтных импульсов напряжения.....	74
Глава 5. Экспериментальное исследование деформации пикосекундных СШП импульсов в атмосфере.....	80
5.1. Проблемы постановки исследований в атмосфере .....	80
5.2. Полевые эксперименты по допустимому углу возвышения диаграмм направленности над поверхностью Земли .....	82
5.2.1. Влияние земной поверхности на регистрируемые сигналы.....	82
5.2.2. Влияние высоты расположения излучателя и приемника.....	85
5.2.3. Исследование допустимого расхождения осей диаграмм направленности антенн излучателя и приемника.....	91
5.3. Постановка и реализация прямого эксперимента на дистанции 10 км и более .....	95
5.4. Выводы к главе 5.....	105
Заключение .....	106

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
------------------------	-----

## Введение

В современной ускорительной технике, в установках для экспериментов в области фундаментальной физики, физики плазмы, локационной техники, а также во многих других областях науки и техники, широко используются мощные генераторы нано-пикосекундных импульсов напряжения.

Основные рабочие характеристики подобных генераторов определяются возможностями высоковольтных приборов переключать мощности в десятки и сотни мегаватт за единицы и доли наносекунды.

Традиционно в качестве основных мощных быстродействующих ключей высоковольтных генераторов используются газоразрядные тиратроны и разрядники.

История возникновения и развития газоразрядных приборов длится более ста лет. Фактически это были первые электронные приборы, из которых возникла вся современная электроника. За многие годы было создано множество модификаций газоразрядных ключей, но в их основе неизменными оставались главные физические механизмы генерации проводящей плазмы и, как следствие, все связанные с этим достоинства и недостатки. Главные из них: малый ресурс, большая нестабильность по времени переключения, низкие рабочие частоты повторения.

За последние десятилетия бурное развитие мощных полупроводниковых приборов, таких как IGBT и MOSFET транзисторов, транзисторов на основе GaAs, SiC и GaN полупроводниках, повлияло на многие технические решения в мощных наносекундных генераторах, но подобные приборы не смогли заменить главные ключи — тиратроны и разрядники.

Принципиально новые возможности для создания сверхмощных твердотельных ключей открыло обнаружение нескольких новых физических

механизмов генерации и переноса электронно-дырочной плазмы в полупроводниках.

Первый из них этих механизмов, изложенный в работе [1] в 1979 году установил возможность генерации ударно-ионизационной волной плотной электронно-дырочной плазмы за десятки и сотни пикосекунд в высоковольтных р-п переходах. Второй механизм ([2], 1983г.) определил возможность восстановления обратного напряжения на высоковольтных р-п переходах за время от десятков пикосекунд до нескольких наносекунд. Третий выявленный механизм ([3], 1987г.) показал возможность переключения за доли наносекунды GaAs тиристоров с рабочим напряжением в сотни вольт.

Наиболее успешное развитие и практическое применение получили две первые идеи.

Волновой ударно-ионизационный механизм генерации плазмы лежит в основе новых ключей, получивших название ФИД ключи [4,5].

Механизм быстрого восстановления р-п перехода создал новый класс размыкающих ключей, получивших название ДДРВ [6] (Дрейфовые диоды с резким восстановлением напряжения). Возникло несколько научных групп и коммерческих предприятий, которые под своими брендами развивают оба направления ключей. В 1993г. возникло новое направление в идеологии дрейфовых диодов, которое авторы называли SOS диодами [7].

В генераторах, созданных в настоящей работе, используются ФИД и ДДРВ ключи в качестве основных приборов.

Генераторы на основе ФИД и ДДРВ ключей имеют уникальные наборы параметров, недостижимых на других технологиях. Однако их применение в конкретных технических установках требуют адаптации, оптимизации и

учета реальных режимов работы нагрузок (ускорителей, лазеров, радаров и т.д.).

Все вышеизложенное, по существу, определяет крайнюю **актуальность**, новизну и практическую значимость создания специализированных серий генераторов, учитывающих особенности их перспективного применения. Разработка подобных генераторов определило цель настоящей работы. При этом одной из конкретных целей настоящей работы стало также экспериментальное исследование распространения сверхширокополосного сигнала (СШП) на расстояние более 10 километров с определением степени деформации исходного СШП импульса при распространении в атмосфере.

Это является важной технологической задачей в области локации, а также проверкой теоретических моделей распространения СШП сигналов в атмосфере и ионосфере. Выполненные эксперименты стали возможны после созданного в данной работе генератора мегаваттной мощности с длительностью фронта импульса напряжения менее 50 пс.

Диссертация состоит из пяти глав. В первой главе дан критический анализ литературных данных достигнутого уровня нано-пикосекундных генераторов с использованием традиционных технологий. Проведен анализ существующих ограничений для улучшения достигнутых параметров. В конце главы сформулирована цель работы.

Во второй главе описываются конструкция и основные рабочие параметры нескольких типов наносекундных генераторов с пиковой мощностью от 10 МВт до двух гигаватт.

В третьей главе описываются схемотехнические принципы построения высоковольтных наносекундных генераторов с частотой повторения импульсов от 1 МГц до 15 МГц. Разработаны технические решения

умножения амплитуды наносекундных импульсов на частотах мегагерцового уровня повторения.

В четвертой главе разработан принцип построения генераторов с фронтами 20-40 пс и пиковой мощностью более 5 МВт. Проведено измерение рабочих параметров подобных генераторов и рассмотрены метрологические вопросы измерения высоковольтных пикосекундных импульсов.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование распространения СШП субнаносекундного сигнала на расстояние более 10 км. Экспериментально установлено, что деформация формы импульса длительностью 60 пс и его полуширины значительно меньше значений, полученных в теоретических моделях.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Разработка компактного генератора наносекундных импульсов с амплитудой 500 кВ на нагрузке 100 Ом и длительностью импульса напряжения около 10 нс на основе полупроводниковых ДДРВ и ФИД ключей.
2. Разработка высокостабильного генератора наносекундных прямоугольных импульсов с амплитудой до 30 кВ и стабильностью амплитуды в длительном режиме эксплуатации менее 0.1%. Разработана схема стабилизации задержек выходных импульсов напряжения и достигнут временной джиттер относительно сигналов запуска около 30 пс RMS при полной задержке около 300 нс. Генератор нашел применение в отклоняющих системах синхротронов.



3. Разработка многоканального пикосекундного генератора на основе ДДРВ ключей с максимальной частотой повторения 15 МГц и амплитудой 600В. Фронт нарастания напряжения 150-200 пс при длительности импульса 250-300 пс. Нашел применение в мощных СШП-излучателях.
4. Разработка системы управления и синхронизации, обеспечивающая умножение частоты следования импульсов напряжения до 60 МГц для многоканальных генераторов, работающих на широкополосные антенны.
5. Разработка компактного генератора с амплитудой 10 кВ с максимальной частотой следования импульсов 1 МГц. В генераторе разработан и применен принцип суммирования амплитуды импульсов напряжения на кабельных линиях на частотах мегагерцового уровня.
6. Разработка генератора прямоугольных импульсов с амплитудой выходных импульсов до 5 кВ и длительностью в десятки наносекунд, с максимальной частотой следования до 5 МГц в пакетном режиме. Разработка системы управления силовыми ключами с использованием ДДРВ приборов. Генератор применен в системах отклонения электронных пучков.
7. Разработка нового поколения генераторов с импульсами напряжения 10-20 кВ и фронтами 30-40 пс. Достигнутые параметры пиковой мощности на шесть порядка превосходят генераторы пикосекундных импульсов мировых аналогов. В генераторах использовано новое поколение ДДРВ и ФИД ключей. Генераторы применены для запитки СШП-антенн.
8. Достигнут временной джиттер выходного импульса напряжения относительно импульсов синхронизации менее 2 пс RMS, одновременно полный размах нестабильности времени задержки составил менее 9 пс.

9. Разработка излучателя СШП сигналов длительностью полуширины 60 пс на основе генератора пикосекундных импульсов с фронтом около 50 пс и амплитудой более 10 кВ для применения в фундаментальных исследованиях при прохождении в атмосфере.
10. Результаты экспериментального исследования прохождения СШП импульсов с фронтом 60 пс через атмосферу Земли на расстояние более 10 км. Установлено слабое влияние атмосферы на сигнал СШП на расстояниях 10-15 км.

## **Глава 1. Проблемы и анализ существующих традиционных и современных технологий построения мощных нано-пикосекундных генераторов**

### **1.1. Нано-пикосекундные генераторы на SOS технологиях**

Максимальная пиковая мощность единичного генератора, достигнутая в настоящее время в нано-пикосекундном диапазоне, составляет около 100 ГВт [8,11,12], при этом амплитуда напряжения составляет несколько мегавольт, а пиковый ток более 10 кА.

Одна из технологий создания сверхмощных нано-пикосекундных импульсов напряжения основана на SOS диодах (Semiconductor Opening Switch) [7,9,10,11]. Наиболее полное изложение этой технологии содержится в работе [12].

В качестве SOS ключей используются кремневые диффузионные диоды с исходным уровнем легирования кремния около  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. В подобных приборах обратное напряжение лавинного пробоя составляет около 1 кВ, а область объемного заряда 150 ÷ 200 мкм. SOS приборы относятся к ключам размыкающего типа, в которых начальная высокая проводимость обеспечивается импульсом прямого тока длительностью 100 ÷ 500 нс, а размыкание рабочего тока происходит при протекании обратной полярности за время 0,5 ÷ 20 нс.

Принципиальная особенность SOS режима заключается в том, что плотность прямого и плотность обратного токов больше величины  $j_s = qN_dV_s$ , где  $q$  - заряд электронов,  $N_d$  - концентрация легирования базы диода,  $V_s$  - насыщенная скорость электронов в кремнии.

На рисунке 1.1(а) представлена принципиальная схема включения SOS приборов, а на рисунке 1.1(б) показаны диаграммы тока и напряжения на SOS ключе.

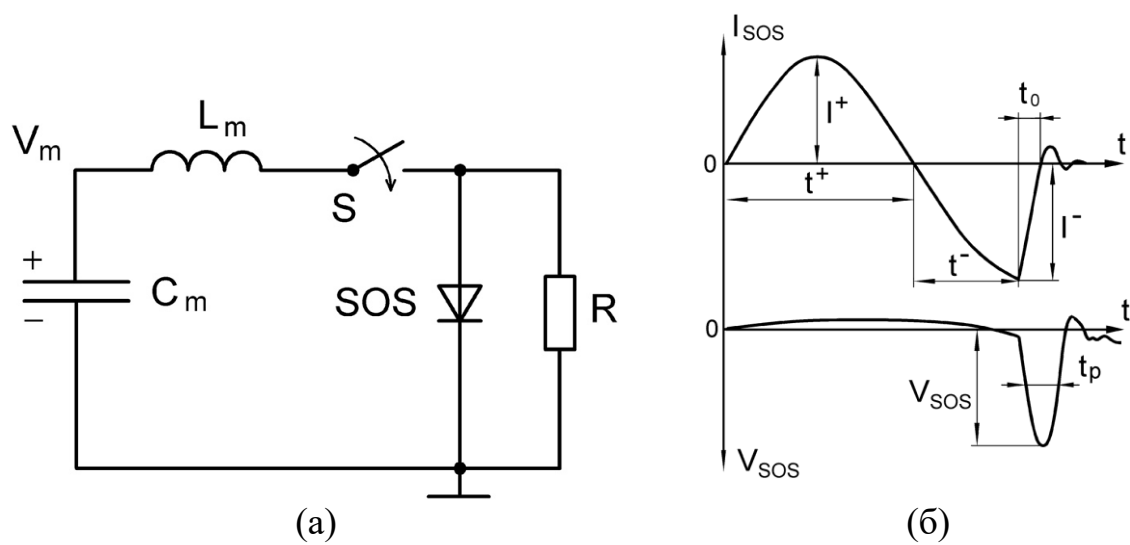


Рисунок 1.1.

В течение времени  $\tau_+$  и  $\tau_-$  напряжения на SOS приборе остаются незначительными и обеспечивается фаза высокой проводимости тока в прямом и обратном направлении.

В течении  $\tau_0$  происходит переход прибора в состояние с высоким сопротивлением и соответственно обрывом рабочего тока. После закрытия SOS прибора, ток полностью переключаются в нагрузку и формируется импульс напряжения большой амплитуды с фронтом  $\tau_0 = 0,5 \div 20$  нс.

Для достижения рабочих напряжений в десятки и сотни киловольт используются последовательные сборки SOS диодов.

В работе [12] приведены рабочие параметры SOS диодов:

Рабочее напряжение  $60 \div 250$  кВ

Число диодов в сборке – 80-220

Площадь приборов  $0,25 \div 4$  см<sup>2</sup>

Плотность тока накачки  $0,4 - 2$  КА/ см<sup>2</sup>

Плотность тока восстановления  $2 \div 10$  КА/ см<sup>2</sup>

Время восстановления p-n перехода  $0,5 \div 20$  нс

Длина сборки  $50 \div 220$  мм

Рассеиваемая мощность в трансформаторном масле  $100 \div 500$  Вт.

Наиболее часто используемая схема построения генератора на SOS диодах показана на рисунке 1.2 [12]:

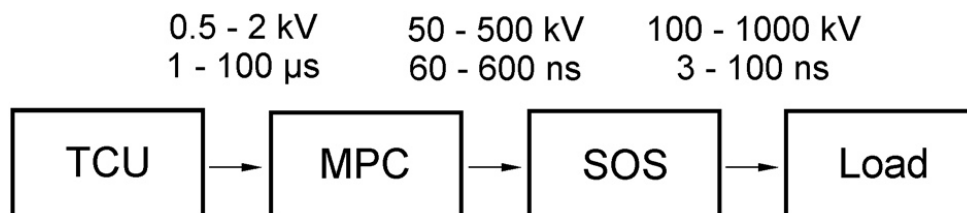


Рисунок 1.2.

Блок TCU обеспечивает накопление начальной порции энергии в импульсных конденсаторах, а затем блок MPC - магнитный импульсный компрессор, преобразует начальную энергию в высоковольтный импульс длительностью  $60 \div 600$  нс. SOS блок обеспечивает дальнейшее увеличение амплитуды напряжения до  $100 \div 1000$  кВ с длительностью  $3 \div 100$  нс.

Принципиальная схема генератора показана на рисунке 1.3.

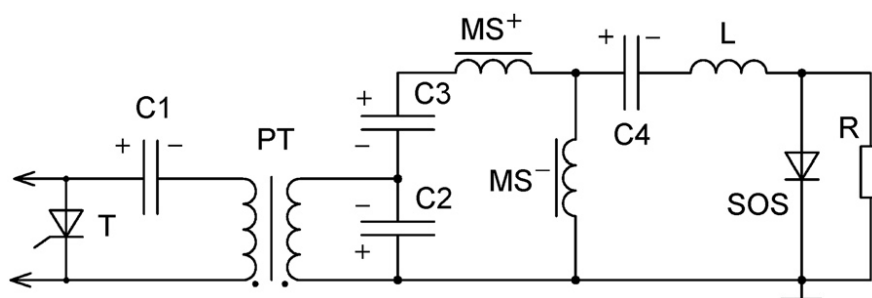


Рисунок 1.3.

В данной схеме блок TCU состоит из тиристора и емкости  $C_1$ , блок MPC представлен импульсным трансформатором PT. Магнитные ключи MS+ и MS- обеспечивают прямой и обратный ток через SOS ключи.

В итоге на нагрузке формируется импульс напряжения амплитудой в несколько сот киловольт с коэффициентом умножения напряжения более 100 относительно начального напряжения на тиристоре.

Кроме схемы, описанной выше, SOS приборы используются в других вариантах электронных схем с многокаскадными магнитными ключами [13], а также с тиратронами и высоковольтными транзисторными сборками в качестве первичных ключей.

На основе схемотехнических решений и SOS ключей, описанных выше, разработана серия генераторов с амплитудой напряжения  $100 \div 1000$  кВ. Один из них SM-2N представлен на рисунке 1.4 [12].



Рисунок 1.4 – Генератор SM-2N.

Генератор имеет первичный емкостной накопитель энергии и тиристор в качестве основного ключа первой стадии компрессии энергии.

Первичный емкостной накопитель энергии и тиристор, а также система управления и мониторинга рабочих параметров генератора расположены в отдельном модуле. Высоковольтная часть схемы, включая магнитные ключи и SOS диоды, расположены в отдельном модуле, заполненном трансформаторным маслом.

Для охлаждения SOS диодов используется отдельный контур прокачки воды через высоковольтный модуль.

В рисунке 1.5 представлены основные рабочие параметры генераторов на SOS ключах [12].

Parameter	SM-2N	SM-2NS	SM-3N	SM-3NS
Output peak voltage	100–200 kV	120–220 kV	150–400 kV	200–400 kV
Pulse current	0.2–0.4 kA	0.3–0.8 kA	1–2 kA	1–3 kA
Peak power	30–50 MW	60–100 MW	300–500 MW	400–600 MW
Pulse duration (FWHM)	25–40 ns	3–6 ns	20–50 ns	5–8 ns
Continuous pulse repetition frequency	1 kHz	0.4 kHz	0.3 kHz	0.3 kHz
Burst pulse repetition frequency	5 kHz	3 kHz	2 kHz	3 kHz
Case length	0.62 m	0.62 m	1.2 m	1.4 m
Mass with transformer oil	~50 kg	~60 kg	~250 kg	~300 kg

Рисунок 1.5.

Подобные генераторы используются в системах очистки воды, плазменных применениях, в установках физических экспериментов и многих других задачах. К.П.Д. генераторов около 60%. Средняя мощность может достигать 10 кВт.



Рисунок 1.6 – Генератор S-5N.

На рисунке 1.6 показан общий вид генератора S-5N имеющий амплитуду импульсов напряжения 1,2 МВ и пиковую мощность до 2 ГВт. В генераторе используется сборка SOS диодов с общей длиной 400 мм и весом 5 кг. Пиковый ток генератора до 4 кА, длительность импульса напряжения 30÷60 нс, энергия в импульсе 30÷60 Джоулей. Размер генератора 3,5 x 1,4 x 1 м, масса 2800 кг.

Для достижения рабочих параметров в генераторе используется двухкамерная схема на SOS диодах. В качестве SOS ключей используются кремниевые диоды с рабочей площадью 2 см<sup>2</sup> и глубиной залегания р-п перехода 190 мкм. Для уменьшения длины высоковольтной сборки SOS диоды разбиты на секции, которые уложены внутри генератора в виде зигзага.



Среди генераторов на основе SOS диодов максимальной пиковой мощностью обладает генератор S-500. Его максимальная импульсная мощность на нагрузке 100 Ом составляет более 10 ГВт. Длительность выходного импульса напряжения на уровне 50% от максимальной амплитуды составляет около 7 нс.

На рисунке 1.7(a), трек 1, представлена осциллограмма выходного импульса напряжения генератора S-500. [12]

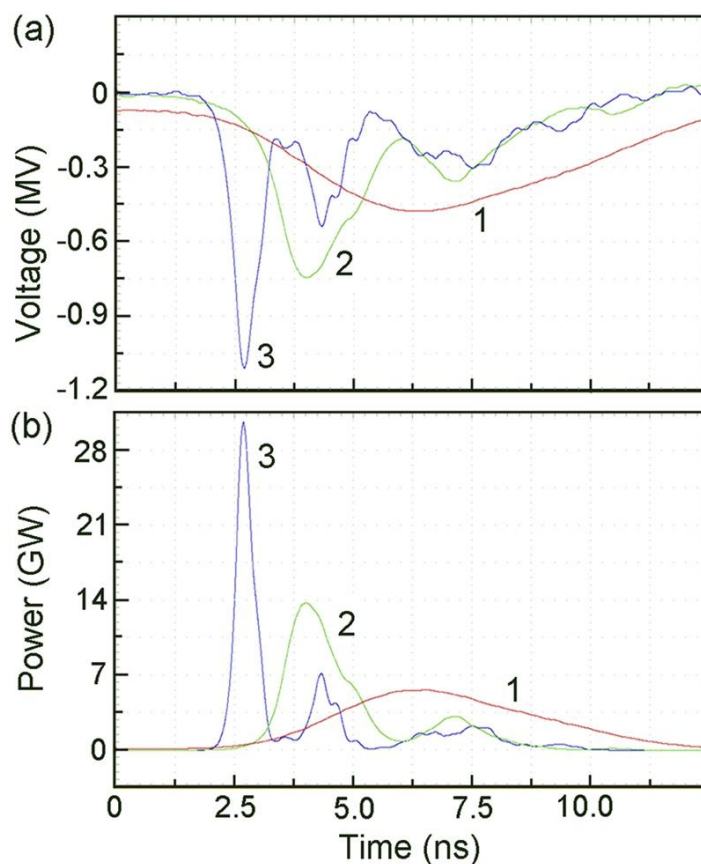


Рисунок 1.7.

Как было отмечено ранее, генераторы на SOS ключах имеют минимальный фронт нарастания выходных импульсов напряжения около 1 нс, поэтому для уменьшения этого параметра используются диодные обостряющие сборки на эффекте возбуждения ударно-ионизационных волн в p-n переходе [1].

На рисунке 1.8 а, б показана конструкция подобных сборок, встроенных в передающий коаксиальный тракт [12].

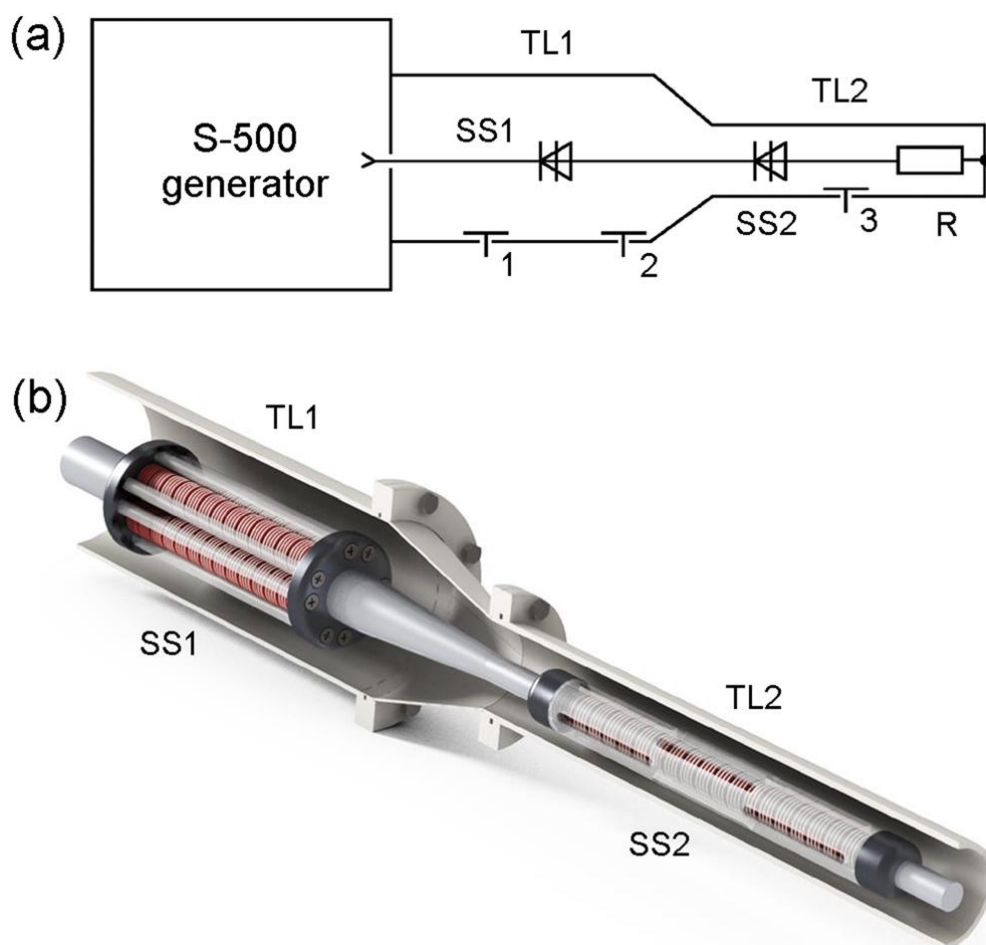


Рисунок 1.8.

Рабочее напряжение одного диода составляет несколько киловольт, поэтому при формировании импульсов напряжения порядка 100 кV необходимо использовать несколько десятков обостряющих диодов. При работе в коаксиальном тракте и достаточно коротком исходном фронте обостряемого импульса, обостряющие диоды переключаются не одновременно, а последовательно с некоторой задержкой. В итоге выходной фронт определяется временем переключения нескольких последних диодов.

На рисунке 1.9 представлена осциллограмма импульса напряжения амплитудой около 120 кV и фронтом нарастания около 100 пс, при этом

имеется участок фронта по уровню 30÷90% от максимальной амплитуды, равной примерно 50 пс [12].

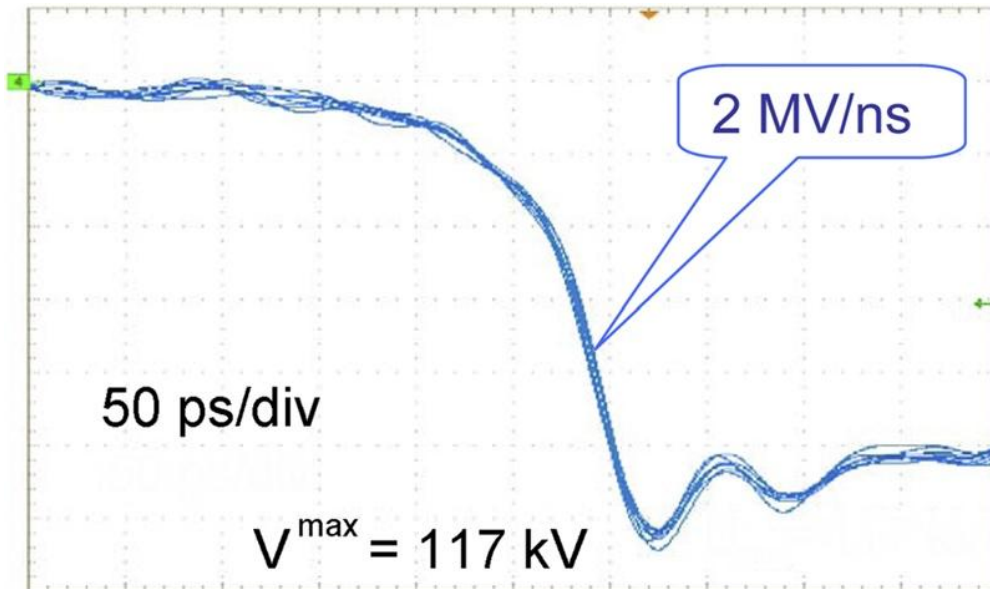


Рисунок 1.9.

Генераторы с диодными обострителями и амплитудой более 100 кВ могут работать непрерывно на частоте 200 Гц при использовании системы охлаждения с прокачкой трансформаторного масла.

## 1.2. Гигаваттные нано-пикосекундные генераторы на магнитных ключах

Метод компрессии высоковольтных импульсов напряжения с помощью магнитных ключей известен давно и широко используется при длительностях и фронтах от десятков микросекунд до десятков наносекунд. [13,14]. Значительный прогресс этой технологии был достигнут в работах [9,10,11], где удалось получить субнаносекундные фронты при мегавольтовых амплитудах напряжения.

Общая конструкция генератора с тремя секциями магнитной компрессии показана на рисунке 1.10 [11].

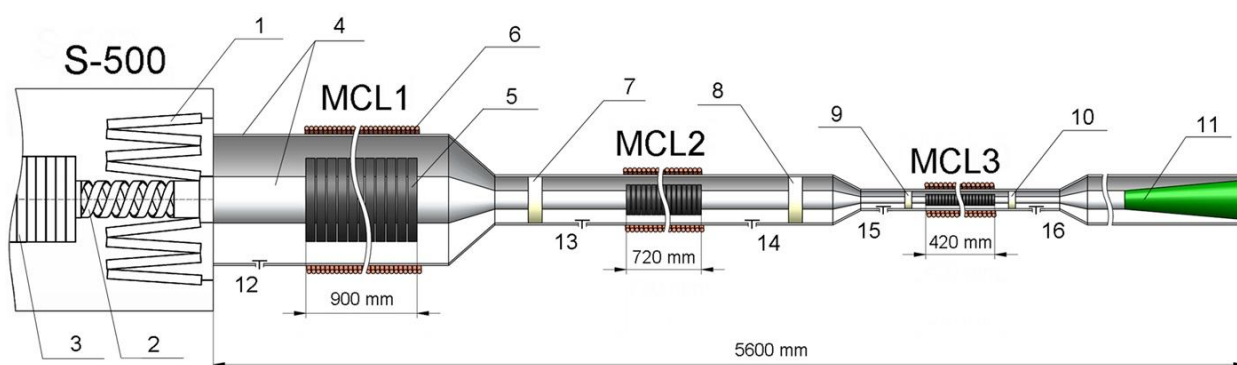


Рисунок 1.10.

В качестве задающего использовался генератор S-500, с выходным модулем диаметром 470 мм, где располагались SOS диоды.

Было установлено четыре параллельные нитки SOS диодов, каждая из которых имела четыре последовательные сборки. Все нитки SOS диодов уложены зигзагом для компактности и уменьшения индуктивности. Амплитуда тока через SOS ключи достигала 14 КА. Выходной импульс напряжения имел амплитуду около 1 МВ при пиковой мощности 13 ГВт.

Принцип компрессии основан на резком изменении индуктивности передающего тракта, заполненного ферритами.

Первая линия компрессии MCL1 подсоединялась напрямую к выходу генератора S-500. Магнитные линии компрессии MCL2 и MCL3 подсоединялись последовательно с первой линией. Выход генератора S-500 и все три линии компрессии заполнялись трансформаторным маслом.

Линии MCL1, MCL2, MCL3 были выполнены с использованием ферритовых колец разного диаметра для каждой линии. Использовались кольца на основе никель-цинкового феррита и индукцией насыщения 0,3-0,4 Т. Каждая линия имеет внешние магнитные катушки, с помощью которых устанавливались начальные рабочие параметры ферритов. Конечная третья

линия могла быть исполнена в двух размерах: с диаметром 50 мм и диаметром 38 мм.

Параметры трех магнитных линий компрессии приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Параметры	D (mm)	d (mm)	$\rho$ ( $\Omega$ )	$D_f$ (mm)	$d_f$ (mm)	$\Delta H_z$ (kA/m)
MCL1	275	102	39.7	180	110	0-40
MCL2	101	37	40.2	65	40	0-90
MCL3_50 mm	50	18.5/20	39.8/36.6	32	20	0-200
MCL3_38 mm	38	14/16	39.8/34.6	24	16	0-200

Выходной модуль генератора S-500 и первая линия были заполнены трансформаторным маслом при давлении 1 атм. Вторая и третья линии были заполнены трансформаторным маслом при давлении 3 атм., что обеспечивало более высокие пробивные напряжения.

Большое внимание авторы работы [11] уделили вопросам измерения высоковольтных субнаносекундных импульсов напряжения с помощью нескольких емкостных зондов. Была выполнена калибровка зондов с помощью эталонных генераторов с фронтами нарастания 200 пс и 70 пс.

В экспериментах с тремя магнитными линиями компрессии выполнен большой объем исследований для определения их оптимальной конструкции и режима работы.

Установлено, что для MCL1 длина заполнения ферритовыми кольцами составляла 900 мм, а для линии MCL2 – 720 мм. Для третьей линии MCL3, при диаметре 50 мм длина заполнения ферритовыми кольцами составило 360 мм, а при диаметре линии 38 мм – заполнение 420 мм.

Выходные импульсы напряжения после линии MCL3 показаны на рисунке 1.11.

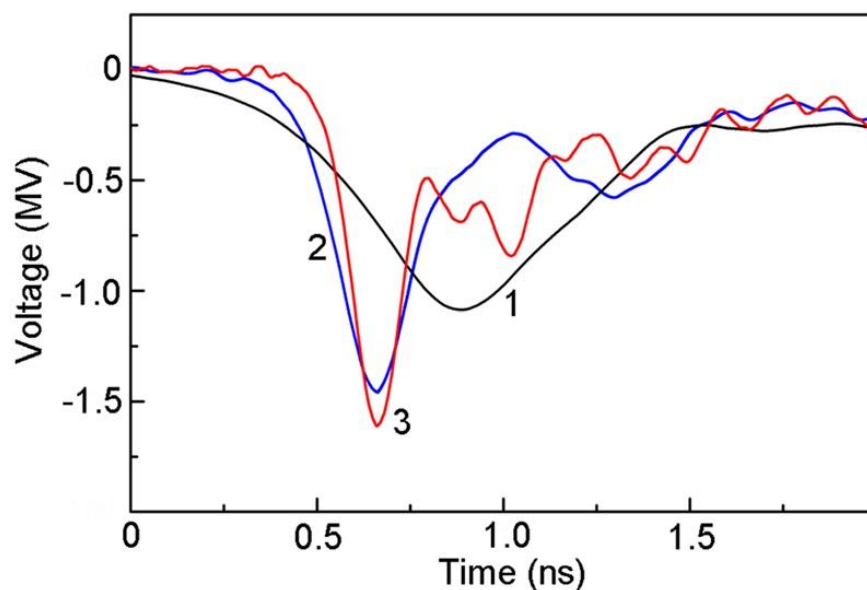


Рисунок 1.11.

Осциллограмма 1 показывает форму импульса напряжения на входе линии MCL3, Осциллограмма 2 - импульс после MCL3 при диаметре 50 мм, а осциллограмма 3 для линии с диаметром 38 мм.

Таким образом, установлено, что максимальная выходная амплитуда импульса напряжения обеспечивается линией MCL3 с диаметром 38 мм. Эксперименты так же показали падение эффективности компрессии энергии при распространении импульса напряжения от линии MCL1 до выхода после линии MCL3.

Эффективность компрессии линии MCL1 и MCL2 около 0,67. Эффективность линии MCL3 с диаметром 50 мм – 0,6, а с диаметром 38 мм – 0,5. Таким образом, полная эффективность трех линий  $0,67 \times 0,67 \times 0,5 = 0,22$ .

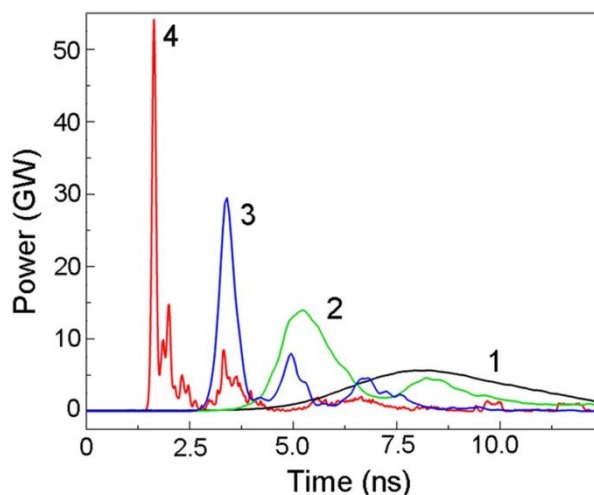


Рисунок 1.12.

На рисунке 1.12 [11] показаны осциллограммы в пересчете на мощность для четырех импульсов: 1 - входная мощность перед линией MCL1, 2 – мощность после линии MCL1, 3- мощность после линии MCL2 и 4 – мощность после линии MCL3. Таким образом достигнута компрессия по мощности от 6 ГВт до 55 ГВт.

Эксперименты выполнялись либо в режиме единичных импульсов, либо в пакете, длительностью 4 с на частоте 300 Гц. Контроль деградационных процессов магнитных линий показал, что для линии MCL3 с диаметром 38 мм критичны даже короткие серии в 100÷1000 импульсов. Масса подобных генераторов достигает несколько сотен килограмм.

### **1.3. Мегавольтовые генераторы на разрядниках с лазерным поджигом**

При формировании высоковольтных импульсов напряжения с амплитудой от десятков до сотен киловольт широко используются газовые жидкостные разрядники. Этой теме посвящено множество научных статей и монографий [14,15,17,18].

При относительной простоте генераторов с подобными ключами, имеется множество проблем с надежностью, ресурсом, стабильностью, рабочими частотами и многое другое.

Тем не менее подобные генераторы используются в различных экспериментальных установках с уникальными техническими характеристиками для ускорителей, лазеров и т.д.

В работе [8] показан генератор с использованием разрядников в котором был достигнут ряд рекордных параметров по амплитуде, стабильности и форме импульса.

Общий вид генератора представлен на рисунке 1.13.

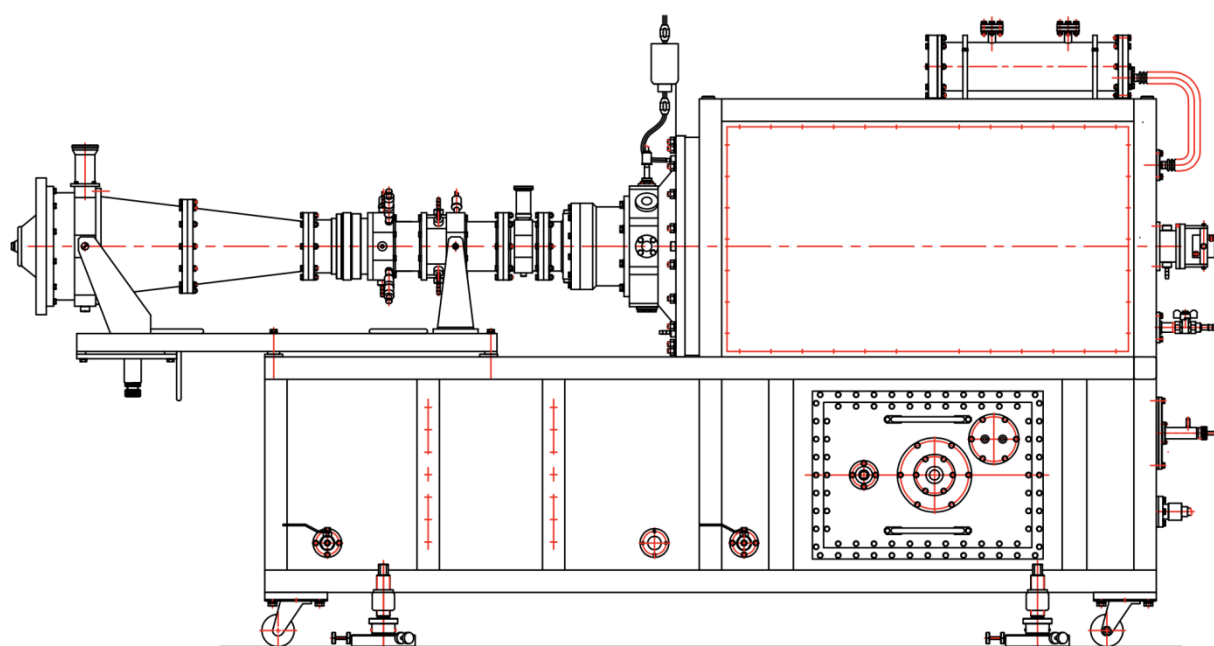


Рисунок 1.13.

Основные рабочие параметры генератора: максимальная амплитуда  $3\div 5$  МВ, фронт нарастания импульса 200 пс, джиттер выходного импульса около 500 пс, длительность импульса напряжения 1 нс.

Общая схема функционирования генератора представлена на блок схеме рисунке 1.14.



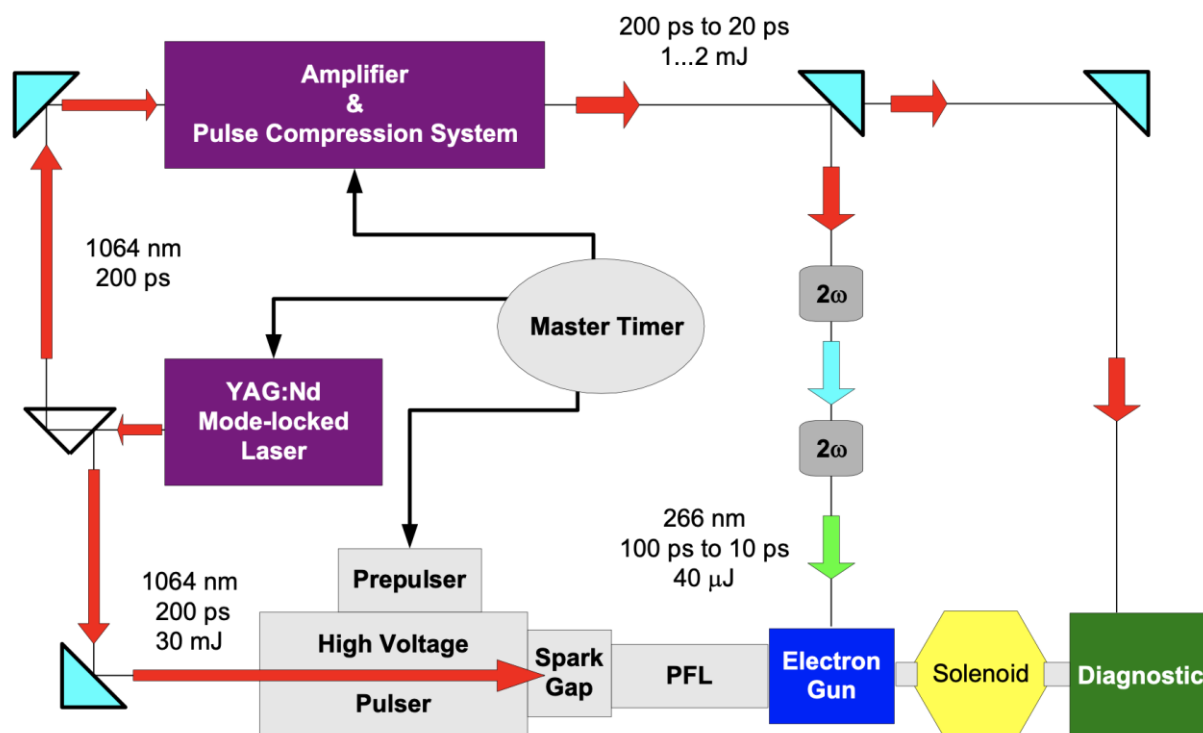


Рисунок 1.14.

Одна из главных идей, обеспечивающих успех разработки, состоит в использовании лазерного поджига жидкостного разрядника, при этом лазерный луч подавался вдоль оси высоковольтного трансформатора непосредственно в рабочую зону разрядника. Это решение позволило избежать больших потерь энергии лазерного импульса при прохождении через изоляторы и жидкую среду разрядника.

На рисунке 1.15 показана конструкция высоковольтного блока с импульсным трансформатором и каналами для лазерного луча. Импульсный трансформатор имеет первичную обмотку, состоящую из последовательно включенных накопительных конденсаторов с рабочим напряжением до 100 кВ, серийных разрядников и замыкающих медных шин.

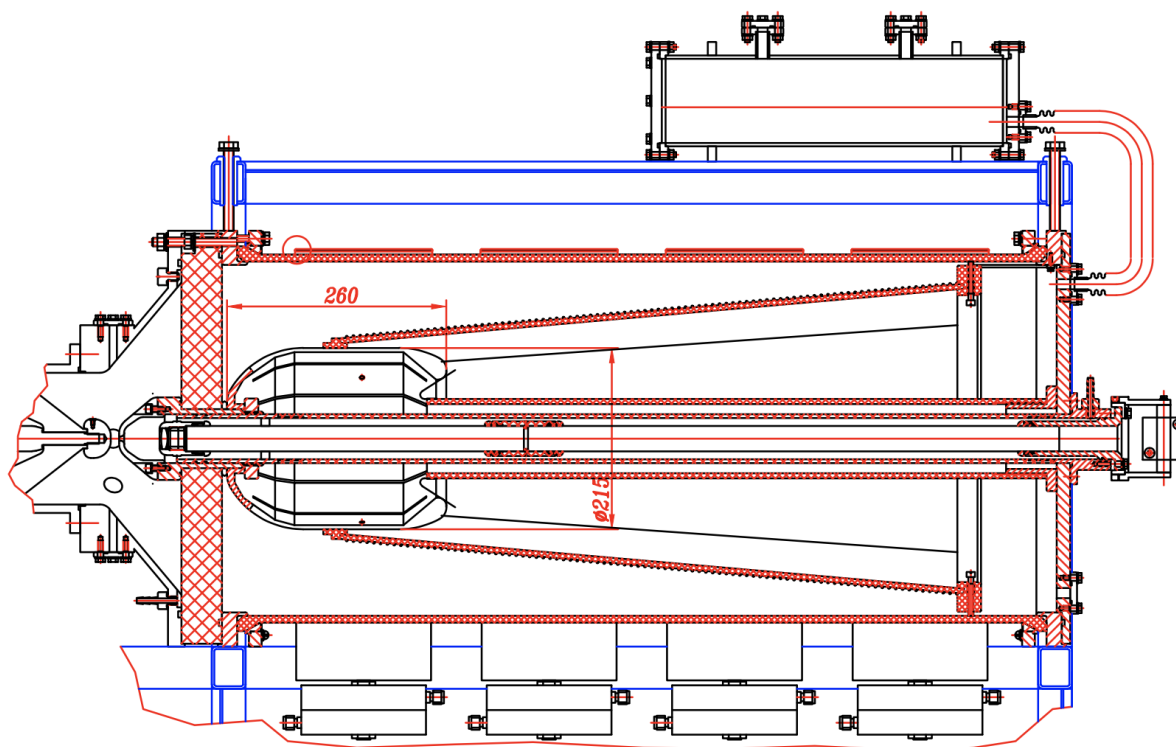


Рисунок 1.15.

Вторичная обмотка импульсного трансформатора намотана на конусный изолятор и рассчитана на напряжение до 5 МВ. Для высокой синхронности срабатывания серийных разрядников использовался специальный высоко стабильный генератор запуска с амплитудой 80 кВ, фронтом нарастания 15 нс и длительностью 50 нс. Первичная обмотка имела четыре параллельных контура с максимальным током 35 кА в каждом контуре.

Рабочее напряжение до 100 кВ на накопительные емкости подавалось от внешнего блока питания.

На выходе импульсного трансформатора формировался импульс напряжения длительностью 0,5 мкс, которой подавался на жидкостной разрядник. В качестве рабочей жидкости использовался карбогал. Лазерный луч поджига распространялся в стеклянном канале, расположенном внутри импульсного трансформатора и, проходя через отверстие в одном из

электродов разрядника, попадал в область высокого напряжения, созданного импульсным трансформатором.

После переключения жидкостного разрядника энергия из импульсного трансформатора поступала на вход передающей линии с переменным импедансом. Входной импеданс линии был 10 Ом, а на выходе импеданс линии был 160 Ом. Таким образом, имелась возможность трансформировать наносекундный импульс напряжения в 3÷4 раза по амплитуде. Амплитуда напряжения на выходе импульсного трансформатора была около 1,5 МВ, соответственно, на выходе передающей линии, на нагрузке 160 Ом, амплитуда напряжения достигала 5 МВ. Для измерения параметров выходных импульсов напряжения использовался емкостной делитель напряжения. Масса генератора составляет более тонны, габариты 3,0x1,5x1,5м.

#### **1.4. Разработки нано-пикосекундных ключей на основе SiC, GaAs**

При уменьшении амплитуды импульсов напряжения от мегавольтового уровня до киловольт или десятков киловольт значительно упрощаются проблемы высоковольтного пробоя в конструкциях генераторов и передающих трактах. Однако, сложность формирования импульсов напряжения длительностью около одной наносекунды остается по прежнему высокой.

Все основные рабочие параметры генераторов нано-пикосекундного диапазона определяются качеством выходных формирующих ключей.

Параметры многих силовых ключей рассмотрены в монографии [14]. Приведены конструкции и режимы работы газовых и жидкостных разрядников, ключей с оптическим запуском, а также высоковольтных приборов с запуском электронным пучком. Рассмотрены варианты многокаскадных разрядников низкого и высокого давления, а также с различными газовыми смесями. Приведены схемы построения генераторов на подобных ключах [14,15,17,18], однако очевидно, что подобные

технологии не имеют перспективы в индустриальном направлении, прежде всего из-за малого ресурса, больших масса-габаритов и невозможности обеспечить широкий круг требований к подобным генераторам.

В связи с этим в настоящее время основные усилия направлены на создание новых высоковольтных полупроводниковых ключей с наносекундным временем переключения и на разработку генераторов на их основе.

В работах [19] показана возможность создания дрейфовых диодов с резким восстановлением напряжения (ДДРВ) на основе карбид кремниевых диодов.

Проведены теоретические оценки использования этого полупроводникового материала для достижения наносекундных переключений при амплитудах порядка одного киловольта. Главное преимущество диодов на карбиде кремния в значительно большем электрическом поле лавинного пробоя, которое может быть около  $10^6$  В/см по сравнению с электрическим полем лавинного пробоя в кремнии  $2 \cdot 10^5$  В/см.

Из этих значений следует, что область объемного заряда в карбид кремниевом диоде, может быть, около десяти микрон при напряжении около одного киловольта и время восстановления полного напряжения теоретически может быть около 10 пикосекунд.

В работе [20,21] были созданы генераторы на карбид кремниевых диодах. На рисунке 1.16 показана осциллограмма выходного импульса напряжения с амплитудой около 10 кВ и фронтом около 1 нс. Полученный фронт нарастания на порядок хуже теоретических оценок.

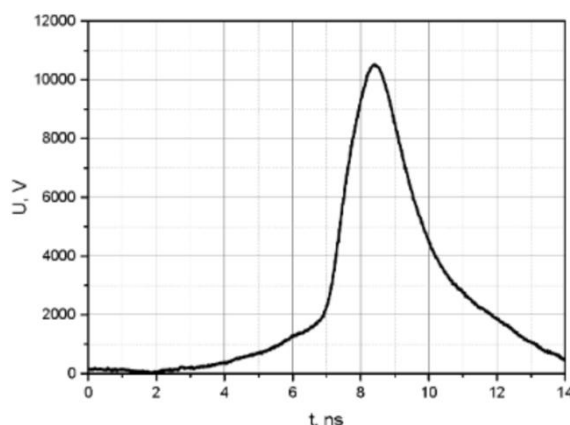


Fig. 4. Oscilloscope of the voltage pulse generated on 50 Ohm resistive load at switching of an 8-die stack of 4H-SiC DSRDs ( $U_{\max} = 10.5$  kV).

### Рисунок 1.16.

Существует несколько проблем, препятствующих реализации потенциала ДДРВ на полупроводниках SiC. Наиболее трудная из них — многократно более сложная технология создания p-n переходов на основе SiC. Другая сложность связана с малым временем жизни электронов и дырок в активной базе высоковольтных диодов.

Это ограничивает длительность фазы высокой обратной проводимости диодов и усложняет схемотехнические решения. Очевидно, что решение всех этих проблем требует значительных усилий многих научных коллективов.

Еще одним полупроводниковым материалом, пригодным для создания ключей на идеологии ДДРВ, является GaAs. Его главное преимущество перед кремнием — высокая подвижность электронов и более высокая рабочая температура. В работе [22] исследовались GaAs диоды, выращенные по технологии жидкофазной эпитаксии с полной толщиной p- и n-базы около 20 мкм и максимальным блокирующим напряжением около 200 В. Время жизни электронов и дырок в активной зоне диодов составляло 40-60 нс, что

позволило обеспечить длительность фазы высокой проводимости на уровне нескольких десятков наносекунд.

На основе созданных экспериментальных GaAs диодов был изготовлен и испытан генератор с амплитудой импульсов напряжения около 200 В и фронтом около 100 пс. Благодаря высокой рабочей температуре GaAs диодов максимальная частота повторения выходного импульса могла достигать 1 МГц.

### 1.5. Генераторы напряжения с фронтом 10-30 пс на туннельных диодах и диодах с накоплением заряда ДНЗ

При конструировании генераторов импульсов напряжения с фронтом на уровне 10-30 пс возможности достижения высоких напряжений кардинально уменьшаются. Фактически, известно два типа ключей с подобным быстродействием: туннельные диоды с возможным рабочим напряжением в доли вольта и диоды с накоплением заряда ДНЗ [54] с рабочим напряжением в несколько десятков вольт. Необходимо отметить, что ДНЗ являются низковольтным прототипом ДДРВ. Компания Picosecond Pulse Lab выпускает серию генераторов импульсов напряжения с короткими фронтами [55].

Одним из таких генераторов является модель TD1107C, в которой в качестве основного ключа используются туннельные диоды.

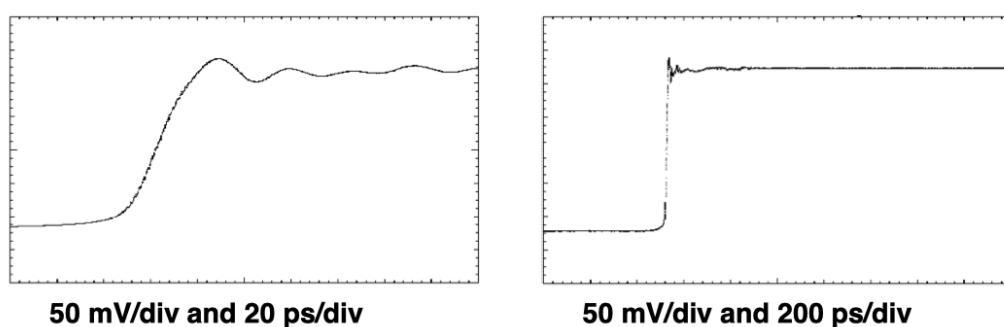


Рисунок 1.17

Максимальная амплитуда импульсов напряжения составляет 230 мВ, фронт нарастания 20-25 пс, нагрузка 50 Ом, частота следования импульсов до 50 кГц, рисунок 1.17.

Другой генератор Model 4015D изготовлен с использованием ДНЗ приборов. Амплитуда выходных импульсов составляет 5 В на нагрузке 50 Ом, фронт нарастания 12 пс. Осциллограмма выходного импульса показана на рисунке 1.18.

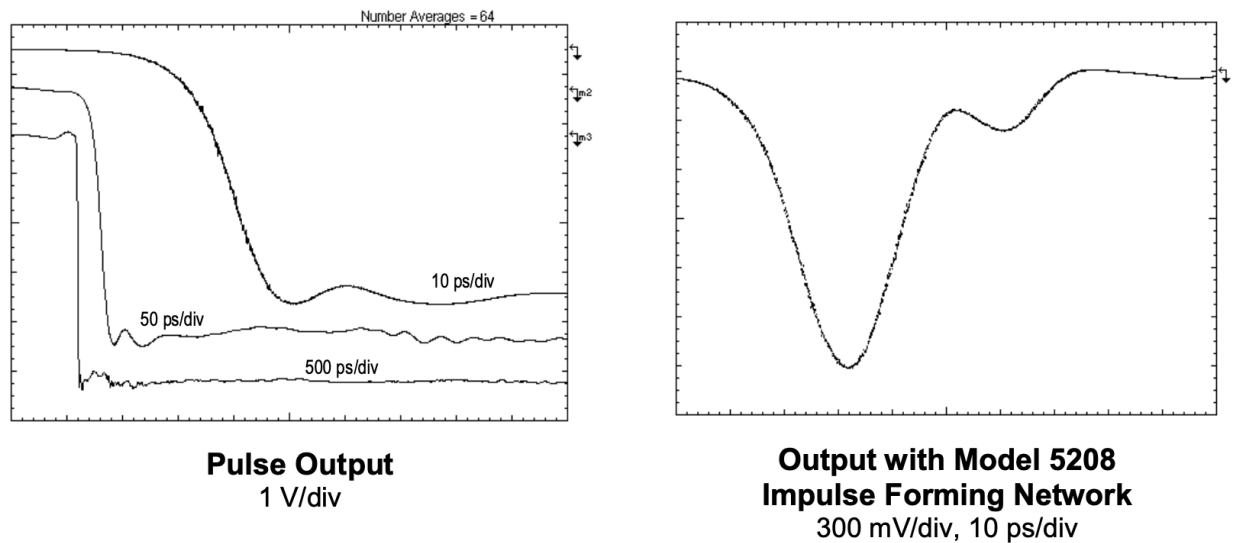


Рисунок 1.18.

Для уменьшения затухания сигналов и его дисперсии в передающих трактах ключевые приборы ДНЗ располагаются в специальных выносных головках, максимально приближенных к нагрузке. Формируемые импульсы напряжения могут иметь прямоугольную форму, а также форму колокола или трапеции.

Вторая известная компания TRIM, разработавшая пикосекундные генераторы на ДНЗ диодах, достигла максимальных амплитуд на уровне нескольких десятков вольт.

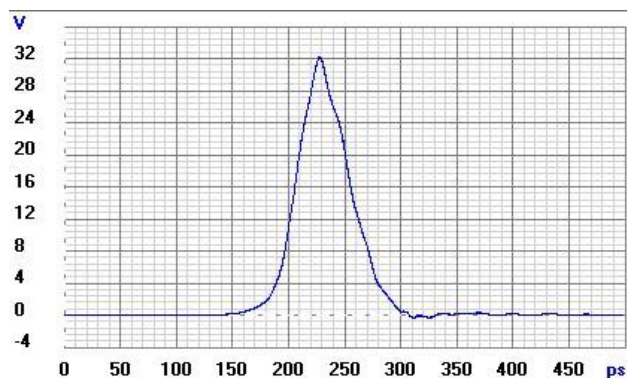


Рисунок 1.19.

На рисунке 1.19 показана осциллограмма выходного импульса напряжения с генератора TMG030030VP. Фронт нарастания импульсов составляет 30 пс при амплитуде 30 В. Максимальная частота следования импульсов напряжения составляет 100 МГц. Генераторы имеют цифровые блоки управления и используются, как правило, в различных калибровочных задачах и лабораторных экспериментах.

На рисунке 1.20 показаны осциллограммы перепада напряжения генератора TMG020040SN11.

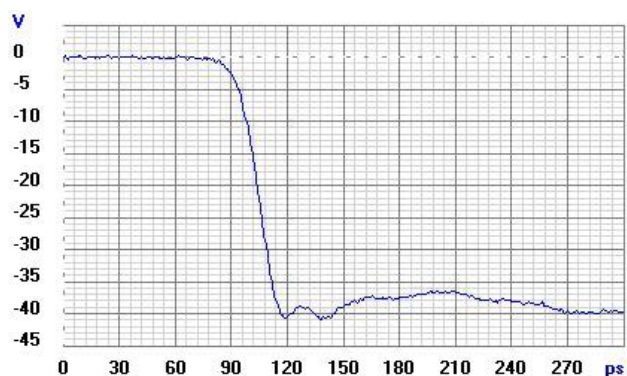


Рисунок 1.20.

В этой модели генератора достигнут фронт 20 пс при амплитуде 40 В. Неравномерность амплитуды на плоской части импульса составляет 6-8%, что является важным параметром для калибровочных задач.

Таким образом, можно констатировать, что максимально достигаемые амплитуды импульсов напряжения на традиционных ключах составляют десятки вольт при фронтах 20-30 пс. Ограничение амплитуды на этом уровне



определяется фундаментальными параметрами: напряжением лавинного пробоя р-п перехода и предельной скоростью движения электронов и дырок в полупроводниках.

### **1.6. Актуальность исследования происхождения СШП сигналов в атмосфере Земли**

Одно из важнейших применений мощных нано-пикосекундных импульсов напряжения, связано со сверхширокополосной радиолокацией СШП РЛ. СШП локация развивается по нескольким направлениям: локация высокого разрешения с опознаванием объектов, высокозащищенная связь, геолокация с больших высот и др. Во всех этих применениях важно знать влияние атмосферы на характеристики СШП электромагнитного импульса.

Исходя из этого актуальными являются исследования прохождения СШП сигналов в атмосфере Земли и в ионосфере на больших расстояниях в широком спектральном диапазоне. Необходимым условием для подобных работ является наличие пикосекундных генераторов с пиковой мощностью мегаваттного уровня, что было трудноразрешимой проблемой до разработок, выполненных в настоящей работе.

В ряде работ [22 – 28] рассмотрены общие вопросы прохождения электромагнитных импульсов радиочастотного диапазона в неоднородных и нелинейных средах. Опубликованные работы выявили искажения формы импульсов и их спектральных характеристик из-за внешних условий. Изменения происходят из-за поглощения и дисперсии, при распространении СШП сигнала, в свободной атмосфере вследствие резонансного воздействия паров воды и молекул кислорода, а также от загрязнения атмосферы, из-за дождя, облаков и т.д. [29 – 33]. В ионосфере СШП-импульсы деформируются из-за взаимодействия с электронами в замагниченной плазме [23, 34 – 41]. Рассмотрены также проблемы искажения импульсов при распространении вдоль земной поверхности, в том числе с растительностью [42 – 50].

Однако, экспериментальные исследования в этом направлении выполнены в малой части работ [42, 43, 48, 50, 51], причем большинство из них выполнено с узкополосными СВЧ сигналами, что является необходимым и полезным для понимания процессов резонансного поглощения и рассеяния в различных средах, но не дает полной уверенности в конечном результате.

Можно констатировать, что вопросы прохождения СШП-сигналов в атмосфере являются недостаточно изученными. Малое число и фрагментарность выполненных опытов с СШП сигналами препятствует надежному их использованию при новых технических разработках.

Три расчетные работы [31 - 33], основанные на учете изменения амплитуды спектральных линий СШП-сигналов при резонансном поглощении молекулами воздуха, показывают, что заметное искажение зависимости формы импульсов от времени начинается с длительностей около 50 пс и менее и дальностей 10 км и более. Такие длительности имеют значение для практических применений из-за относительно малых размеров апертур излучающих антенн и, в частности, пригодности для зондирования поверхностного покрова Земли с больших высот. Наиболее отчетливо результаты таких расчетов отражены на рисунке, приведенном в работе [33]. Начиная с расстояний 5-10 км заметны искажения, увеличивающие длительность фронта и длительность импульсов.

Общий подход к решению этих расчетных задач опирается на факт, что ширина полос спектра СШП превосходит ширину линий резонансного поглощения реальных атмосферных газов, поэтому поглощение и дисперсия приводят к изменению зависимости формы импульса от времени и его спектра. В предположении, что среда однородна (следовательно, диэлектрическая проницаемость и коэффициент поглощения не зависят от пройденного волной расстояния и являются функцией только частоты),

можно считать, что распространение каждой спектральной линии СШП-сигнала происходит независимо.

В работе [31] рассмотрен модельный СШП-импульс из двух полупериодов гармонического излучения длительностью 1 нс, распространяющийся в однородных нижних слоях атмосферы, спектр которых включает резонансные частоты вращательного спектра молекул газов. В результате решения задачи устанавливается сильное искажение формы СШП-сигнала с увеличением его полупериода на порядок.

В работе [32] изучается деформация СШП-импульса длительностью 10 пс применительно к задаче измерения толщины ледового покрова с высоты полета порядка сотни метров, на которой может обеспечиваться безопасное и длительное измерение параметров льда.

Наиболее близкой по решаемой в диссертации задаче является публикация [33].

Как показывает итоговый результат этой работы, показанный на рисунке 1.21, с увеличением дистанции заметны искажения СШП-сигналов длительностью 50 пс, увеличивающие длительность фронта и длительность импульсов на 20% на 5 км, на 40% на 10 км и более 50% на 20 км.

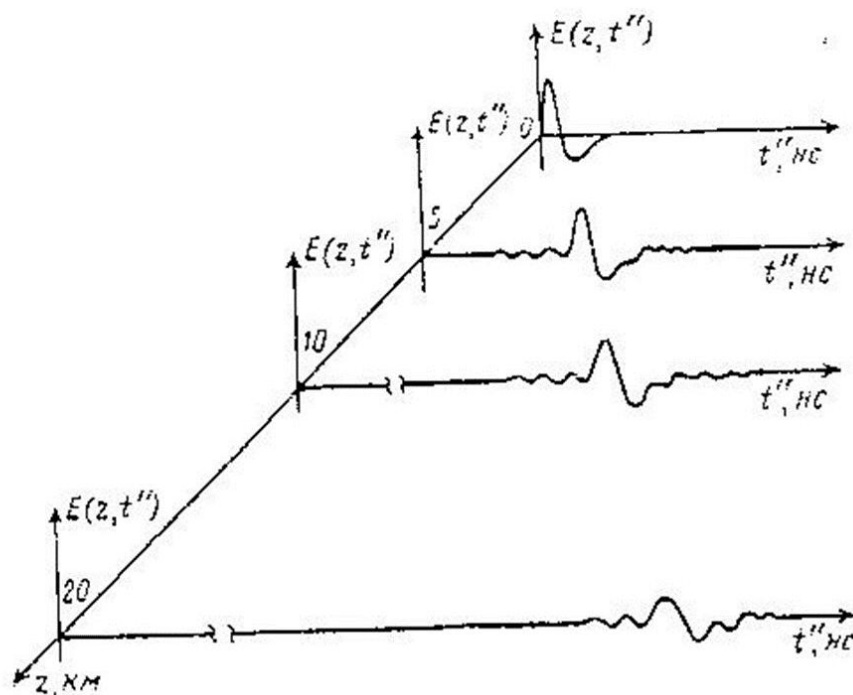


Рисунок 1.21 – Расчет деформации импульса длительностью 50 пс при прохождении им атмосферы Земли в зависимости от расстояния (результаты расчетов работы [33]).

Такое искажение импульсов в атмосфере влияет на интерпретацию результатов при практических применениях. Объяснение заметной деформации областью поглощения на частоте 22 ГГц, практически незаметной в спектре импульса длительностью 50 пс, кажется маловероятным.

Как уже указывалось, прямые эксперименты с использованием СШП импульсов в атмосфере ограничены отсутствием СШП источников сигналов необходимой мощности.

Неизвестны также какие-либо эксперименты по прохождению СШП-сигналов в ионосфере, хотя в теоретических работах [34 – 41] прогнозируются заметные воздействия из-за неоднородностей вдоль ионосферных трасс длиной в сотни километров.

Поэтому комплексные исследования прохождения СШП-сигналов в атмосфере (и в будущем в ионосфере Земли) могут дать четкий критерии по применению СШП-сигналов в новых технологиях.

Разработка в настоящей работе пикосекундных генераторов мегаваттной мощности позволило нескольким институтам (ОИВТ РАН, ИОФ имени Прохорова А.М. РАН, ВНИИЭФ) подготовить и провести прямой эксперимент с прохождением СШП сигналов на расстояние до 10 км и более.

Ключевым фактором в реализации такого эксперимента стало создание в данной работе серии генераторов с пиковой мощностью до 5 МВт и фронтом 40-50 пс.

### **Выводы и постановка задачи**

На основании проведенного обзора публикаций можно заключить, что для формирования высоковольтных наносекундных импульсов напряжения используется несколько типов ключей: газовые разрядники, разрядники с оптическим запуском, магнитные ключи, SOS диоды и кремниевые диодные обострители на ударных ионизационных волнах. С применением этой элементной базы созданы различные генераторы с длительностью импульсов напряжения от долей наносекунд до десятков и сотен наносекунд с амплитудами от десятков киловольт до нескольких мегавольт. Достигнуты средние мощности генераторов в десятки киловатт, а частоты повторения импульсов могут составлять десятки кГц. Однако все эти достижения недостаточны для использования подобных генераторов в различных типах радаров, ускорителей, лазеров и многих других высокотехнологичных применениях. Неразрешенные проблемы относятся, прежде всего, к недостаточной эффективности, и, как следствие, большим масса-габаритам генераторов. Принципиальное значение для многих применений является долговременная стабильность, малый джиттер и высокая точность регулировки амплитуды и выходной задержки импульсов. Все эти

требования трудновыполнимы на основе существующей технологии импульсных генераторов.

При длительностях импульсов напряжения 20-30 пс современные возможности импульсной техники ограничены амплитудой в несколько десятков вольт. Этот уровень амплитуд достаточен для задач калибровки передающих трактов в маломощных радарах, для накачки полупроводниковых лазеров с пиковой мощностью в доли ватт и для некоторых других применений. Однако в современных задачах локации, физики высоких энергий, медико-биологических применениях и многих других, требуются импульсные мощности от десятков мегаватт до сотен гигаватт. Фактически, можно констатировать, что многие направления развития науки и техники остановлены из-за отсутствия мощных пикосекундных генераторов.

Одна из задач локационной техники, не решенных до сих пор, является экспериментальное исследование прохождения сверхширокополосного сигнала через атмосферу Земли на большие расстояния. Подобная работа возможна только при наличии генератора с пиковой мощностью мегаваттного уровня и фронтом импульса напряжения 40-50 пс.

Целью настоящей работы является:

1. Разработка принципиальных схемотехнических решений для создания компактных высокоэффективных генераторов наносекундных импульсов напряжения с амплитудой до сотен киловольт с использованием нового поколения ФИД и ДДРВ ключей.
2. Разработка серии компактных высокостабильных генераторов прямоугольных наносекундных импульсов напряжения для ускорительной техники. Создание цифровых систем управления, способных корректировать параметры амплитуды и временных задержек при долговременной эксплуатации оборудования.

3. Достижение значения джиттера на уровне 20-30 пс для генераторов нано-пикосекундных импульсов с пиковой мощностью в десятки и сотни мегаватт.
4. Разработка принципиальных схемотехнических и конструктивных решений для создания генераторов нано-пикосекундного диапазона с пиковой мощностью от десятков киловатт до мегаваттного уровня, с частотой повторения до 15 мегагерц.
5. Разработка принципов суммирования высоковольтных наносекундных импульсов напряжения на частотах мегагерцового уровня.
6. Создание многоканальных высокостабильных генераторов пикосекундного диапазона и систем управления для умножения частоты следования излученных электромагнитных импульсов до частот 60-100 МГц.
7. Создание принципиально нового класса сверхмощных генераторов импульсов напряжения с длительностью 20-40 пс с использованием нового поколения ФИД и ДДРВ ключей.
8. Создание экспериментальной установки излучения и приема сигналов с длительностями 40-60 пс на основе нового генератора с амплитудой более 10 кВ.
9. Экспериментальное исследование процесса прохождения сверхширокополосного электромагнитного импульса через атмосферу Земли на расстояние более 10 км.

## **Глава 2. Компактные высокоэффективные генераторы наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии**

Анализ разработок высоковольтных генераторов нано-пикосекундного диапазона показывает возможность достижения импульсной мощности гигаваттного уровня, однако при этом вес установок составляет сотни килограмм, а характерные размеры достигают нескольких метров. Кроме того, имеются ограничения по средней частоте следования импульсов из-за перегрева силовых ключей и других элементов схемы. В конечном итоге потери ведут к низкому КПД. Особенно это критично при формировании импульсов длительностью менее одной наносекунды, где КПД становится менее 10%. Значительные потери в генераторах создают проблемы не только в достижении больших частот повторения и, соответственно, больших средних мощностей, но и к нестабильности амплитуды и формы импульса, а также к тепловому дрейфу задержки выходного импульса относительно импульсов синхронизации. Все это значительно ограничивает сферы применения подобных генераторов.

Решение отмеченных недостатков возможно при использовании качественно лучших силовых ключей и новых схематических решений. В настоящей главе рассмотрены несколько высоковольтных генераторов [56,57,58], в которых в качестве основных ключей используют ФИД и ДДРВ ключи, а схемы конечных силовых блоков построены с использованием индуктивных накопителей энергии с размыкающими ключами.

### **2.1. Компактный генератор наносекундных импульсов с амплитудой 500 кВ**

Основные технические требования к рассматриваемому генератору высоковольтных импульсов напряжения заключались в обеспечении амплитуды до 500 кВ на нагрузке в 100 Ом при максимально компактном размере. Длительность импульса составляла 20 нс по уровню половины



амплитуды, максимальная частота повторения импульсов 50 Гц. Исходя из обозначенных параметров была выработана схема формирования представленная на рисунке 2.1.

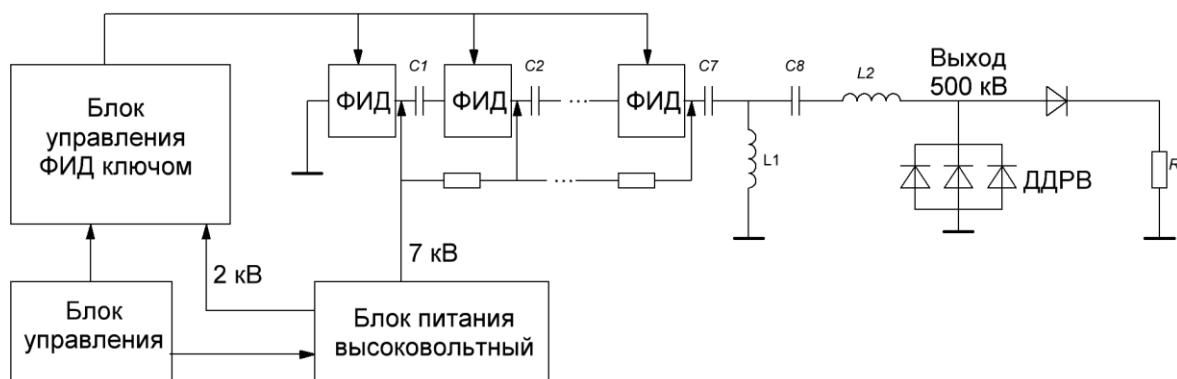


Рисунок 2.1 – Блок-схема генератора 500 кВ.

В начальный момент времени семь накопительных конденсаторов  $C_1-C_7$ , номиналом 200 нФ заряжаются до максимального напряжения 7 кВ от высоковольтного блока питания. Полная запасенная энергия составляет 35 Дж. Далее, от общего блока управления поступает импульс запуска на блок управления ФИД ключами, и происходит одновременное переключение всех семи ФИД ключей, собранных по схеме Аркадьева-Маркса.

Емкости  $C_1-C_7$ , индуктивности  $L_1, L_2$  выбраны таким образом, что в момент обрыва тока размыкающими ключами ДДРВ, вся энергия конденсаторов  $C_1-C_7$  оказываются в индуктивности  $L_2$ . Таким образом амплитуда напряжения на ДДРВ и, соответственно, на нагрузке определяется соотношением  $U = L_2 \frac{di}{dt}$ , а длительность импульса определяется параметром  $\tau = \frac{L_2}{R_n}$ .

В качестве основных силовых ключей в генераторе используются серийные ФИД ключи марки ФК 700 с рабочим напряжением 7 кВ, пиковым током 10 кА и временем переключения около 2 нс.

В качестве размыкающих ключей используются серийные ДДРВ ключи с рабочим напряжением 10 кВ, пиковым током около 1 кА и временем переключения около 2-3 нс. ДДРВ ключи собраны в высоковольтные столбы на 500 кВ. Высота сборки 150 мм. В генераторе использовались девять параллельных высоковольтных столбов. Общий объем, занимаемый, ДДРВ ключами составил примерно 500 см<sup>3</sup>.

Объем ключа ФК 700 составляет около 10 см<sup>3</sup> и мало влияет на общий размер генератора и его вес.

Силовые накопительные емкости  $C_1-C_7$  были собраны из малогабаритных керамических конденсаторов с параллельно-последовательным включением. Примерный размер емкости 200 нФ с рабочим напряжением 7 кВ составляет 90x50x30 мм.

Цифровой блок управления обеспечивает регулировку выходной амплитуды генератора в диапазоне 200-500 кВ, а также регулировку частоты следования импульсов от разовой до 50 Гц.

Для оптимизации параметров генератора применялось численное моделирование в программе SPICE симуляции.

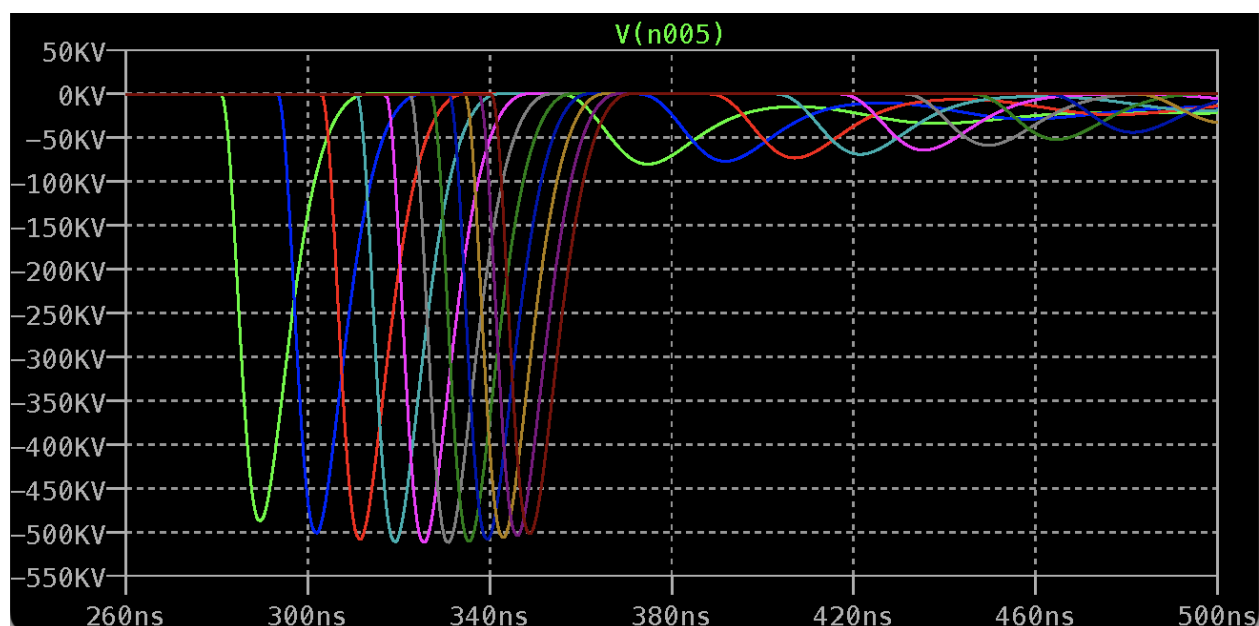


Рисунок 2.2 – Расчетное напряжение на нагрузке 100 Ом при различных соотношениях конденсаторов резонансного контура.

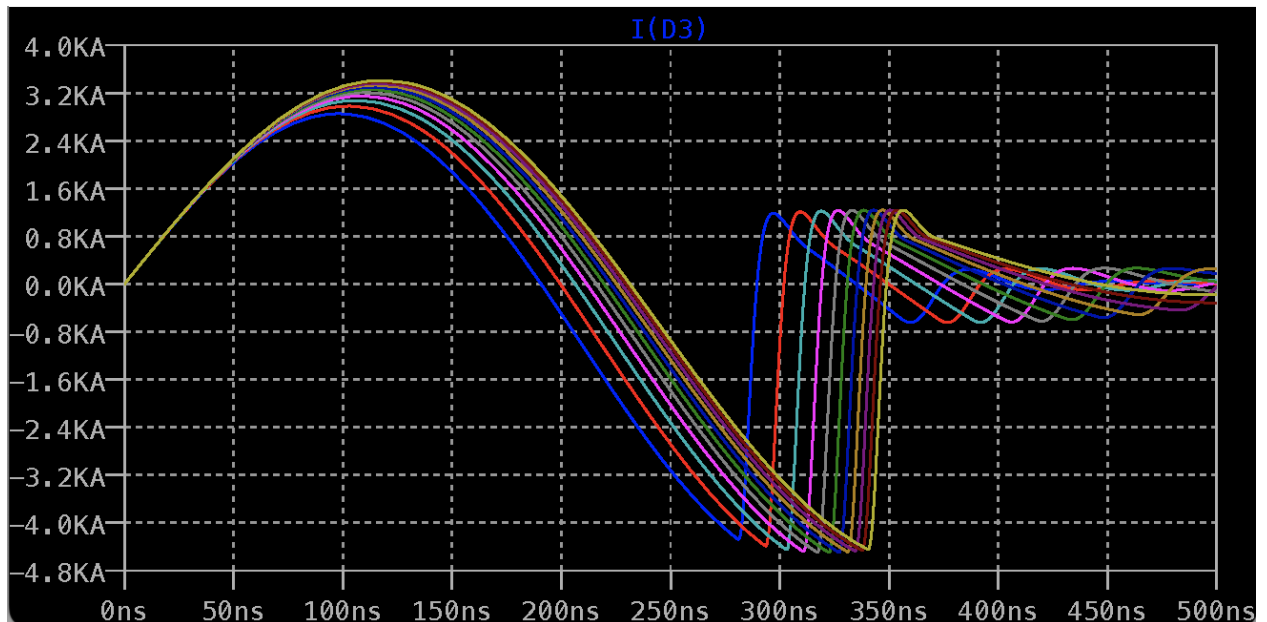


Рисунок 2.3 – Расчетная форма тока через диодную сборку ДДРВ при различных соотношениях конденсаторов резонансного контура.

На рисунке 2.2 и рисунке 2.3 приведены результаты расчета тока через ДДРВ ключи, а также расчетное напряжение на нагрузке 100 Ом. Конструктивно генератор выполнен в виде двух блоков: силового модуля, где размещена схема формирования с ФИД и ДДРВ ключами, и блока управления и питания.

На рисунке 2.4 показан общий вид силового генератора и осциллограмма выходного напряжения на активной нагрузке 100 Ом. Фронт импульса напряжения составляет около 5 нс при амплитуде 500 кВ.



Рисунок 2.4.

Для измерения выходных импульсов напряжения был разработан резистивный аттенюатор с коэффициентом деления 1:100 и полосой пропускания около 500 МГц.

Габаритные размеры силового блока генератора 500x400x250 мм. Вес, с полной заливкой трансформаторным маслом составляет около 50 кг. Блок управления и блок питания генератора помещен в стандартный корпус размером 480x500x180 мм и весом около 20 кг.

Для функционирования генератора на силовой модуль от блоков управления и питания по коаксиальным кабелям подается силовое напряжение 7 кВ и 2 кВ, и импульс запуска амплитудой около 500 В длительностью 100 нс. Полный КПД генератора составляет 70%.

## **2.2. Высоковольтные высокостабильные генераторы наносекундных импульсов для применений в отклоняющих системах ускорителей**

В современных высокотехнологичных системах, таких как ускорители, лазеры, локаторы и т.д., значение максимальной амплитуды и длительности фронта импульса напряжения являются лишь начальным набором параметров, предъявляемых к генераторам высоковольтных наносекундных импульсов напряжения. Рассмотрим подробную спецификацию к генератору высоковольтных наносекундных импульсов, установленную одним из ускорительных синхротронных центров.

В таб. 2.1 представлен перечень всех параметров, необходимых в работе высоковольтного наносекундного кикера ускорителя.

Параметр	Величина
Максимальная амплитуда на нагрузке 50 Ом	27 кВ
Диапазон регулировки амплитуды	5-27 кВ с шагом 10 В
Полярность импульсов напряжения	Положительная и отрицательная
Длительность переднего фронта	2,5-3,5 нс
Максимальная длительность импульса по уровню 0,1 от максимальной амплитуды	16,9 нс
Однородность полки	10% от пика до пика

Отклонение амплитуды от импульса к импульсу	0,01
Максимальное значение амплитуды до и после импульсов $\pm 11,2$ нс от центра формируемого импульса	$\pm 2,5$ % от действующего значения
Запуск генератора	Внутренний, внешний 5 В, 100 нс
Пакетный режим	324 импульса на частоте 1 кГц
Режим работы	6000 часов в год на рабочей частоте 0,2 Гц
Временной джиттер относительно внешнего импульса запуска	50 пс RMS
Задержка выходного импульса напряжения относительно внешнего импульса запуска	Не более 1 мкс
Интерфейс управления	RS-232
Требование по выходу на рабочие параметры после включения	Все параметры включения дрейф задержек и джиттер должны отвечать спецификации после 0,5 часа после включения

Таб. 2.1. Таблица параметров генератора 27кВ

Анализ представленных в таблице данных показывает высокий уровень требований к долговременной стабильности, стабильности амплитуды и практически полному отсутствию пред-импульсов и после-импульсов относительно основного импульса напряжения. Учитывая это, при разработке схемы генератора необходимо особое внимание уделить стабильности блоков питания и возможности блока управления отслеживать и компенсировать изменение задержек между разными функциональными блоками.

### **2.3. Функциональная блок схема высокостабильного генератора наносекундных импульсов напряжения**

Для формирования выходного импульса напряжения с длительностью 16 нс в качестве базовой принимается схема с размыкающим ключом ДДРВ и индуктивным накопителем энергии в виде формирующей линии, рисунке 2.5.

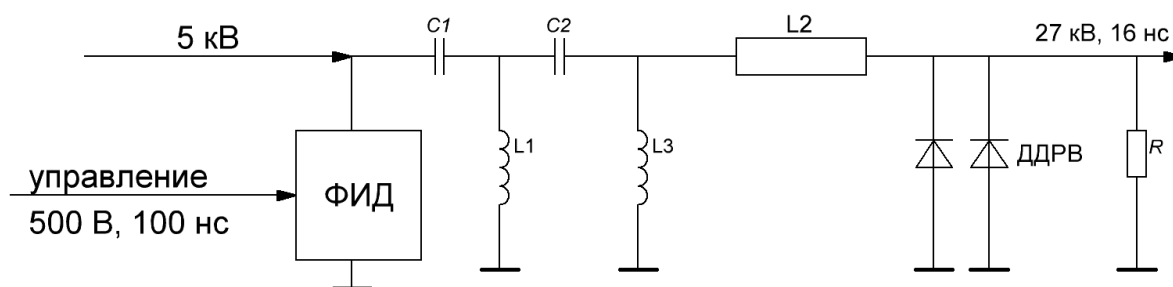


Рисунок 2.5.

В качестве основного силового ключа используется серийный ФИД ключ марки ФД 700 с максимальным рабочим напряжением 7 кВ и пиковым током 10 кА. Начальная энергия накоплена в конденсаторе  $C_1=20$  нФ, при максимальном напряжении 5 кВ. При подаче на ФИД импульса управления силовой прибор переключается примерно за 2 нс, и в схеме начинают протекать токи в нескольких колебательных контурах:  $C_1L_1$ ,  $C_1C_2L_3$ ,  $C_1C_2L_2$ . Параметры контуров подбираются таким образом, чтобы в конечном итоге вся энергия из конденсатора  $C_1$  попала в индуктивность формирующей линии  $L_2$ . В качестве формирующей линии  $L_2$  используется отрезок коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом, длиной 1 м, имеющий индуктивность 250 нГн.

Длина кабеля определяет длительность импульса выходного напряжения в 10 нс по уровню 90% от максимального значения амплитуды. Параметры всех элементов схемы оптимизируются при численном моделировании ее функционирования.

Принципиально важная роль в формировании качественного выходного импульса напряжения принадлежит используемым ДДРВ ключам. Для уменьшения возможных пьедесталов пред- и после-импульсов применяются ДДРВ приборы с малым падением напряжения в течение фазы высокой проводимости. Обеспечиваются рабочие токи ключей на уровне 50% от максимально возможных. Также используется последовательная сборка с

рабочим напряжением на 30% больше выходной амплитуды импульса напряжения. Все эти меры в итоге позволяют добиться высокой стабильности и надежности работы силового блока генератора.

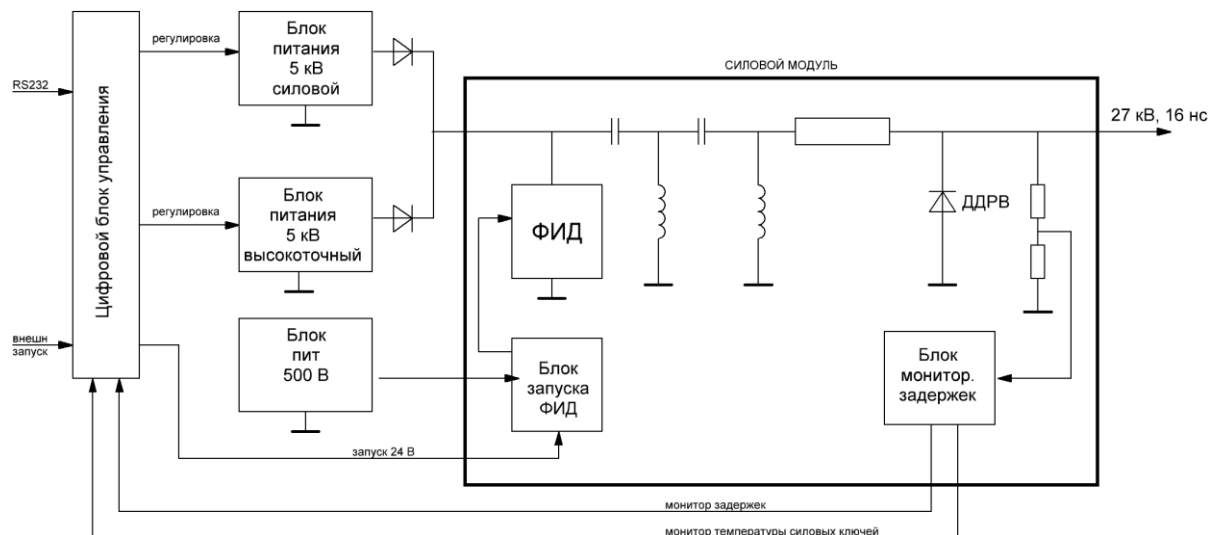


Рисунок 2.6

На рисунке 2.6 представлена полная функциональная блок схема генератора. В отдельном герметичном модуле располагается основная силовая схема формирования выходного импульса напряжения, включая ФИД ключ, ДДРВ, а также блок запуска ФИД ключа, который обеспечивает формирование импульса амплитудой 500 В. В силовом модуле также расположен блок мониторинга задержки выходного импульса относительно внешнего импульса запуска. Этот же блок обеспечивает мониторинг температуры силового модуля.

Питание силового модуля обеспечивают три блока питания. Два блока имеют максимально рабочее напряжение 5 кВ. Первый из них обеспечивает основную среднюю мощность необходимую, в том числе в пакетном режиме на уровне 300 Вт. Второй блок, имея меньшую среднюю мощность, поддерживает высокую стабильность общего напряжения 5 кВ. Третий блок питания обеспечивает питание блока запуска ФИД ключом.



Блок мониторинга вырабатывает сигнал обратной связи для блока управления, что обеспечивает корректировку задержки импульса запуска, идущего к блоку запуска ФИД ключа. В конечном итоге момент включения ФИД ключа определяет положение выходного импульса напряжения относительно внешнего импульса запуска.

Блок управления контролирует работу блоков питания, в том числе обеспечивает регулировку амплитуды выходного импульса напряжения.

Блок управления имеет так же вход RS232 через который возможен удаленный контроль амплитуды импульса напряжения, частоты следования импульсов напряжения, включение и выключение генератора, а также корректировка задержки выходного импульса напряжения относительно импульса запуска. Генератор рассчитан на работу от сети 110В, 60 Гц до 240 В, 50 Гц. Общий вид генератора представлен на рисунке 2.7. Его габариты 480x500x180 мм, вес около 50 кг.



Рисунок 2.7

#### **2.4. Тестирование рабочих параметров высокостабильного генератора наносекундных импульсов напряжения.**

Тестирование генератора наносекундных импульсов напряжения с амплитудой около 30 кВ требует, прежде всего, наличие аттенюатора,

соответствующего рабочему напряжению с рабочей полосой не менее 500 МГц. Подобные высоковольтные аттенюаторы отсутствуют на свободном рынке, поэтому был разработан и изготовлен аттенюатор с полосой пропускания 1 ГГц и допустимым рабочим напряжением 3 кВ. На рисунке 2.8 показан внешний вид аттенюаторов 30 кВ. На рисунке 2.9 показан тестовый импульс субнаносекундного перепада напряжения и импульс, прошедший через аттенюатор.

На рисунке рисунке 2.9 представлена осциллограмма с наложением импульсов от эталонного генератора И1-15, полученная с использованием калибруемого аттенюатора (зеленая линия) и с использованием образцового аттенюатора (синяя линия).



Рисунок 2.8.

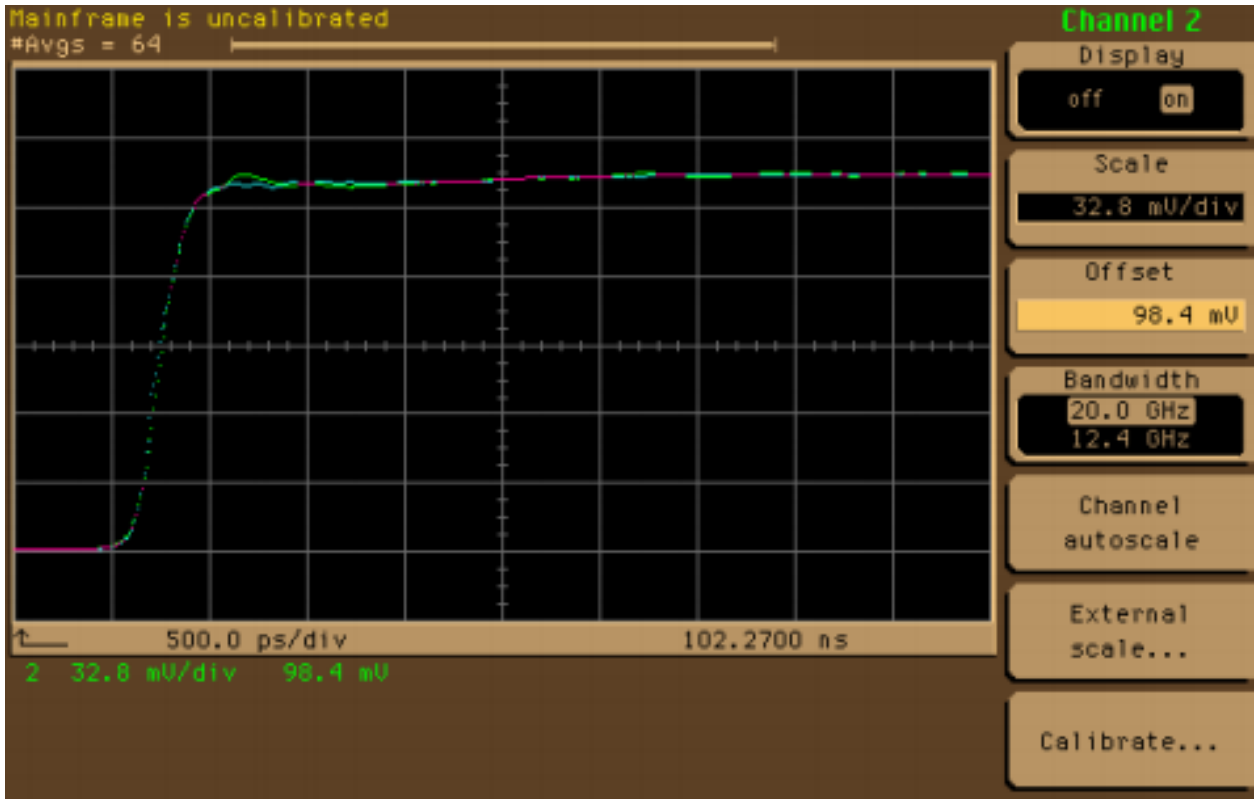


Рисунок 2.9.

Дополнительно для тестирования использовались аттенюаторы Weinschel с полосой пропускания до 18 ГГц. В экспериментах так же использовались цифровые осциллографы Tektronix с полосой 6-12 ГГц.

Блок схема установки тестирования высоковольтного генератора представлена на рисунке 2.10.

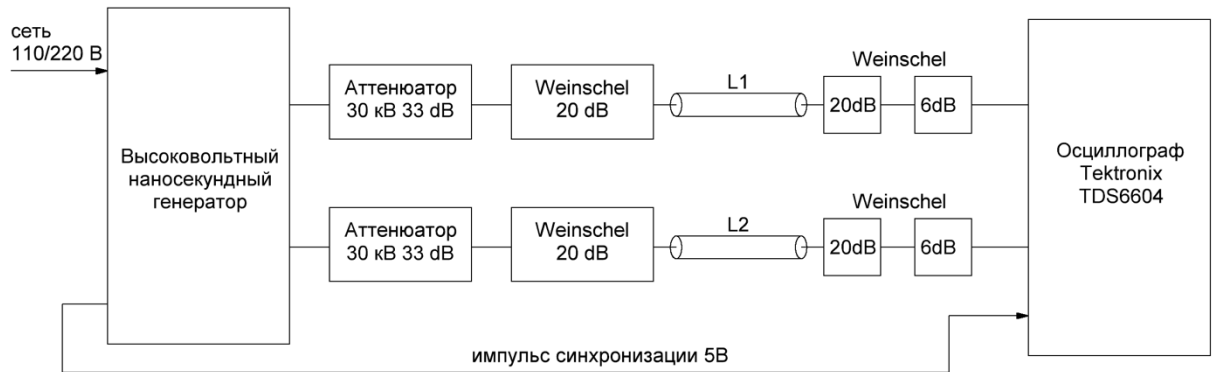


Рисунок 2.10 – Схема тестирования двухканального генератора 27 кВ.

Тестировался двухканальный генератор, имеющий на выходе импульсы напряжения положительной и отрицательной полярности, во всех рабочих режимах, необходимых при эксплуатации на ускорителе.

Оба выхода генератора были подключены на высоковольтные аттенюаторы, которые одновременно выполняли роль нагрузок 50 Ом. Коэффициент ослабления высоковольтных аттенюаторов составил 33 dB, в связи с этим на выходе амплитуда импульса напряжения могла быть более 500 В. Поэтому вторыми подключались аттенюаторы Weinschel 20 dB мощностью 10 Вт. Для подключения генератора к осциллографу использовались стандартные коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 50 Ом. На входе осциллографов были подключены два аттенюатора 20 dB и 6 dB. Эти аттенюаторы ослабляли рабочий импульс напряжения до уровня менее 2 В и одновременно защищали вход осциллографа от радиочастотных помех, возникающих при работе генератора.

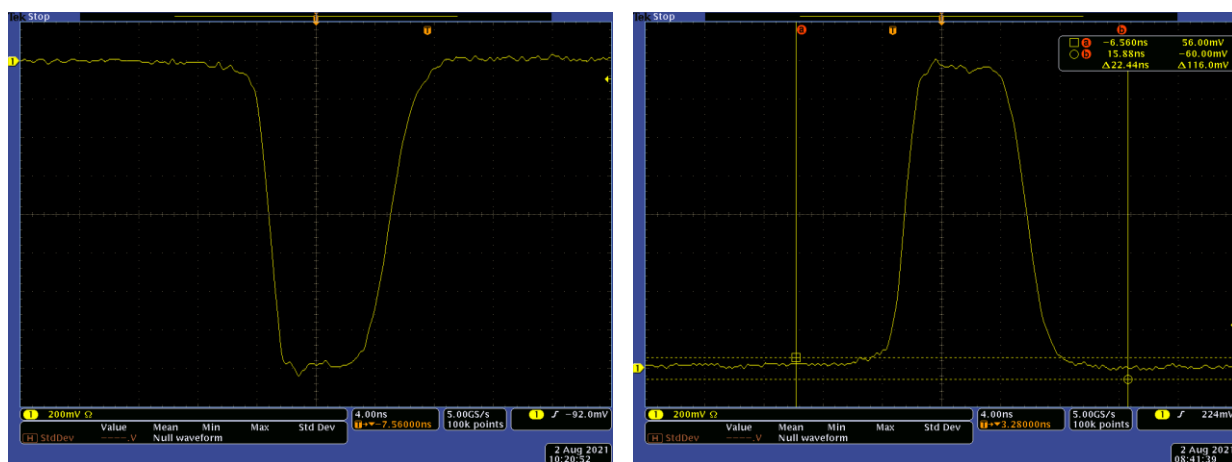
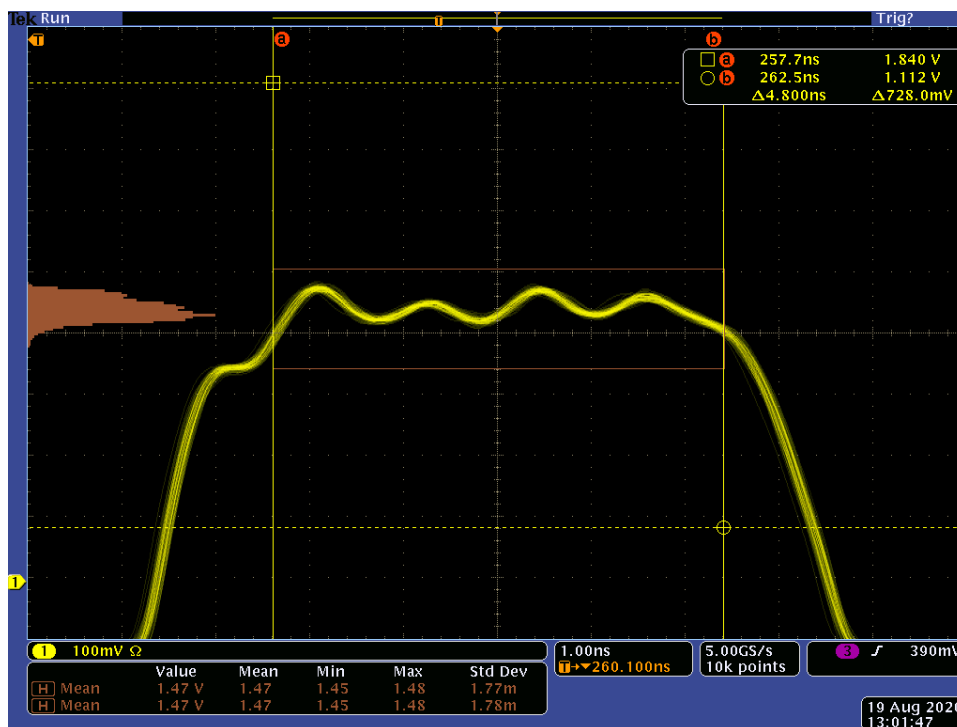


Рисунок 2.11.

На рисунке 2.11 показаны осциллограммы положительной и отрицательной полярности при максимальной амплитуде 27,5 кВ. Фронт нарастания у обоих импульсов около 2 нс, длительность полки на уровне 90% около 6 нс, спад заднего фронта около 4 нс, длительность импульсов

напряжения на уровне 10% от максимальной амплитуды около 12 нс. Все достигнутые параметры соответствуют требованиям технического задания. Так же можно видеть высокое совпадение формы положительного и отрицательного импульсов напряжения, что важно для работы кикеров



ускорителей.

Рисунок 2.12

На рисунке 2.12 показаны осциллограммы верхних частей импульсов напряжения положительной полярности вместе с гистограммами отклонения значений амплитуды от импульса к импульсу. Измерение показывают, что стандартные отклонения 1,78 мВ, что с учетом коэффициента деления 18000 составляет 22,4 В от реальной амплитуды 27 кВ.

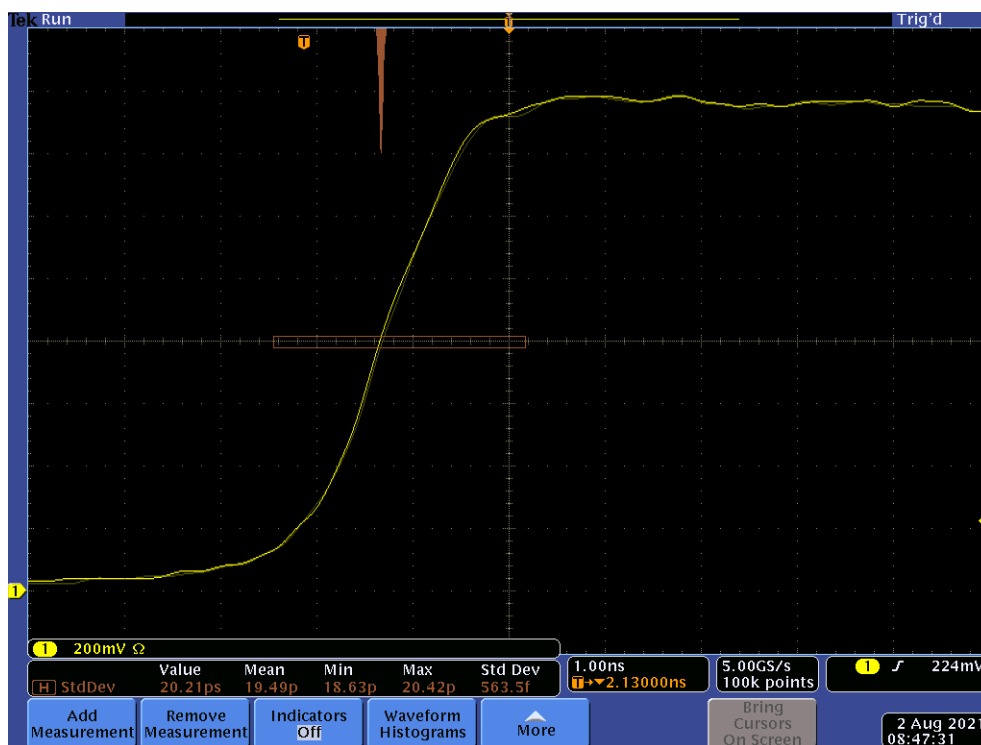


Рисунок 2.13

На рисунке 2.13 представлены результаты измерения джиттера выходного импульса напряжения относительно импульса запуска генератора. Для синхронизации осциллографа с генератором использовался специальный импульс синхронизации, связанный с импульсом запуска генератора. Полная задержка от начала импульса запуска до переднего фронта выходного импульса напряжения составила 275 нс. Гистограмма задержки, показанная на рисунке 2.13 дает среднеквадратичное значение 19.49 пс. Этот результат значительно лучше требований, определенных в техническом задании.

### **Глава 3. Высокочастотные нано-пикосекундные генераторы с частотой повторения импульсов в диапазоне более 1МГц**

Актуальной задачей для множества прикладных применений является создание и применение нано-пикосекундных генераторов с высокой частотой повторения импульсов. Требуемый режим повторения генерации может быть как постоянным, так и пачечным, со значительной скважностью. Для ряда применений, например, в ускорительной технике, на выходные параметры генераторов могут накладываться дополнительные требования: высокая стабильность повторения формы от импульса к импульсу, высокая стабильность задержки от импульса запуска до выходного импульса, возможность синхронизации нескольких каналов генерации с субнаносекундной точностью.

При частоте повторения импульсов от 1МГц и выше, и амплитуде импульсов от сотен вольт до десятков киловольт, средняя мощность на нагрузке (как правило, 50 Ом) может составлять от десятков ватт до нескольких киловатт. В таких условиях проблемы температурного режима силовых элементов могут быть существенными. Это выдвигает высокие требования к эффективности генерации как с точки зрения схемотехники, так и в отношении полупроводниковых ключей, элементной базы, технологических и конструктивных решений, применяемых в подобных генераторах.

Для решения проблем теплового режима высокочастотных генераторов на основе индуктивных накопителей требуется использовать специальную схемотехнику, а также высокоэффективные ДДРВ ключи, оптимальную элементную базу, специальные технологические решения. В этой главе будут рассмотрены генераторы, обеспечивающие непрерывную генерацию с частотой повторения импульсов от 1МГц до 15 МГц, обладающие высоким КПД на уровне более 70%.

### 3.1. Высокоэффективный высокочастотный четырехканальный генератор с субнаносекундными фронтами и максимальной частотой повторения 15 МГц

Для различных задач лабораторного тестирования электронного оборудования был разработан четырехканальный генератор ГИН05-15М-4К с амплитудой выходного импульса 600 В, фронтом 150-200 пс и частотой повторения 15 МГц. В таб. 3.1 приведены параметры генератора ГИН05-15М-4К.

Параметр	Величина
Количество выходных каналов	4
Максимальная амплитуда на нагрузке 50 Ом	600 В
Полярность импульсов напряжения	Положительная
Длительность переднего фронта	150-200 пс
Максимальная длительность импульса по уровню 0,5 от максимальной амплитуды	250-300 пс
Максимальная частота повторения, непрерывно	15 МГц
Запуск генератора	Внешний, 5 В, 20 нс
Временной джиттер относительно внешнего импульса запуска	RMS, менее 10 пс
Габариты	290 x 230 x 70 мм

Таб. 3.1. Параметры генератора ГИН05-15М-4К.

Генерация субнаносекундных импульсов с высокой частотой повторения с использованием индуктивного выходного накопителя энергии и размыкающего ключа ДДРВ обладает преимуществом простоты технологического и конструктивного исполнения выходной силовой части генератора. В тоже время, использование в подобном генераторе сложных резонансных контуров для передачи энергии из начальной цепи питания в выходной накопитель ведет к возникновению неустойчивости работы схем



на высокой частоте повторения. Это связано с колебаниями остаточной энергии в емкостных и индуктивных элементах резонансных контуров уже после момента размыкания основного силового ДДРВ ключа. Поскольку время, отведенное схеме формирования выходного импульса, составляет менее 100 нс, демпфировать остаточную энергию за такое короткое время сложно.

В качестве решения была разработана и применена высокочастотная схема формирования выходного импульса с применением индуктивного накопителя энергии и размыкающего ключа ДДРВ. В патенте [59] подробно описаны принципы работы и преимущества различных вариантов этого решения. На рисунке 3.1 приведен один из вариантов схемы, особенностью которой является использование только одного индуктивного элемента  $L_1$ , выходного накопителя энергии.

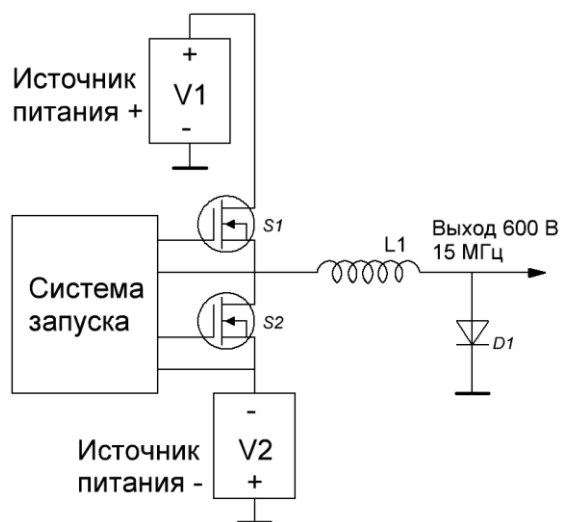


Рисунок 3.1.

Схема является двух-ключевой, четырехфазной. Во время первой фазы ключ  $S_1$  подключает источник напряжения  $V_1$  к индуктивности  $L_1$ , происходит закачивание заряда в выходной ключ ДДРВ  $D_1$ . Далее следует вторая фаза, во время которой длится пауза между выключением ключа  $S_1$  и

включением ключа  $S_2$ . Пауза выполняет две функции: защита ключей  $S_1$  и  $S_2$  от протекания сквозного тока, а также перенаправление протекания тока с его уменьшением до нуля, для создания выгодных условий последующего включения ключа  $S_2$ .

Во время третьей фазы ключ  $S_2$  подключает источник напряжения  $V_2$  к индуктивности  $L_1$ , обеспечивая откачку заряда из ДДРВ, вплоть до момента резкого восстановления р-п перехода рабочего прибора. После размыкания ключа ДДРВ наступает четвертая фаза работы схемы, в течение которой происходит передача энергии из индуктивного накопителя в нагрузку.

Значительным преимуществом использованной схемы является отсутствие резонансных контуров для передачи энергии из емкостных накопителей в выходной индуктивный контур. Энергия циркулирует только между источниками напряжения и выходным индуктивным накопителем. Более того, элементы схемы, включая паразитные, отдают остаточную энергию или в один из источников напряжения, или в нагрузку, в зависимости от состояния ключей и прибора ДДРВ. В результате обеспечивается очень высокая скорость релаксации схемы в первоначальное состояние после генерации высоковольтного импульса.



Рисунок 3.2.

Генератор ГИН05-15М-4К выполнен в виде 4-х канального модуля с воздушным охлаждением, предусмотрен индивидуальный внешний запуск каналов генератора. На рисунке 3.2 показана форма импульса генератора.

При использовании в качестве нагрузки антенной системы из четырех рупоров с помощью внешней системы запуска возможна точная синхронизация излученных электромагнитных импульсов с целью суммирования электрических полей отдельных каналов.

Еще одной возможностью применения генератора ГИН05-15М-4К является формирование электромагнитных импульсов излучения с частотой повторения до четырех раз выше номинальной частоты повторения 15 МГц. С помощью внешней системы запуска возможен запуск отдельных каналов с задержкой друг относительно друга в четверть периода базовой частоты следования. В результате возможно формирование излучения с эффективной частотой повторения 60 МГц.

Внешний вид генератора показан на рис. 3.3.



Рисунок 3.3.

### 3.2. Мощный высокоэффективный высокочастотный генератор с амплитудой 10 кВ на нагрузке 75 Ом и максимальной частотой повторения 1 МГц

Для проведения экспериментов в области физики плазмы была разработана серия мощных генераторов с амплитудой до 10кВ и максимальной частотой повторения от 1МГц до 3МГц. Внешний вид и осциллограмма выходного импульса одного из таких генераторов ГИН10-1М, с амплитудой выходного импульса 10 кВ на нагрузке 75 Ом, фронтом 1-1.2 нс и частотой повторения 1 МГц показаны на рисунке 3.4. Параметры генератора приведены в таб. 3.

Средняя выходная мощность генератора ГИН10-1М на нагрузке 75 Ом составляет примерно 3500 Вт. При КПД генератора 60-70% тепловая мощность, выделяемая на ключевых элементах, составляет 1500-2000 Вт. Для обеспечения приемлемых тепловых режимов составных частей генератор строился по схеме суммирования амплитуды большого количества каналов в общем выходном тракте. На рисунке 3.5 показана блок-схема генератора ГИН10-1М. Было применено амплитудное суммирование 24-х внутренних каналов генератора.

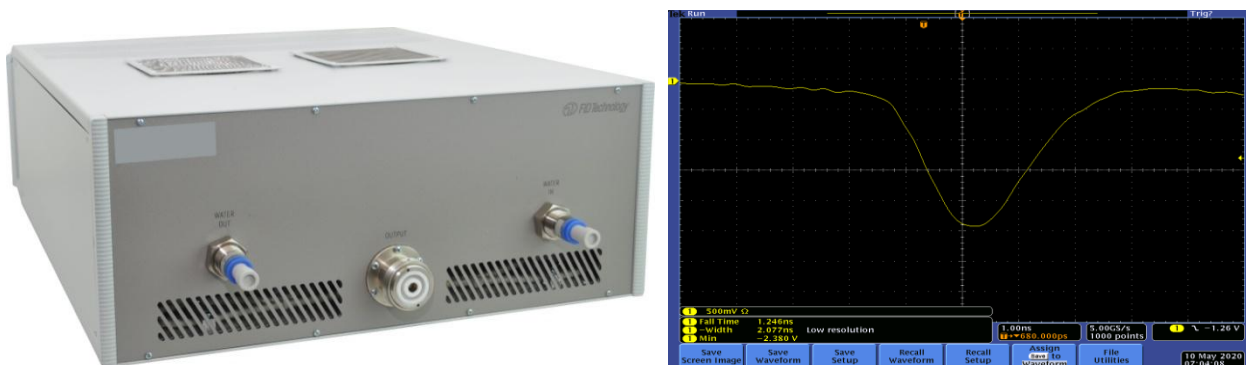


Рисунок 3.4.

Параметр	Величина
Максимальная амплитуда на нагрузке 75 Ом	10 кВ
Полярность импульсов напряжения	Положительная
Длительность переднего фронта	1-1.2 нс
Максимальная длительность импульса по уровню 0,5 от максимальной амплитуды	2-2.5 нс
Максимальная частота повторения, непрерывно	1 МГц
Запуск генератора	Внутренний, внешний, 5 В, 20 нс
Временной джиттер относительно внешнего импульса запуска	RMS, менее 10 пс
Охлаждение	Жидкостное
Потребляемая мощность	Не более 5 кВт
Габариты	480 x 500 x 170 мм

Таб. 3.2. Параметры генератора ГИН10-1М.

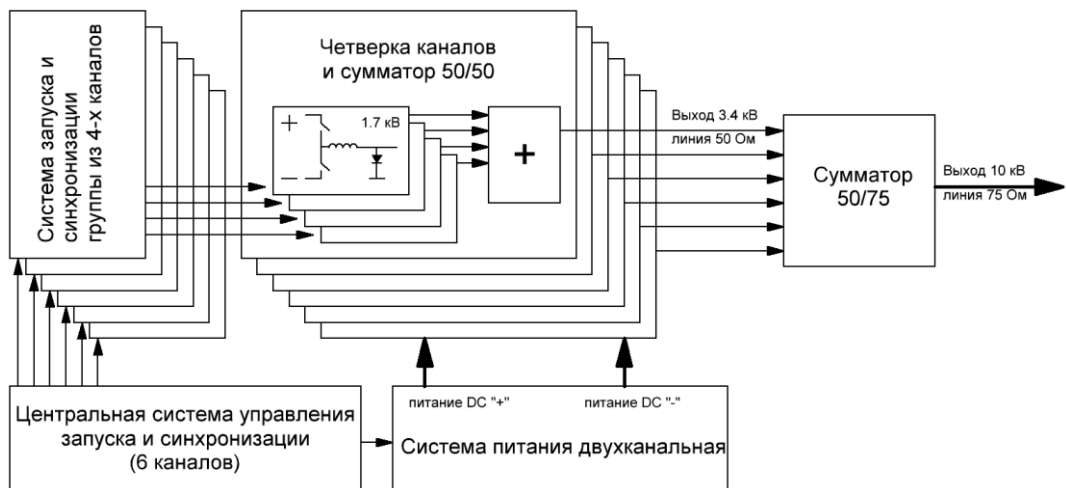


Рисунок 3.5

Внутренние каналы генератора представляют собой генераторы высоковольтных импульсов с фронтом нарастания 1-1.2 нс и длительностью импульса 2-2.5 нс, настроены на работу на линию с волновым

сопротивлением 50 Ом и обеспечивают выходную амплитуду на нагрузке 1.7-1.8 кВ.

Схемотехнически внутренние каналы генератора были построены по двухключевой схеме, используемой в генераторе ГИН05-15М-4К, см. рисунок 3.1. Составные каналы были сгруппированы в четверки, соответственно, было проведено суммирование по четверкам каналов в соответствии со схемой, показанной на рисунке 3.6.

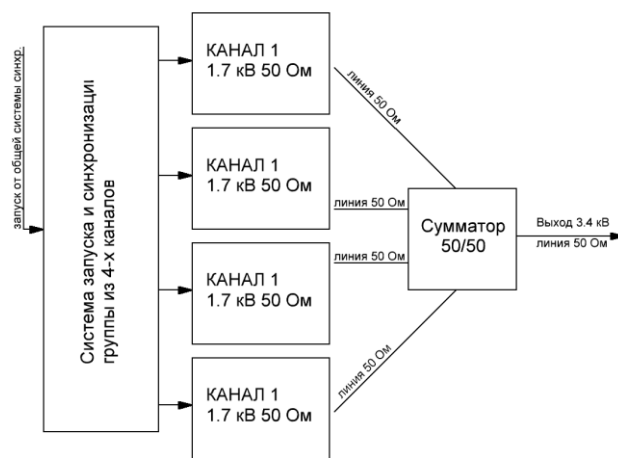


Рисунок 3.6.

Сумматоры, используемые для сложения четверок элементарных каналов, выполнены в виде кабельных сборок на кабелях с фторопластовой изоляцией с волновым сопротивлением 50 Ом. Применялось параллельно-последовательное соединение «2 пар. x 2 посл.» четырех кабелей. На выходе сумматоров формировался высоковольтный импульс с амплитудой 3.3-3.5 кВ на линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Дополнительно кабели прокладывались через ферритовые развязывающие сердечники для уменьшения взаимного влияния суммируемых каналов. Ввиду большой средней мощности каналов ферритовые сердечники монтировались на радиатор с жидкостным охлаждением.

Таким образом были получены шесть каналов с амплитудой 3.3-3.5 кВ на нагрузке 50 Ом, и к этим каналам было применено амплитудное

суммирование, показанное на рис. 29. Применялось параллельно-последовательное соединение «2 пар. х 3 посл.» шести кабелей, на выходе сумматора формировался высоковольтный импульс с амплитудой 9.5 - 10 кВ на линии с волновым сопротивлением 75 Ом. Как и в случае сумматоров четверок каналов, применялись индуктивные развязывающие ферритовые сердечники, смонтированные на радиатор с жидкостным охлаждением.

Для корректной работы описанных кабельных сумматоров необходимо, чтобы импульсы, поступающие на вход сумматоров, были синхронизированы по времени с высокой точностью. Точность синхронизации определяется величиной фронта нарастания исходных импульсов, в данном случае, исходный фронт составляет 1-1.2 нс. Точность синхронизации для такого фронта должна составлять величину не более 100-200 пс.

Отдельные внутренние каналы генератора построены по двухключевой схеме (рисунок 3.1), и, соответственно, содержат рабочую выходную индуктивность. Индуктивные элементы в различных каналах имеют разброс примерно 5-10%, что ведет к разбросу в задержке от запуска до выходного импульса соответственных каналов генератора в пределах нескольких процентов от величины задержки. Величина задержки внутреннего канала генератора составляет 50 нс, разброс задержки между каналами составляет 1-2 нс.

Для синхронизации четверок каналов на входах сумматоров «50/50» была применена модульная четырехканальная система запуска, оснащенная входом запуска и четырьмя выходами с индивидуальной плавной подстройкой задержки каждого канала. Для синхронизации каналов 3.5 кВ на входах сумматора «50/75» была применена шестиканальная система запуска с плавной подстройкой задержек каналов.

### 3.3. Высокочастотный генератор с амплитудой 5 кВ на нагрузке 50 Ом и максимальной частотой повторения 5 МГц

В ускорительной технике высоковольтные наносекундные генераторы импульсов широко применяются в качестве драйверов отклоняющих систем – кикеров. Параметры таких генераторов могут быть самыми разнообразными, и зависят от конфигурации как самого ускорителя, параметров пучков заряженных частиц, формируемых в ускорителе, а также от задачи, решаемой при помощи конкретной отклоняющей системы.

Для одного из европейских ускорительных центров была разработана серия высокочастотных генераторов с особыми требованиями к форме импульса, режиму генерации и параметрами стабильности и повторяемости импульсов – FPG 5-5MHN.

Параметр	Величина
Максимальная амплитуда на нагрузке 50 Ом	5000 В
Амплитудная стабильность в пакете	< 1.5%
Длительность переднего фронта	< 10 нс
Максимальная длительность импульса по уровню 0,9 от максимальной амплитуды	20 нс
Задержка выходного импульса относительно импульса запуска генератора	< 100 нс
Амплитуда пред- и после-импульсов	$3 \cdot 10^{-4}$ от амплитуды импульса
Максимальная частота повторения, пакет	4.5 МГц
Максимальное число импульсов в пакете	1500
Максимальная частота повторения пакетов	25 Гц
Запуск генератора	Внешний, 5 В, 20 нс
Временной джиттер относительно внешнего импульса запуска	RMS, менее 200 пс



Таб. 3.3. Параметры генератора FPG 5-5МНН.

Для данного применения были выдвинуты требования высокой стабильности амплитуды, высокой контрастности импульса относительно пред- и после-импульсов, одновременно с требованием высокой частоты следования выходных импульсов напряжения.

В качестве решения была использована силовая схема с высоковольтной транзисторной сборкой, управляемой специальным двухканальным высокочастотным драйвером на основе ДДРВ ключей с индуктивным накопителем. Блок-схема генератора приведена на рисунке 3.7.

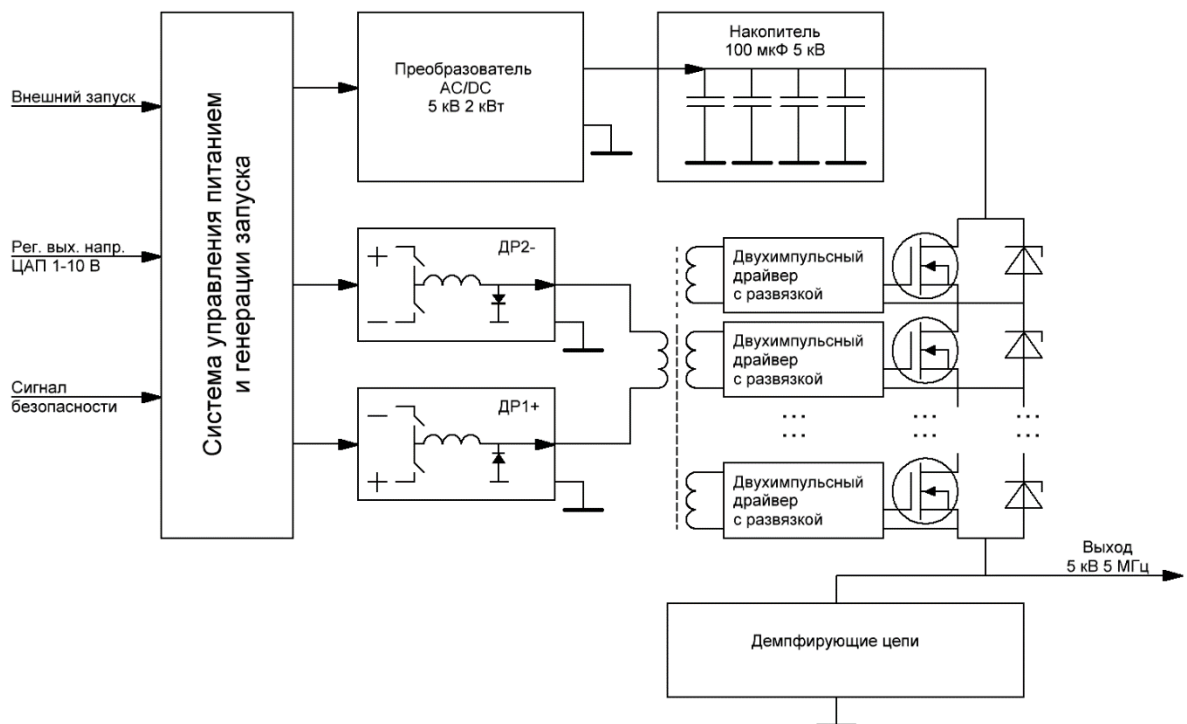


Рисунок 3.7.

Драйвер ДР1+, построенный на базе ДДРВ, формирует сигнал положительной полярности длительностью 5-7нс на первичной обмотке

трансформатора управления высоковольтным ключом ТР1, затем, с задержкой 15нс, второй драйвер ДР2-, формирует сигнал отрицательной полярности на первичной обмотке ТР1. Положительный импульс на первичной обмотке ТР1 передает ток заряда затворов полевых транзисторов на двух-импульсные драйверы, обеспечивая быстрое одновременное открытие всех транзисторов в высоковольтном столбе. Отрицательный импульс на первичной обмотке ТР1 обеспечивает быстрый и одновременный разряд затворных емкостей силовых транзисторов с зарядом затворов до отрицательного напряжения, и, соответственно, резкое и надежное размыкание высоковольтной сборки.

Применение ДДРВ-генераторов в качестве управляющих драйверов высоковольтной сборки позволило доставлять достаточную для надежной работы энергию управления в затворы транзисторов. При этом появилась возможность применить необходимые демпферные элементы в цепях двухимпульсных драйверов, не опасаясь чрезмерно ослабить уровень заряда затворов, при этом полностью погасить паразитные переколебания. Применение двухключевой одно-индукторной схемы формирования ДДРВ импульса в драйвере также позволило свести к минимуму переколебания в цепях трансформатора ТР1.

Все перечисленные меры привели к надежной работе высоковольтной высокочастотной транзисторной сборки. Выходной импульс генератора отличается высокой контрастностью, на рисунке 3.8 приведена осциллограмма генератора при максимальной амплитуде 5 кВ.

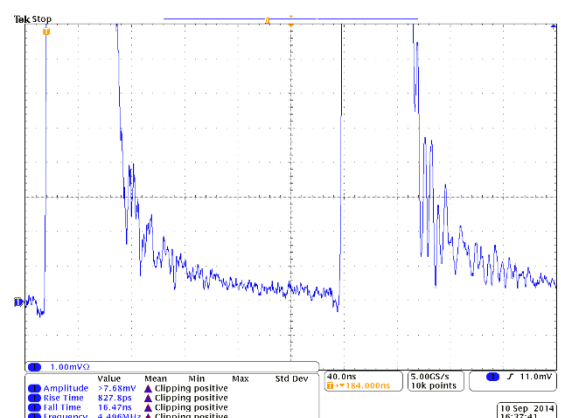
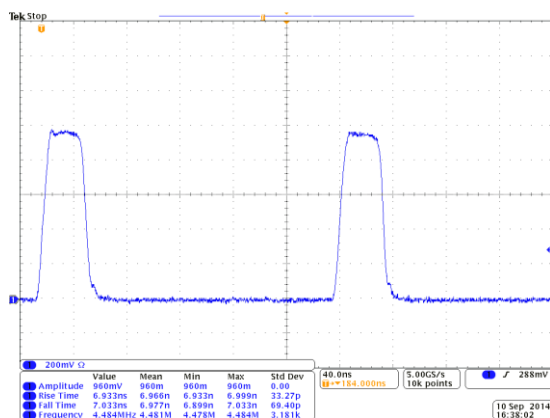


Рисунок 3.8.

Как видно из осциллограммы, контраст пред-импульса по отношению к амплитуде составляет примерно 0.25 мВ при амплитуде импульса 950 мВ, что соответствует величине  $2.6 \cdot 10^{-4}$ .

На рисунке 3.9 представлена осциллограмма пакета импульсов 5 кВ при частоте следования 4.5 МГц и длительности пакета в 1500 импульсов.

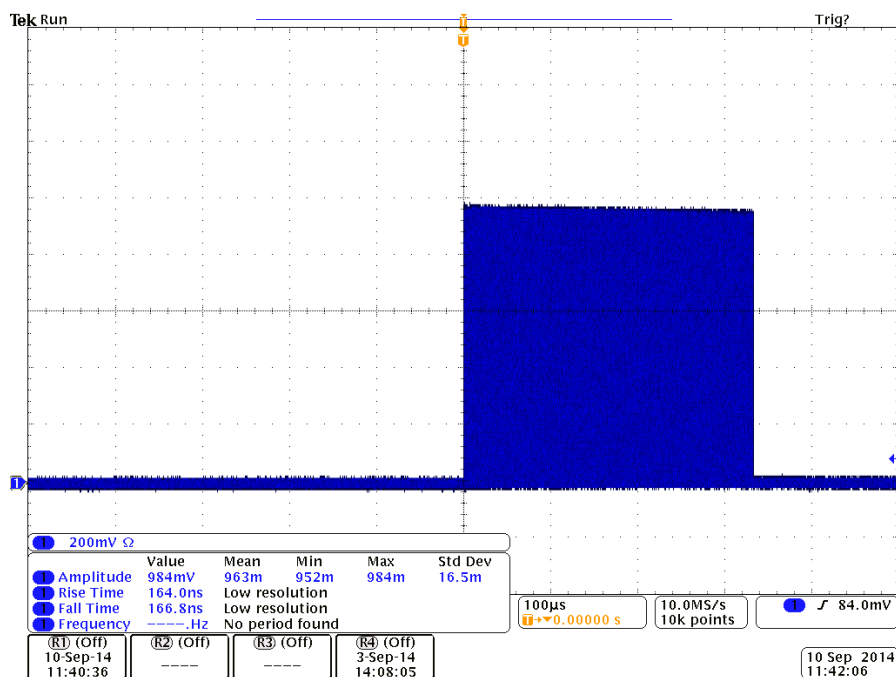


Рисунок 3.9.

Для обеспечения необходимого уровня амплитуды на протяжении всего пакета из 1500 импульсов в качестве силового источника питания для генератора был применен преобразователь с выходным напряжением 5 кВ и выходной емкостью примерно 100 мкФ. Во время генерации пакета емкость разряжается на нагрузку, но только в то время, когда высоковольтный ключ находится в проводящем состоянии. Степень разряда накопителя можно оценить следующим образом:  $e^{-\frac{T_w \cdot N}{R \cdot C}}$ , где  $T_w$  длительность выходного

импульса напряжения (30 нс),  $N$  – количество импульсов в пакете (1500),  $R$  – волновое сопротивление нагрузки (50 Ом),  $C$  – емкость накопителя. При указанных параметрах степень ослабления амплитуды импульса составит примерно 0.991, что составляет менее 1% и укладывается в требования технического задания генератора.

Для подключения генератора FPG 5-5MHN к отклоняющей системе ускорителя использовался 50-омный высоковольтный кабель длиной 6-8 метров, а также согласующая нагрузка 50 Ом, подключенная после полосковой линии отклоняющей системы ускорителя.



Рисунок 3.10.

На рисунке 3.10 показан внешний вид генератора FPG 5-5MHN. Средняя выходная мощность на нагрузке 50 Ом составляет примерно 600 Вт, эффективность генератора составила примерно 65 – 70 %. Большая часть тепловой мощности рассеивается на высоковольтной транзисторной сборке и составляет примерно 250 Вт. Для обеспечения приемлемого теплового режима работы транзисторная сборка выполнена в виде платы с керамической подложкой из материала AlN и смонтирована на радиатор с жидкостным охлаждением.

## **Глава 4. Пикосекундные сверхстабильные генераторы импульсов напряжения мегаваттной пиковой мощности**

Как было показано в главе 1, современный уровень максимальных амплитуд генераторов пикосекундных импульсов лежит в диапазоне десятков вольт. При фронтах нарастания импульсов напряжения в 20-30 пс максимальная достижимая амплитуда составляет около 50-ти вольт. Очевидно, для радикального увеличения пиковых мощностей необходимо использовать другие принципы формирования пикосекундных импульсов напряжения, или использовать новые приборы с высокими рабочими напряжениями. Создание подобных приборов возможно с использованием новых материалов, таких как GaAs, SiC, GaN и др. В данной главе показаны пикосекундные генераторы, разработанные с использованием нового поколения ФИД ключей.

### **4.1. Принципиальная схема формирования высоковольтных пикосекундных импульсов**

В работе [1] был показан эффективный способ получения коротких импульсов напряжения с использованием путем обострения медленного фронта исходного импульса с помощью полупроводникового диодного обостряющего ключа.

В этой работе был создан мощный сверхстабильный генератор с фронтом нарастания от 20 до 40 пс и амплитудой выходного импульса до 17кВ, частота повторения импульсов до 10 кГц. Измерение фронта выходного импульса такой длительности при напряжении в десятки киловольт составляет отдельную метрологическую задачу, рассмотренную в параграфе 4.2.

Генератор ГИН10-15К-ФН20 построен на базе схемы с индуктивным накопителем энергии и размыкающим ключом ДДРВ. Блок-схема генератора показана на рисунке 4.1.

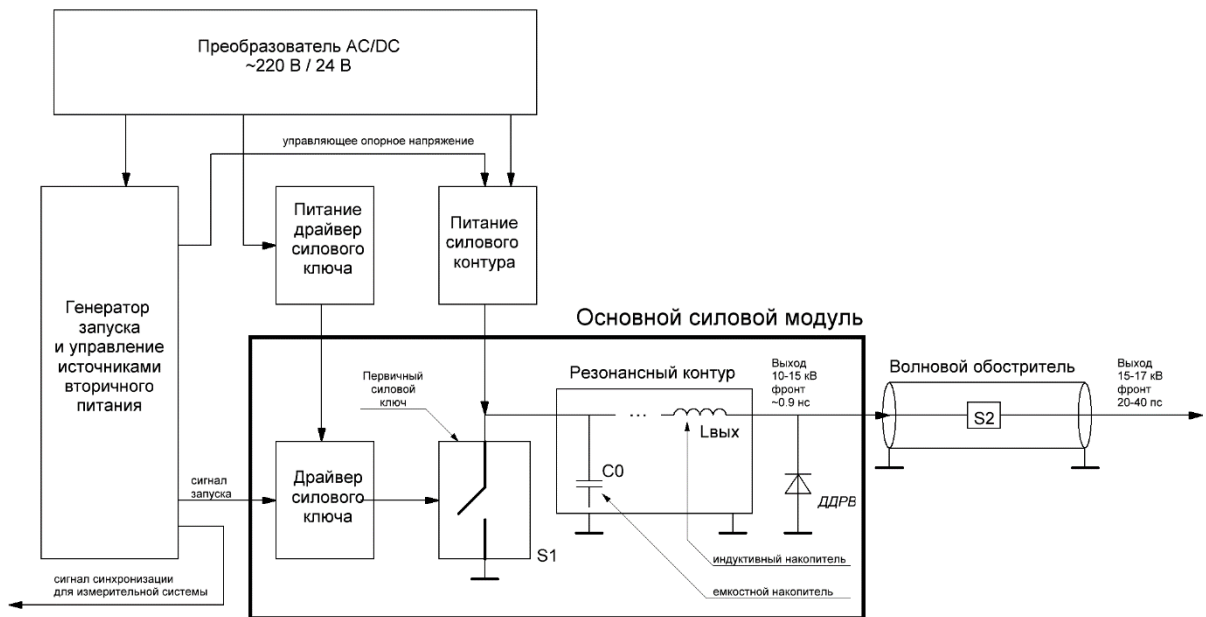


Рисунок 4.1.

Силовая часть генератора состоит из первичного ключа  $S1$ , резонансного контура, размыкающего ключа ДДРВ и волнового обострителя. Резонансный контур имеет в своем составе первичный емкостной накопитель  $C0$  и выходной индуктивный накопитель  $L_{\text{вых}}$ . Волновой обостритель содержит в своем составе обостряющий прибор  $S2$ .

Принцип работы генератора, следующий: от источника питания силового контура, заряжается емкость  $C0$ , далее генератор запуска формирует сигнал управления для драйвера силового ключа  $S1$ . Ключ  $S1$  переходит в проводящее состояние, запуская процесс перераспределения энергии в силовом контуре. В результате процесса перераспределения энергия емкостного накопителя  $C0$  переходит в индуктивный накопитель  $L_{\text{вых}}$ . Одновременно с этим происходит процесс накачки ДДРВ ключа током, поскольку ДДРВ подключен параллельно резонансному контуру. Элементы резонансного контура подобраны таким образом, что момент, когда большая часть энергии контура оказывается в индуктивности  $L_{\text{вых}}$ , происходит полный вынос заряда из прибора ДДРВ при максимальном токе, что приводит к резкому восстановлению р-п перехода ДДРВ. Прибор ДДРВ срабатывает как размыкающий ключ, перенаправляя ток индуктивности

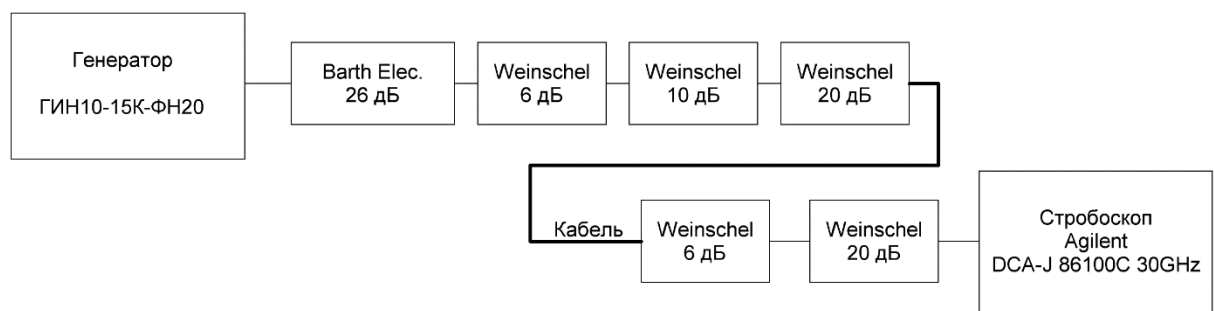
Лвых в передающий выходной тракт, ведущий к нагрузке или к следующему блоку – волновому обострителю.

При работе основного силового модуля на нагрузке 50 Ом формируется высоковольтный импульс с напряжением 10-15кВ и фронтом нарастания ~0.9нс.

При подключении к выходу основного силового модуля блока волнового обострителя импульс напряжения с наносекундным фронтом проходит по волновому тракту с импедансом 50 Ом до ключа S2. Ключ S2 обеспечивает сверхбыструю коммутацию волнового тракта, формируя фронт выходного импульса в 20-40 пс.

#### 4.2. Калибровка измерительного оборудования, используемого для измерения пикосекундных импульсов напряжения

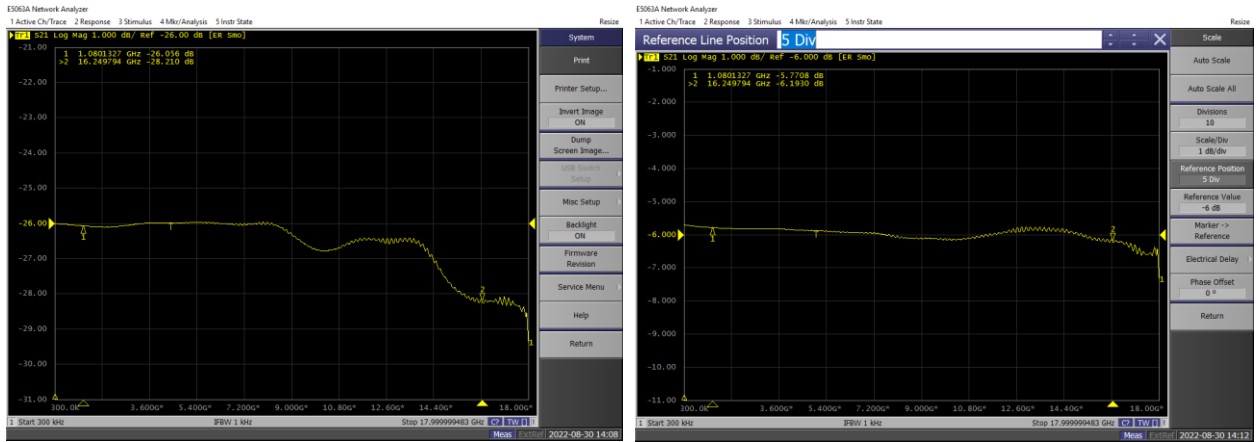
Для измерения формы выходного импульса напряжения были подготовлены две измерительные схемы. Первая схема (рисунок 4.2) включала аттенюаторы Barth Electronix 26 dB с полосой 14 GHz, Weinschel 6dB, 10dB, 20dB 18 GHz. Суммарный коэффициент ослабления при измерении по первой схеме составил 88дБ, или 25100 раз. Отдельно были произведены измерения АЧХ отдельных аттенюаторов, участвовавших в



измерениях.

Рисунок 4.2 – Измерительная схема №1. (аттенюатор Barth Elec.).

Измерения АЧХ проводились на векторном анализаторе Agilent ... 18GHz. На рис. 4.3 приведены АЧХ аттенюатора Barth Electronix 26dB (а),



Weinschel 6dB (б), Weinschel 10dB (в), Weinschel 20dB (г), Weinschel SMA 6dB (д), Weinschel SMA 20dB (е).

(а)

(б)

(в)

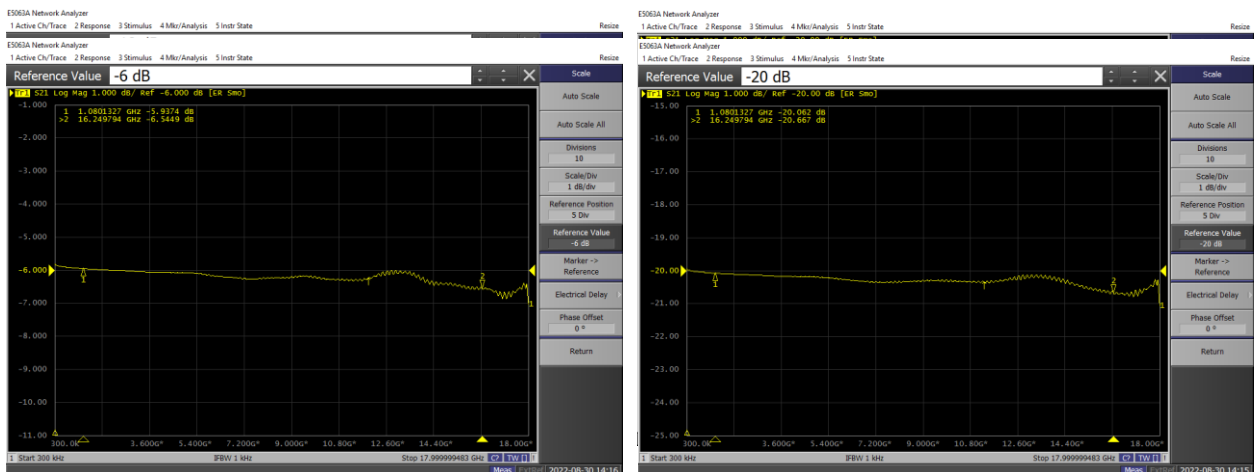
(г)

(д)

(е)

Рисунок 4.3 – АЧХ аттенюаторов. Barth Electronix 26dB (а), Weinschel 6dB (б), Weinschel 10dB (в), Weinschel 20dB (г), Weinschel SMA 6dB (д), Weinschel SMA 20dB (е).

Проведенные измерения показали, что основной высоковольтный аттенюатор имеет равномерный коэффициент ослабления в диапазоне DC..13ГГц, на более высоких частотах происходит резко увеличение





коэффициента ослабления. Данная неравномерность АЧХ ведет к подавлению высоких частот, и, как следствие, к завалу измеряемого фронта.

Проведенные измерения АЧХ аттенюаторов Weinschel показали рабочую полосу DC..18ГГц, что соответствует заявленным производителем параметрам.

Вторая схема измерений (рисунок 4.4) включала емкостной ответвитель разработки АО «ПК ФИД-Техника», аттенюаторы Weinschel 6dB, 20dB 18 GHz.

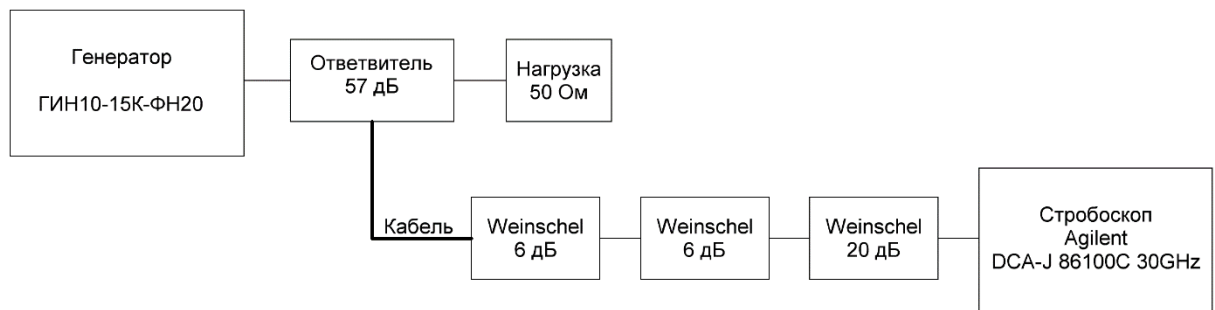
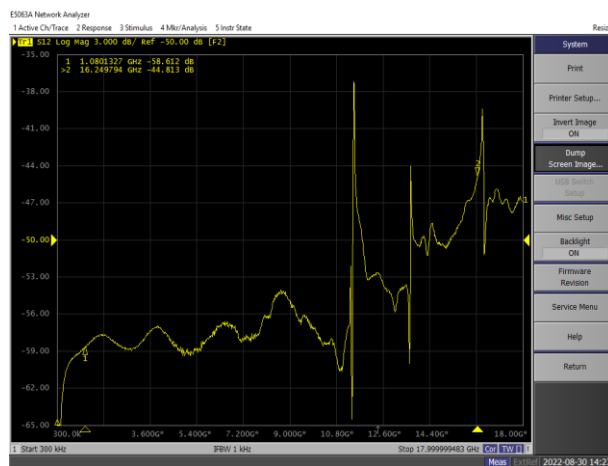


Рисунок 4.4 – Измерительная схема №2 (емкостной ответвитель).

АЧХ характеристика для емкостного ответвителя представлена на рисунке



4.5.

Рисунок 4.5.

Из проведенных измерений следует, что удовлетворительная равномерность АЧХ наблюдается до 11 ГГц. На более высоких частотах

наблюдается сильная неоднородность и уменьшение коэффициента деления для высоких частот. При проведении измерений это будет отражаться в увеличении амплитуды высокочастотной составляющей и укрупнению фронта измеряемого импульса.

### 4.3. Результаты измерения сверхкоротких фронтов высоковольтных импульсов напряжения

В разработанном генераторе использовались два типа обостряющих ФИД приборов: ФДО 20 и ФДО 25. На рис. 4.6 представлена осциллограмма выходного импульса напряжения при использовании прибора ФДО 25.

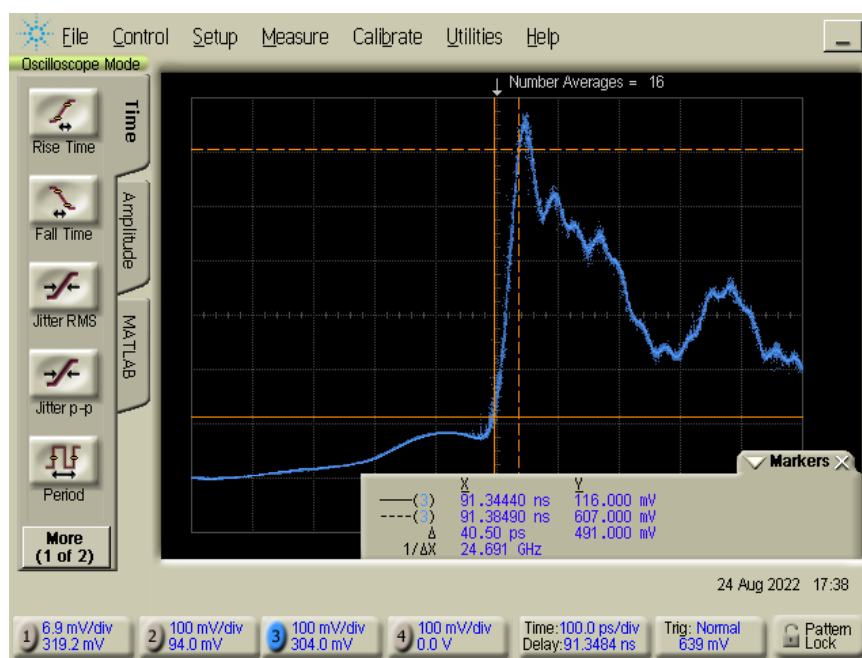


Рисунок 4.6.

Измерения выполнены по первой схеме с использованием аттенюаторов. На осциллограмме виден предимпульс с амплитудой около 10% от максимальной амплитуды, после которого происходит резкий рост напряжения с фронтом 40 пс. Полная амплитуда составляет примерно 16 кВ, что соответствует пиковой мощности 5.3 МВт. На рис. 4.7 показан этот же импульс на развертке 50 пс/дел.

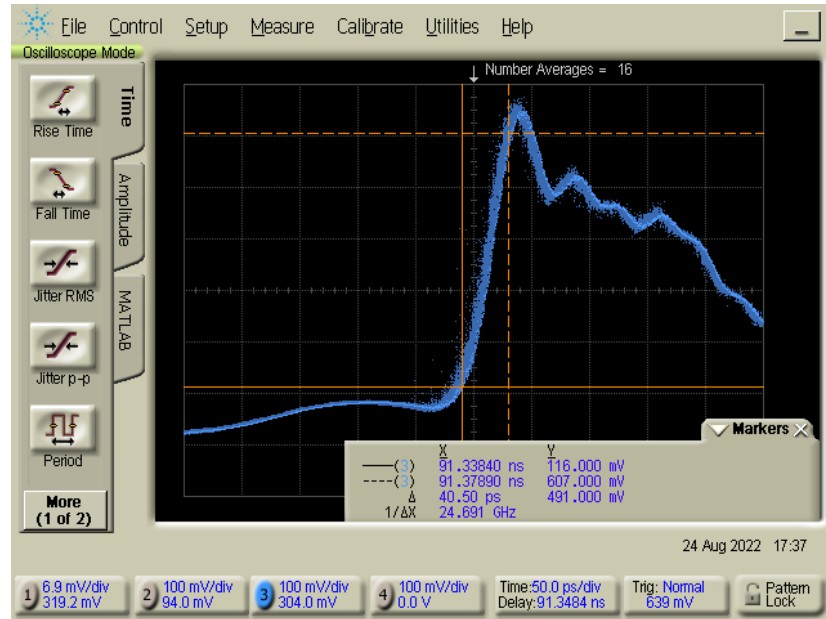


Рисунок 4.7.

Измеренный фронт быстрого участка импульса напряжения по уровням 0.1-0.9 составляет 40.5 пс. Обе осциллограммы были записаны с параметрами усреднения 16 для уменьшения помех, возникающих при работе генератора.

Далее приведены осциллограммы при использовании прибора ФДО 20. Измерения проводились по схеме №1, без использования усреднения. На рис. 4.8 (а) показана форма импульса напряжения с разверткой 100 пс/дел.

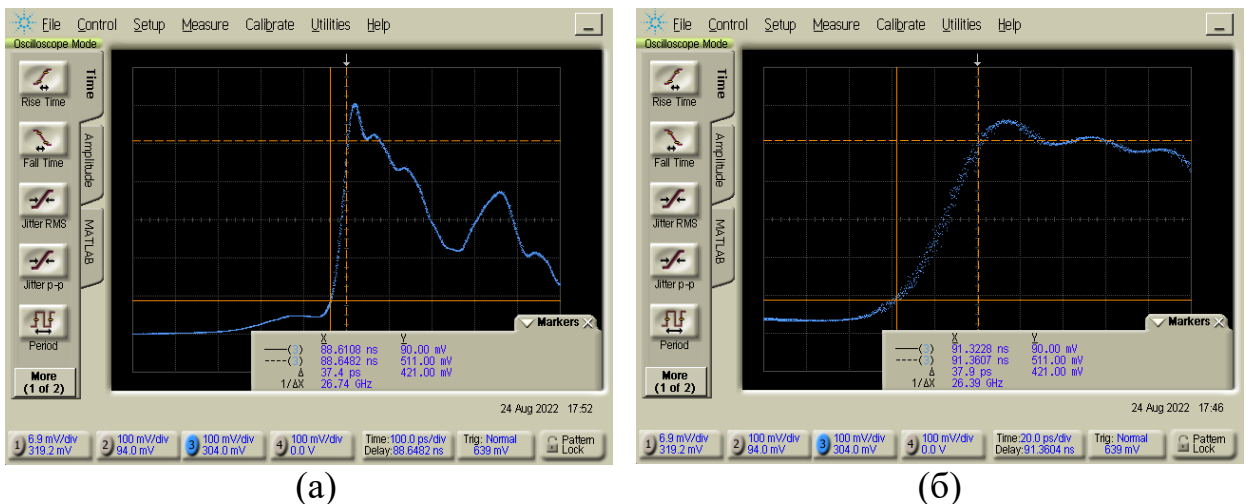


Рисунок 4.8.

Из осциллограммы видно, что предимпульс по амплитуде менее 10% от полной амплитуды, после чего напряжение достигает максимума в 15кВ.

Измеренный фронт по уровням 0.1-0.9 показан на рис. 4.8 (б) составляет 37.4 пс.

Далее были выполнены измерения джиттера. Результаты представлены на осциллограмме на рис. 4.9.

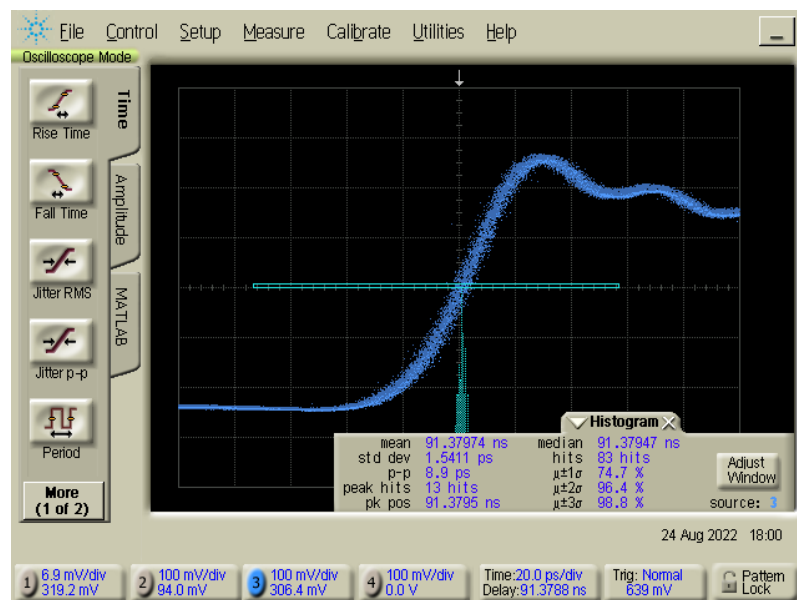


Рисунок 4.9.

Проведенные измерения показали, что среднеквадратичное отклонение задержки выходного импульса напряжения относительно импульса запуска составляет 1.5 пс. Величина полной задержки составляет 91 нс. Полный размах колебаний задержки составил менее 9 пс. Достигнутое значение джиттера сравнимо с нестабильностью импульса запуска относительно импульса синхронизации.

Измерения с использованием измерительной схемы №2 для прибора ФДО 20 представлены на рисунке 4.10.

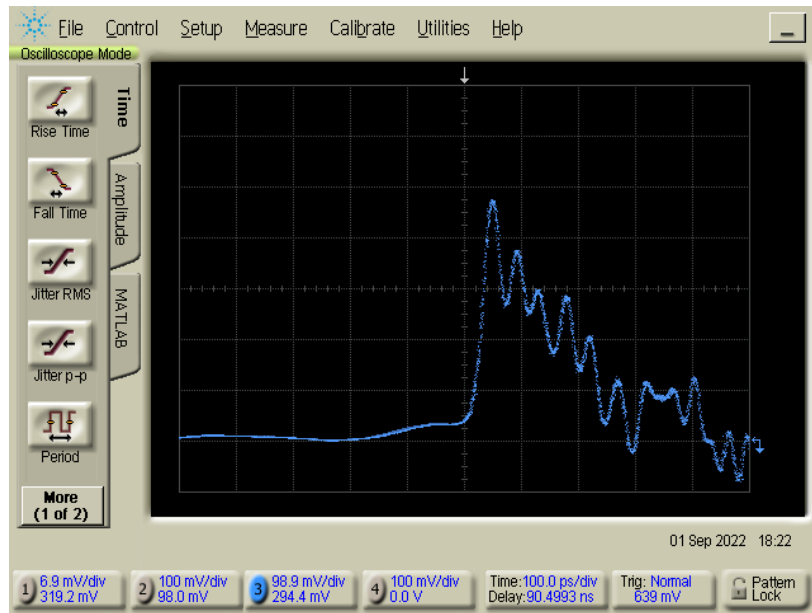


Рисунок 4.10.

На осциллограмме виден импульс с пред-импульсом менее 10% от полной амплитуды, так же, как и при измерениях по схеме №1. Пиковое значение амплитуды составляет 13.5 кВ. Это значение меньше, чем при измерении аттенюаторами на 10%. Это может быть связано с точностью определения коэффициента ослабления емкостного делителя.

Далее на рисунке 4.11 представлены осциллограммы работы прибора ФДО 20 на развертках 10 пс/дел и 20 пс/дел.

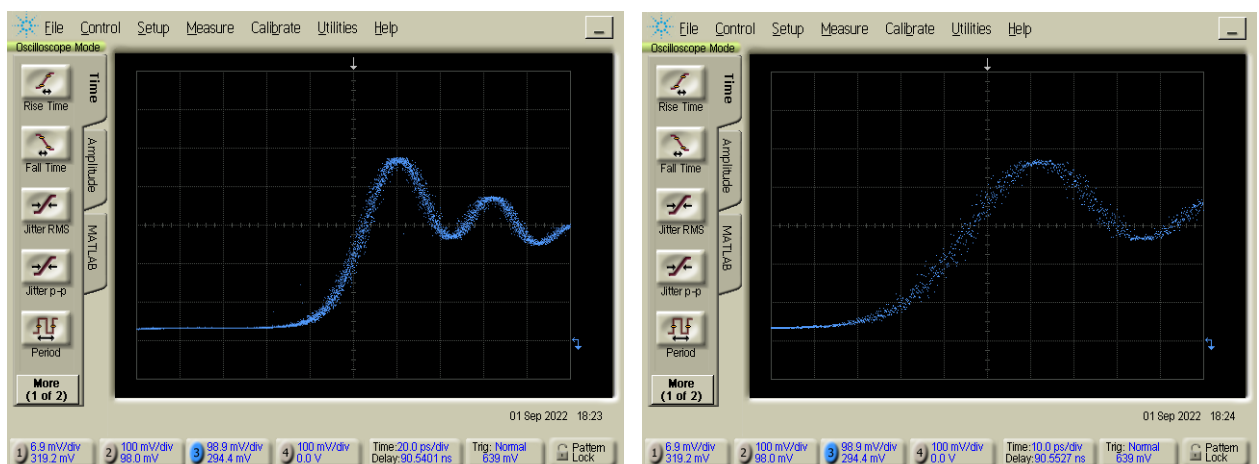


Рисунок 4.11.

Из этих осциллограмм видно, что фронт нарастания составляет около 25 пс.

На рисунке 4.12 представлено изображение генератора, емкостного ответвителя и выходной волновой обостритель.



Рисунок 4.12.

На рисунке 4.13. представлена конструкция волнового обострителя с пикосекундным прибором ФДО 25, установленном в волновом тракте.

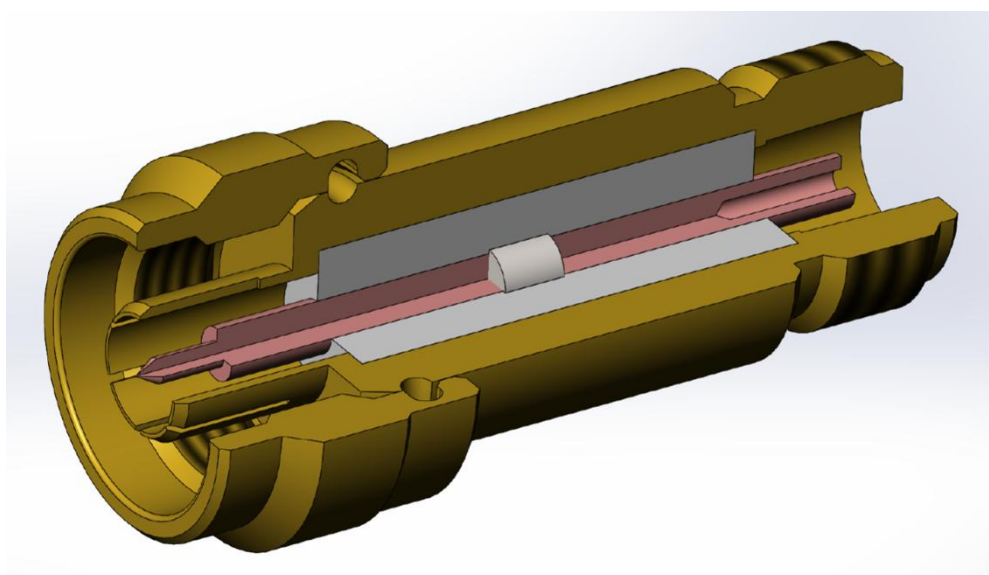
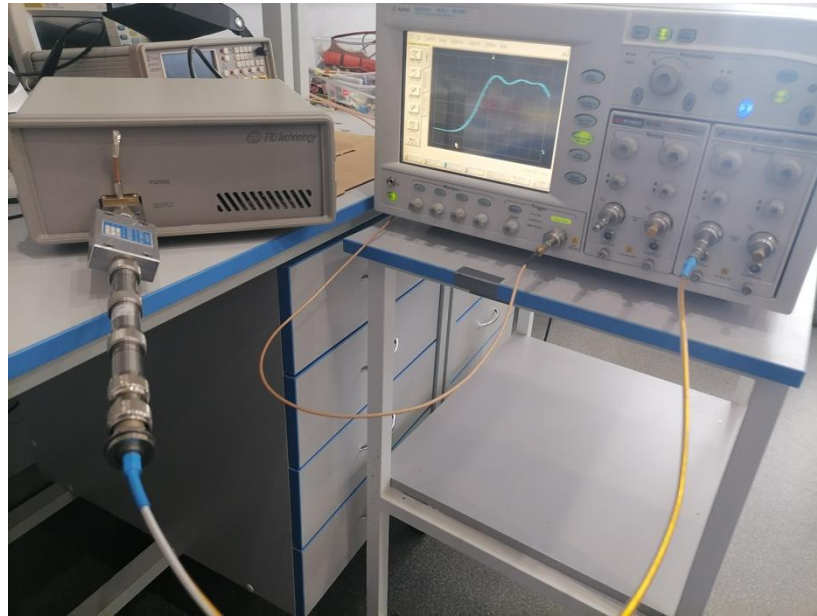


Рисунок 4.13.

На рисунке 4.14 представлены фотографии работающего генератора с измерительными приборами, собранными по схеме №1 (а) и №2 (б).



(а)



(б)

Рисунок 4.14.

## **Глава 5. Экспериментальное исследование деформации пикосекундных СШП импульсов в атмосфере**

### **5.1. Проблемы постановки исследований в атмосфере**

В связи со стратификацией параметров атмосферы Земли с высотой первоначальные исследования целесообразно проводить вдоль земной поверхности по траектории с параметрами, близкими к однородным. Доступными для реализации являются два варианта создания такой траектории: с горы на гору и с одного подъемного шара на другой. Первый из них требует организации специальной экспедиции длительностью несколько дней и заметных затрат на поездку в удаленный горный район. Выбранный в данной работе для реализации эксперимент с подъемными шарами занимает меньшее время и требует значительно меньших затрат, но необходимо, естественно, исключить влияние земной поверхности и обеспечить достаточно точную взаимную юстировку диаграмм направленности излучателя и измерителя в условиях подвижности шаров. Одновременный подъем излучателя и измерителя на заметные высоты, на которых влияние земной поверхности было бы исключено, фактически удваивает затраты. Еще одним ограничением является предельный подъем самого доступного из воздушных носителей (полетного аэростата) на разрешенную высоту около километра при полезной нагрузке (оборудование, пилот и один-два оператора) массой 500 кг. В связи с этим, масса двух разработанных для данной работы СШП – излучателей вместе с системой электропитания от аккумулятора на 2 часа работы составляет менее 100 кг.

Масса осциллографа реального времени, размещаемого вместе с системой электропитания на основе автономного электрогенератора на привязном аэростате, составила 250 кг. Обслуживание осуществлялась также двумя операторами.



Возможны два варианта размещения в таких опытах с аэростатами системы излучатель – измеритель.

В одном варианте излучатель размещается в корзине воздушного шара, измеритель – на земле на доступной для обслуживания высоте, например, 2—3 метра или на привязном аэростате на высоте 50-100 метров. Ограничение по санитарным нормам на присутствие операторов и пилота в непосредственной близости от СШП – излучателя ограничивает время включения единицами секунд, что снижает вероятность надежной юстировки и регистрации на земле сигнала приемником измерителя. Более важное ограничение связано с большим размером площади, занимаемой отраженным от земной поверхности сигналом, составляющей при расстоянии 10 км величину сотни метров (при ширине диаграммы направленности излучателя 5 – 15 градусов и более).

Предпочтительным является размещение измерителя в корзине воздушного шара, а излучателя – на земле на доступной для обслуживания высоте 2-3 метра. В этом случае измеритель виден с места установки излучателя под углом 3–5 градусов, сравнимом с шириной диаграммы направленности излучателя из нескольких одиночных модулей ( $\pm 5 - 15$  градусов) и влияние земной поверхности будет уменьшено. Расположенные в корзине измерительная полосковая линия ИППЛ (диаграмма шириной более  $\pm 90$  градусов) или более чувствительный измерительный СШП-раскрыв (диаграмма шириной  $\pm 30$  градусов) получают отраженный от земной поверхности помеховый сигнал малой амплитуды. Санитарные нормы при расположении оператора на земле выполняются удалением на необходимое расстояние от излучателя с помощью применения оптронных развязок в системе управления.

Таким образом, ключевыми при постановке намеченного эксперимента являлись:

- выявление допустимого угла возвышения диаграммы направленности СШП-излучателя над поверхностью Земли.

- допустимый угол рассогласования осей диаграмм направленности антенн излучателя и приемника с учетом возможных в полете колебаний корзин (особенно на привязном шаре).

## **5.2. Полевые эксперименты по допустимому углу возвышения диаграмм направленности над поверхностью Земли**

### **5.2.1. Влияние земной поверхности на регистрируемые сигналы**

Как уже указывалось, на результативность поставленной в диссертации задачи выявления деформации СШП-сигналов при прохождении в атмосфере Земли влияют допустимые углы взаимной юстировки диаграмм направленности излучателя и приемника сигналов. Также в связи с возможными реализуемыми разными высотами их подъема необходимо экспериментально смоделировать и подкрепить расчетом формирование и положение на временной оси отраженного от земной поверхности импульса, который может помешать верной регистрации прямого сигнала.

Описываемые в данном параграфе модельные полевые эксперименты проводились на ровном поле. Поверхность земли представляла собой практически горизонтальный участок, заросший разнородной травяной растительностью, скошенной на высоте 5-10 см от земли. Земля и растительность были достаточно влажными, т.к. накануне прошли небольшие дожди, а температура ночью и днем не поднималась выше точки росы. Излучатель с полушириной длительности импульса 70 пс и датчик импульсного электрического поля (измерительный преобразователь на основе полосковой линии – ИППЛ) вместе с осциллографическим приемником, имеющим полосу 12,5 ГГц, устанавливались на высоту 3 метра (рисунок 5.1). При этом оси излучателя и сенсора системы регистрации

совпадали по направлению, были нацелены друг на друга и располагались на высоте 3 м от поверхности земли.



Рисунок 5.1.

Установка датчика импульсного электрического поля типа ИПЭЛ на экспериментальной площадке.

Дистанция между приемником и излучателем менялась от 20 до 60 метров с шагом 10 метров. Это позволило получить наглядную демонстрацию взаимного расположения на оси времени прямого, интересующего нас сигнала, и отраженного от поверхности земли (рис. 5.2). Из этих опытов следует, что на дистанции 20 метров при одинаковых высотах подъема излучателя и приемника 3 метра отраженный импульс едва различим среди малых пульсаций общего сигнала. На 30 метрах он отчетливо регистрируется, а далее с ростом дистанции приближается в прямой сигнал и может исказить полезную информацию.

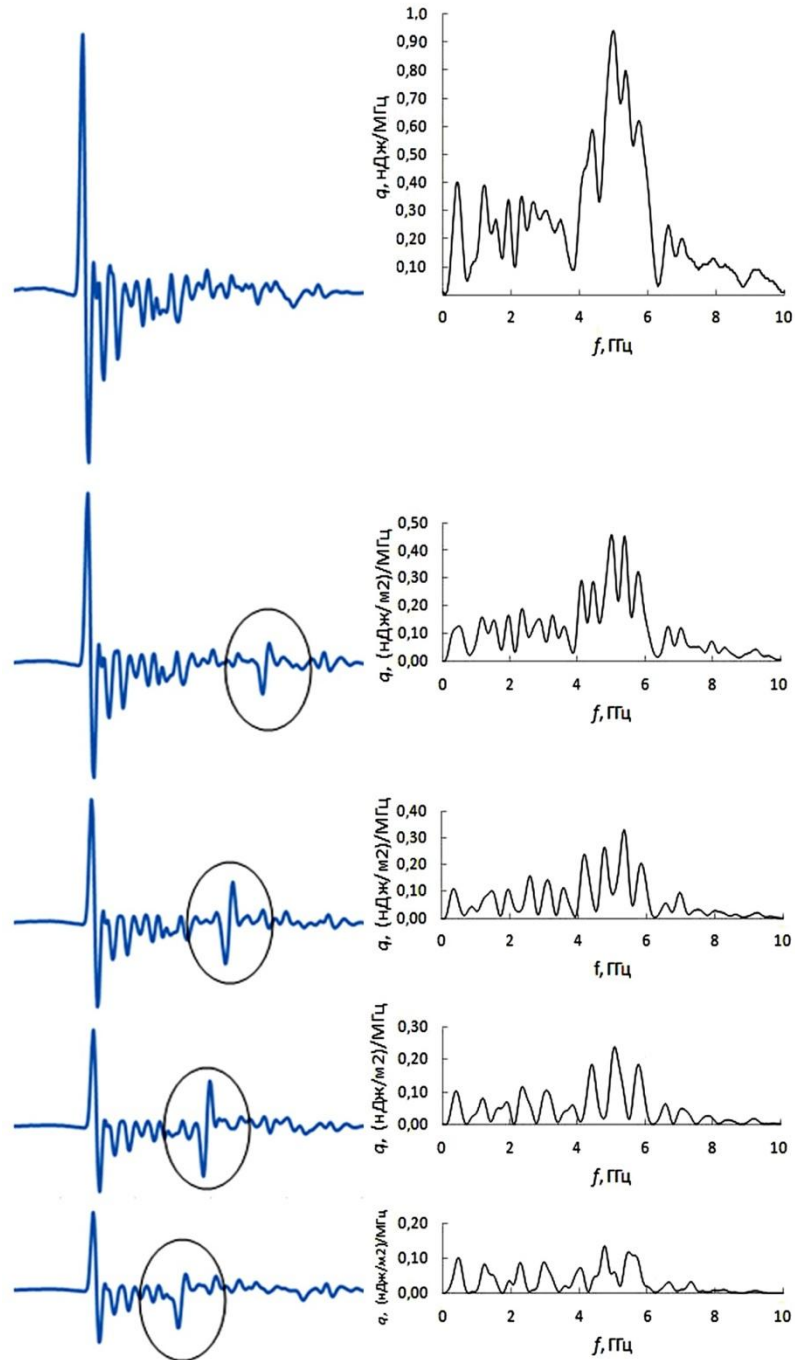


Рисунок 5.2 – Динамика формирования отраженного сигнала в импульсе излучения и соответствующие изменения в спектральной плотности энергии излучения с увеличением расстояния от 20 м последовательно до 30, 40, 50 и 60 м между излучателем и сенсором при высоте их подъема над уровнем земли 3 м (выделен отраженный сигнал, временные и амплитудные масштабы для каждой осциллограммы одинаковы)

Обработка полученных осциллограмм и сравнение с результатами расчетов компьютерного кода «Radia-DN», разработанного В.Е. Осташевым в работе [52] на основе представлений геометрической оптики, показала хорошее совпадение. Данный код предназначен для расчета характеристик СШП-излучений, генерируемых плоскими апертурными раскрытиями с неоднородным и несинхронным возбуждением, в том числе многоэлементными синхронными антенными решетками. Проведенная доработка касалась введения блока расчета излучений с учетом отражения от поверхностей с электрической проницаемостью большей единицы, в том числе и отражения от земли. Этот блок учитывает особенности формирования отраженных СШП-сигналов и оценки их влияния на сигналы, регистрируемые по оси диаграммы СШП-излучения.

Полученные данные (рисунок 5.2) позволили дать обоснование постановки прямого эксперимента по выявлению истинной деформации импульса длительностью 60 пс на дистанции 10 км и более. Для полной гарантии отсутствия влияния земной поверхности выбран вариант подъема приемника на высоту 50 - 100 метров и излучателя до 1000 метров (с шагом 100 метров на каждый километр дистанции), обеспечивающие условия свободного от влияния земной поверхности прохождения СШП-сигнала.

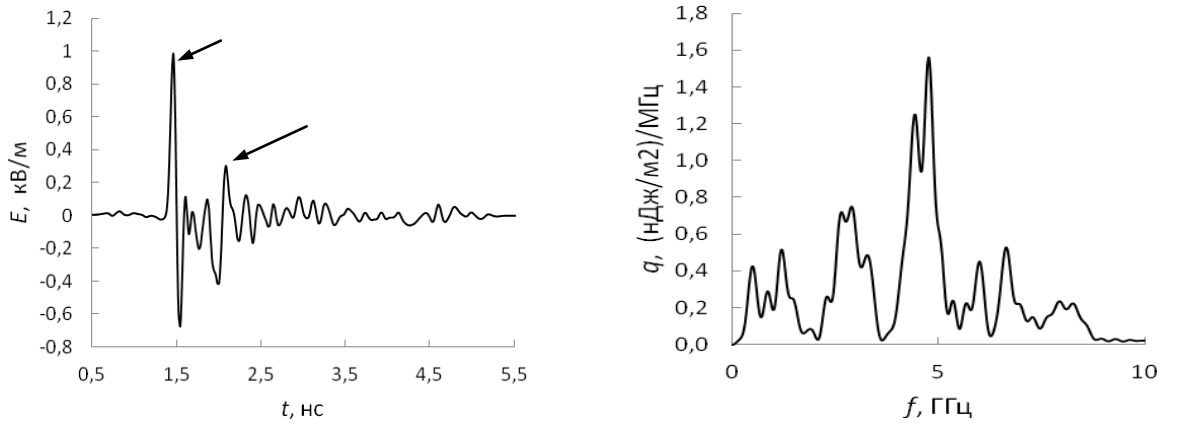
### **5.2.2. Влияние высоты расположения излучателя и приемника**

Вариант с использованием двух аэростатов обладает минимальными затратами и обеспечивает (что является главным в поставленной задаче корректного сравнения расчетных и экспериментальных данных) чистый из-за отсутствия влияния земли эксперимент.

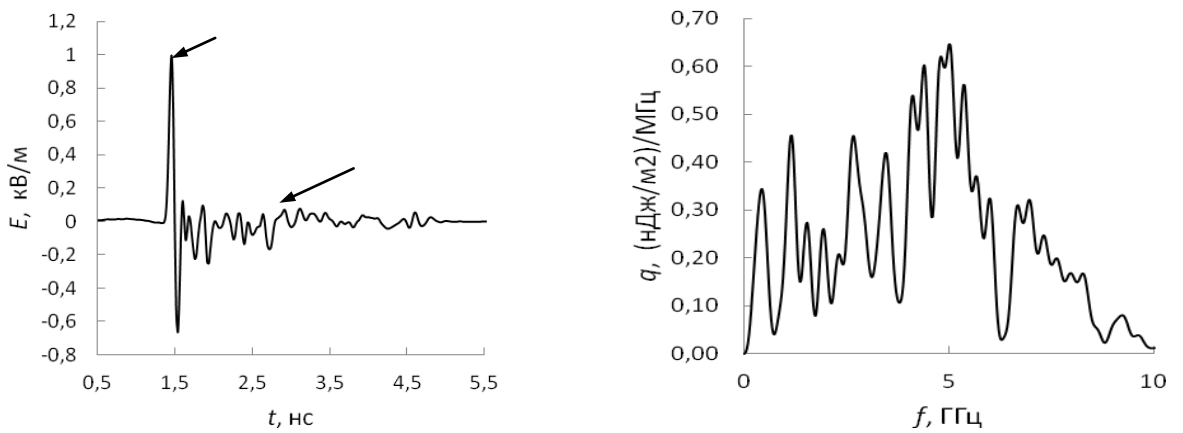
Основной задачей представленных ниже экспериментов, проведенных в модельных полевых условиях, являлось экспериментальное исследование влияния земной поверхности на регистрируемые сигналы в различных постановках (расстояние, высота расположения элементов, углы наклона и

т.д.). Эти эксперименты являлись предварительными перед запланированными экспериментами на дистанцию 10 км, которые требовали дополнительного обоснования условий проведения опытов вследствие не только наличия расположенных вдоль трассы препятствий (лес, строения), но также кривизны поверхности Земли. Для корректного сравнения с расчетами только натурный эксперимент мог дать окончательный ответ на вопрос, насколько реальные условия соответствовали условиям прохождения СШП-импульсов в свободной атмосфере. Выполненные в данной работе опыты вдоль поверхности земли, проведенные в полевых условиях даже на доступных дистанциях до сотни метров, дали полезную информацию, поскольку можно было достаточно просто менять угол наклона продольных осей приемника и излучателя по отношению к горизонту, а также расстояние между элементами и высоту их расположения. Эксперименты проводились на ровном поле с очень редкой травой высотой до 20 см. Расстояние менялось от 20 до 60 метров с шагом 10 метров с юстировкой совмещения осей диаграмм направленности излучателя и измерителя. Изменение угла возвышения над горизонтом излучателя составляло от 2 градусов на дистанции 60 метров до 6 градусов на дистанции 20 метров. На основе осциллограмм полученных сигналов рассчитывались спектральные характеристики импульсов излучения и их изменение в зависимости от условий опыта.

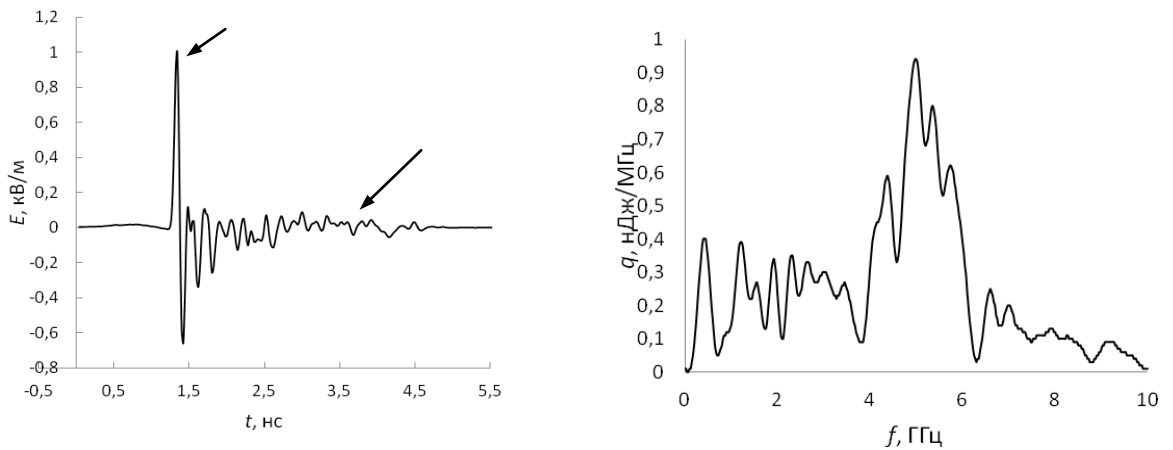
На рисунке 5.3 и рисунке 5.4 приведено сравнение зарегистрированных осциллограмм импульсов СШП-излучения для разных условий, в том числе при одинаковой высоте их размещения по отношению к поверхности земли приемника и излучателя 1 метр (максимальное влияние земли) и 3 метра (минимальное влияние земли). На дистанции 20 метров при высотах излучателя и измерителя 1 м положение отраженного от земли сигнала (рис.5.3а) определялось, как указывалось выше, с помощью двумерного компьютерного кода разработки В. Е. Осташева [52].



(a)



(б)



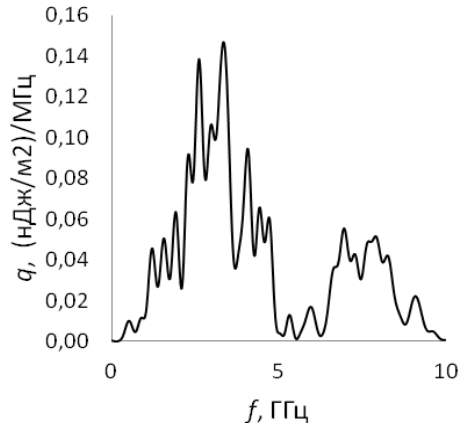
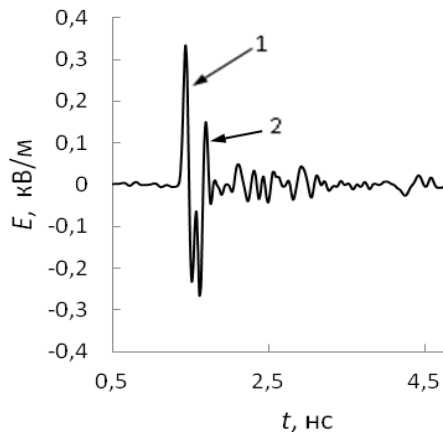
(в)

Рисунок 5.3 – Зарегистрированные на дистанции 20 м импульсы напряженности электрического поля (слева) и их спектральная плотность энергии (справа) при высотах расположения излучателя и сенсора: (а) - 1м; (б) - 1м и 3 м, соответственно; (в) - 3м.

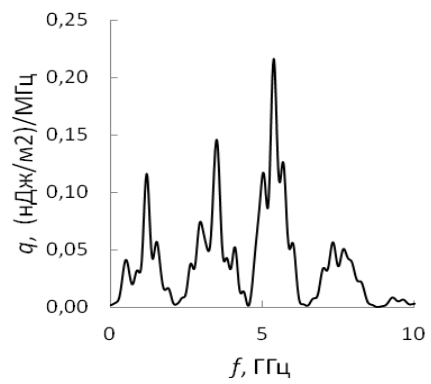
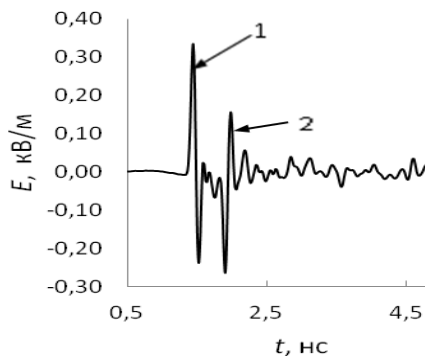
Из осциллограммы рисунка 5.3а, полученной для одинаковых высот излучателя и приемника 1 метр, видно, что отраженный от земли сигнал отрицательной полярности на дистанции 20 м имеет амплитуду около 40 % от прямого сигнала ( по расчетной модели отстает от него на время около 1 нс). С дальнейшим увеличением расстояния на этой высоте отраженный импульс продолжает "догонять" передний фронт импульса, сначала приводя к увеличению отрицательной полуволны по отношению к положительной, а затем начинает уменьшать амплитуду положительной полуволны, как это видно из осциллограммы рис. 5.4а. При реализуемом на дальности 20 метров угле возвышения около 6 градусов (рис.5.3б), полученной на разных высотах излучателя и приемника 1м и 3м, диаграмма направленности излучателя проходит достаточно высоко над поверхностью земли и сигнал содержит незначительную информацию об отраженном сигнале (два отрицательных всплеска с задержкой 0,5 и 1 нс с амплитудами 20 и 10%). Во всех трех режимах по высоте расположения антенн на дальности 20 м амплитуды прямых сигналов практически одинаковы и составляют 1 кВ/м. Расчетные спектры сигналов отличаются незначительно.

При увеличении дистанции облучения до 60 м (рисунок 5.4) амплитуда сигналов естественно уменьшается до 0,3 кВ/м. При угле возвышения 2 градуса, реализуемом на этой дистанции (рисунок 5.4б), реализуемом на разных высотах 1м и 3 м, отраженный сигнал, несмотря на возросшую до 80% амплитуду, не мешает регистрации прямого сигнала, располагаясь на оси времени на 0,2 нс позднее. В то же время при размещении излучателя и измерителя на высоте 1 метр (рисунок 5.4а), отраженный сигнал уже начинает искажать прямой сигнал, мешая корректной регистрации. При прохождении сигнала на высоте 3 метра (рисунок 5.4в) отраженный сигнал отстоит от прямого на целых 0,5 нс.

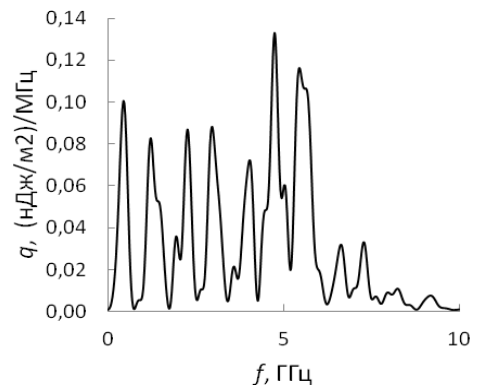
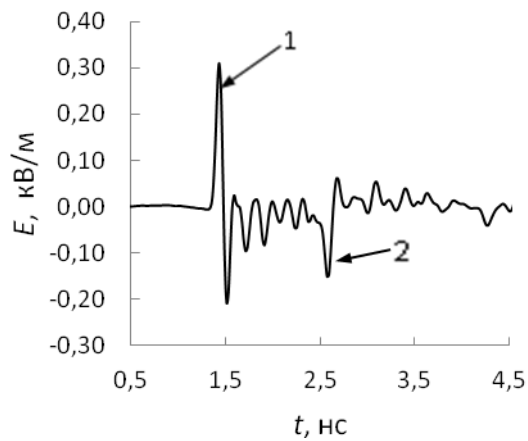




(а)



(б)



(в)

Рисунок 5.4 – Зарегистрированные на дистанции 60 м импульсы напряженности электрического поля (слева) и их спектральная плотность энергии (справа) при высотах расположения излучателя и сенсора: (а) - 1 м; (б) - 1 м и 3 м, соответственно; (в) - 3 м.

1 – прямой сигнал; 2 – отраженный.

Несмотря на возможность регистрации основного импульса СШП-сигнала без существенных искажений, описанная в данных опытах конфигурация существенно влияет на спектральные характеристики регистрируемых импульсов. Наличие даже незначительного отраженного сигнала (30-40 % от максимальной амплитуды) трансформирует спектр из широкополосного в полосо-линейчатый. При распространении излучения на высоте 1 м начинают формироваться высокочастотные (6-9 ГГц) составляющие спектра. При излучении на высоте 3 метра формируется (рис. 5.4в) до десятка полос шириной около 500 МГц каждая. Последнее является следствием появления на временной оси отдельно расположенного отраженного сигнала, что, как указано выше, приводит к модификации спектра из сплошного в полосатый. Расстояние между спектральными линиями обратно пропорционально их периоду во временной области.

Полученные данные позволили скорректировать постановку эксперимента на больших дальностях в части, касающейся расположения излучателя и приемника, а также высот возвышения системы излучатель-приемник, с целью минимизации влияния отраженного от земли сигнала и внушали оптимизм при подготовке и реализации полевых опытов на дальность 10 км. Влияние Земли может быть заметно уменьшено, как показали полевые опыты, при угле возвышения 6 градусов, что на практике может реализоваться при подъеме излучателя на высоту 1000 метров. Применительно к экспериментам на больших расстояниях основное влияние будет оказывать естественный рельеф местности. Все это предстояло предусмотреть и уточнить при подготовке прямых экспериментов на километровые дальности.

### **5.2.3. Исследование допустимого расхождения осей диаграмм направленности антенн излучателя и приемника**

Вопрос о допустимом угле расхождения между осями диаграмм направленности излучателя и приемника решался прямым измерением круговой диаграммы направленности одинаковых антенн приемника и излучателя, расположенных на высоте 3 метра и дальности 20 метров, когда влияние земляного покрова минимально.

При углах расхождения 5 градусов изменения сигналов обнаружено не было.

Наиболее интересны данные на углах рассогласования диаграмм до 15 градусов. Однако размеры полей, излучаемых вбок и в обратную сторону (на углы до 180 градусов), важны для обоснования санитарных норм для операторов, расположенных вплотную к излучателю в корзине подъемного шара. В проведенных полевых экспериментах диаграммы направленности излучателя и сенсора сначала намеренно разводились на 15 градусов для оценки влияния возможной нестабильности полета, поскольку в реальных запусках на результаты измерений может оказать влияние колебания скорости и направления движения воздушных масс, перемещающих аэростаты.

Полученные осциллограммы и рассчитанные по ним спектры импульсов представлены на рисунках 5.5, 5.6.

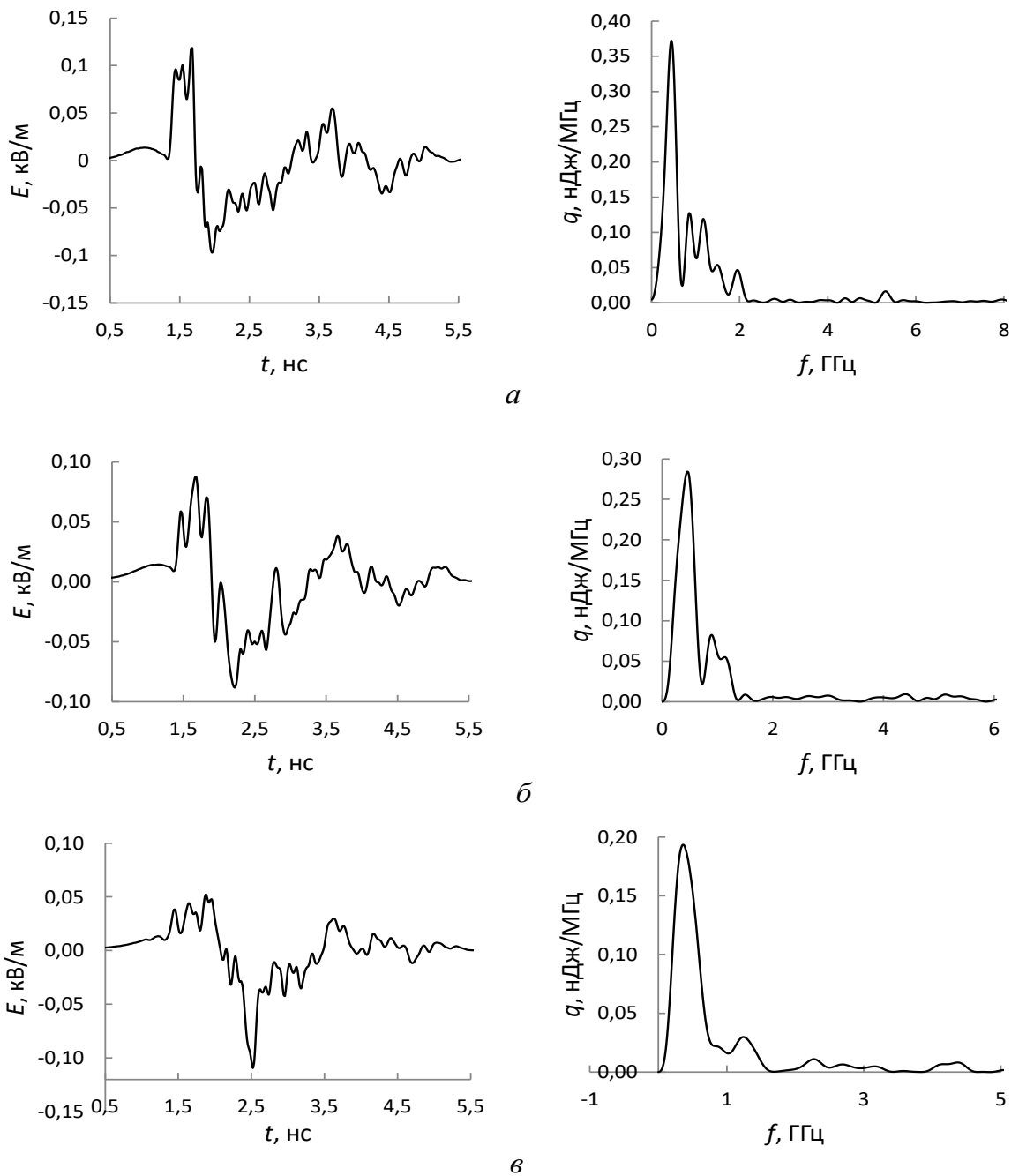


Рис 5.5 – Импульс СШП-излучения на дистанции 20 м при высотах размещения  $h_{\text{rad}} = h_{\text{sens}} = 3\text{ м}$  и отклонении оси ДНА от направления на сенсор на: (а)  $45^\circ$ ; (б)  $60^\circ$ ; (в)  $90^\circ$ .

*слева* – напряженность импульсного электрического поля;

*справа* – спектральная плотность энергии

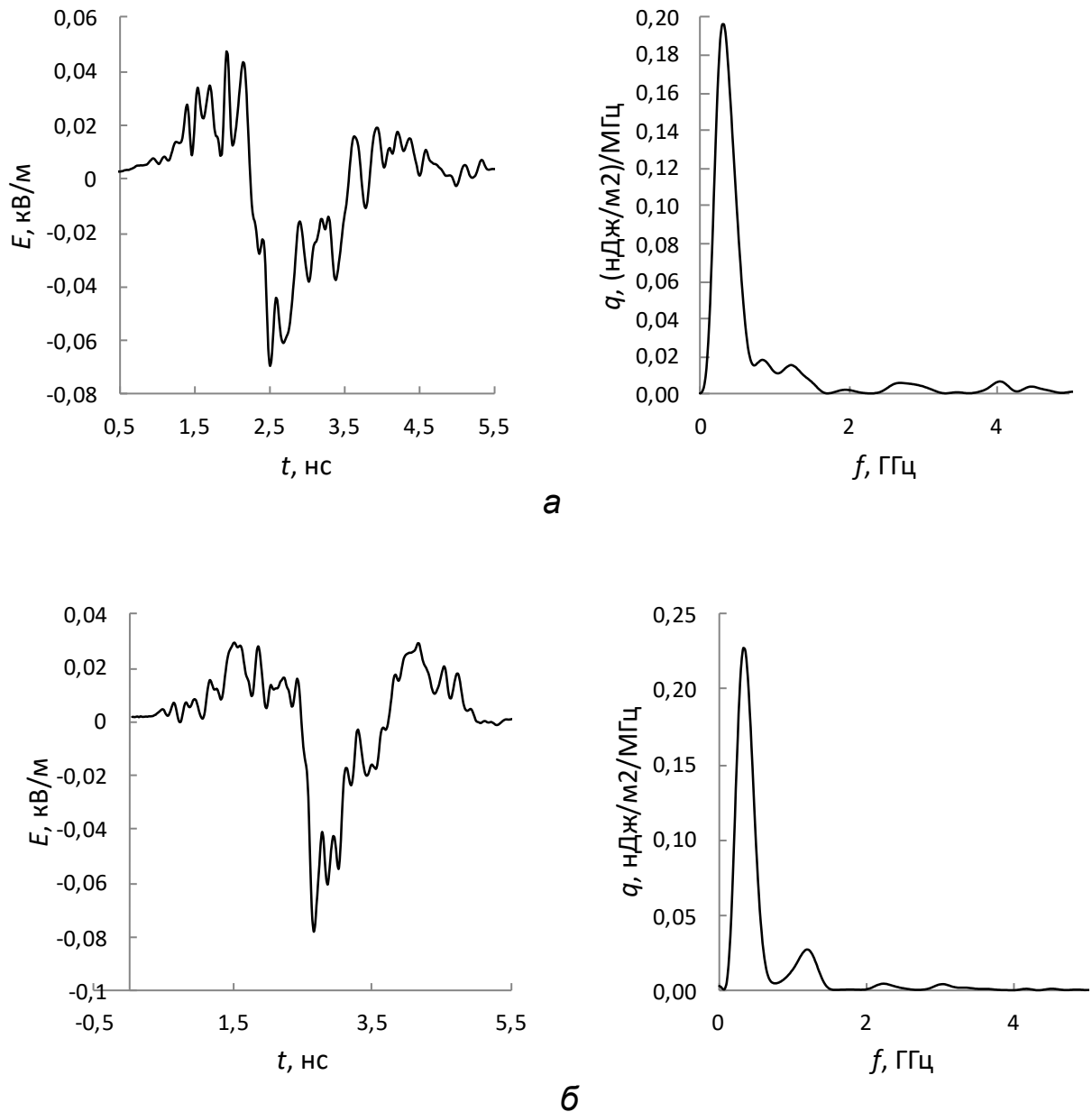


Рис. 5.6 – Импульс СШП-излучения на дистанции 20 м при высотах размещения  $h_{\text{rad}} = h_{\text{sens}} = 3\text{ м}$  и отклонении оси ДНА от направления на сенсор на: (а)  $120^\circ$ ; (б)  $180^\circ$ .

*слева* – напряженность импульсного электрического поля;

*справа* – спектральная плотность энергии

Сравнение представленных на этих осциллограммах сигналов позволяет сформулировать следующие выводы:

- при отклонении диаграмм на угол до 5 градусов по горизонтали и по вертикали изменение формы и амплитуды импульсов не фиксируется;

- при отклонении продольной оси датчика от оси излучения на углы 15 градусов форма импульса заметно изменяется: амплитуда прямого сигнала уменьшается на 40%, а его длительность растет на 10%; это не может повлиять на постановку и результативность основного эксперимента по регистрации заметного расчетного (до 50%) увеличения длительности импульса для дистанции 10 км [33], поскольку в постановке прямых опытов обеспечивается возможность надежной юстировки диаграмм на угол около 5 градусов с помощью визирных труб с разрешением до 3 градусов;

- напряженности СШП-сигналов, зарегистрированные в направлении 90 и 180 градусов от продольной оси излучения, в 20 и 50 раз меньше амплитуды прямого сигнала при росте длительности на порядок (максимум спектров сдвигается с 5 ГГц до 500 МГц), что в целом снижает требования по санитарным нормам для операторов в корзине аэростата, тем более, что для регистрации сигнала достаточно 10 секундной экспозиции.

Полученные в представленных экспериментах данные позволяют обосновать решение о проведении прямых опытов при расстоянии между излучателем и сенсором от 1 км до 10 км с увеличением высоты подъема от 100 м до 1000 м и при расположении осциллографического приемника на постоянной высоте 50 -100 м.

Основные выводы к параграфу 5.2.3:

- необходимый угол возвышения диаграммы направленности СШП-излучателя в одномодульном исполнении (с полушириной диаграммы направленности  $\pm 15$  градусов) составляет 5-6 градусов над уровнем земли;

- для достоверности исследований по прохождению в реальной атмосфере достаточно взаимно юстировать диаграммы направленности антенн приемника и излучателя в точности 5 градусов.

- при отклонении продольной оси датчика от оси излучения на углы до 15 градусов форма импульса заметно изменяется: амплитуда прямого сигнала уменьшается на 40%, а его длительность растет на 10%; тем не менее это не может повлиять на постановку и результативность основного эксперимента по регистрации заметного расчетного (до 50%) увеличения длительности импульса для дистанции 10 км [33];

- напряженности СШП-сигналов, зарегистрированные в направлении 90 и 180 градусов от продольной оси излучения, в 20 и 50 раз меньше амплитуды прямого сигнала при росте длительности на порядок (максимум спектров сдвигается с 5 ГГц до 500 МГц) , что в целом снижает требования по санитарным нормам для операторов в корзине аэростата, тем более, что для регистрации сигнала достаточно 10 секундной экспозиции.

Полученные в представленных экспериментах данные позволяют обосновать решение о проведении прямых опытов при расстоянии между излучателем и сенсором от 1 км до 10 км с увеличением высоты подъема от 100 м до 1000 м и при расположении осциллографического приемника на постоянной высоте 100 м. Реализованный таким образом угол возвышения диаграмм направленности приемника излучения над поверхностью земли будет соответствовать допустимому углу наклона (около 5 градусов) оси диаграммы направленности, установленного в модельных экспериментах в полевых условиях).

### **5.3. Постановка и реализация прямого эксперимента на дистанции 10 км и более**

Масса излучающего сверхширокополосного модуля, построенного на пикосекундных разработанных в диссертации генераторах (вместе с рупорной антенной с входным импульсным напряжением 10 кВ, аккумулятором на 20 минут автономной работы и блоком управления), составляет около 10 кг. Такие удельно-весовые параметры СШП-излучателей позволяют размещать их на легких носителях для проведения самых

различных экспериментов. Именно такой модуль оказался пригодным для применения в описываемом прямом эксперименте в атмосфере.

Как уже указывалось, из нескольких доступных вариантов реализации прохождения СШП-излучения в свободной атмосфере с минимальным влиянием земной поверхности был выбран подъем СШП-излучателей на полетном воздушном шаре с постепенным набором высоты на 100 метров на каждый километр дистанции при удалении от СШП приемников, один из которых расположен на земле на высоте 2 метра, а второй поднят на привязном шаре на высоте, изменяющейся произвольным образом в зависимости от силы ветра. Недостаток этого варианта состоит в сложности юстировки диаграмм направленности из-за воздействия ветра и неустойчивого положения корзины подъемного шара, а также невозможность запуска в туман и сильный ветер и дождь. Для обеспечения требуемой юстировки на излучателях и приемниках устанавливались оптические визиры диаметром труб 3 см и длиной 1 метр, обеспечивающие операторам возможность постоянной юстировки на цель с точностью единицы градусов.





Рисунок 5.7 – Фотография размещения двух излучателей и визирной трубки в корзине подъемного шара.

В данной работе опыты проводились ранним летним утром 21 июня 2022 года в ясную погоду со скоростью ветра примерно 2 м/с, что давало возможность пролета дистанции около 20 км за расчетное время полета шара 2 часа, определяемое запасом газа.

Измерения СШП-сигналов осуществлялось двумя цифровыми осциллографами типа DPO 71604C с полосой около 16 ГГц. Эти регистраторы размещались на высоте 2 метра на земле и на привязном подъемном шаре на высотах от 50 до 100 метров, которые менялась случайным образом в зависимости от силы ветра в течение времени проведения эксперимента (два часа).

На рис.5.8 показан рабочий процесс регистрации на осциллографе, установленном на Земле.



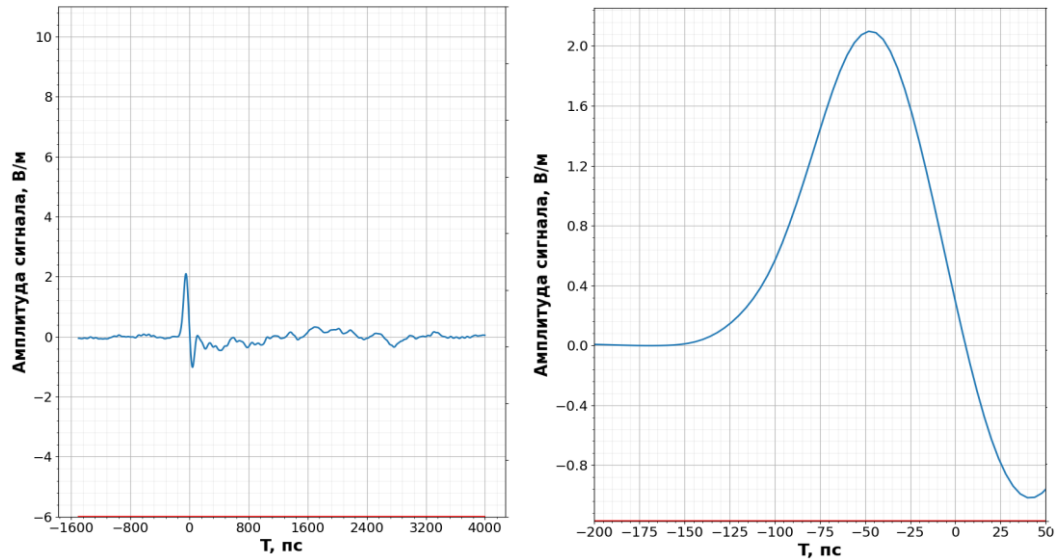
Рисунок 5.8 – Регистрация СШП-сигналов на уровне 2 метра от поверхности Земли.

Для надежности получения экспериментальных данных было принято решение использовать два попеременно включаемых одномодульных генераторов с временем роста напряжения до 50 пс, обеспечивающих с квазирупорной антенной энергопотенциал 15-20 кВ. При средней излучаемой СШП-мощности менее 40 Вт это позволяло удовлетворить санитарным нормам и обслуживать излучатели в корзине шара. Однако, это привело к необходимости использовать в качестве приемного устройства не стандартизованную измерительную линию ИППЛ, а измерительный квазирупор с чувствительностью на два порядка большей (разработка и тарировка выполнены д.ф.-м.н. Федоровым В.М.). Как показано в публикации [60], такой квазирупор обеспечивает регистрацию СШП-

импульсов длительностью около 60 пс с такими же частотными характеристиками, как ИППЛ. Измеренный коэффициент чувствительности квазирупора равен 34,4 В/(кВ/м) по сравнению с 0,38 В/(кВ/м) для ИППЛ. Для получения на экране осциллографа сигнала с амплитудой 10 мм необходимо напряжение 10 мВ. Следовательно, для обработки экспериментальных сигналов с точностью 10%, необходимо иметь в приходящей электромагнитной волне на входе ИППЛ электрическое поле с амплитудой  $(10 \text{ мВ/м}) / [(380 \text{ мВ/м}) / (1 \text{ кВ/м})] = 22 \text{ В/м}$ . Одиночный СШП-модуль с энергопотенциалом  $E \times R = 20 \text{ кВ}$  создает такую напряженность поля на расстоянии всего около 1 км. Аналогичная оценка для квазирупора дает потребную напряженность около 0,2 В/м и дальность регистрации до 100 км.

Как уже указывалось, в корзине полетного шара размещались два излучателя с близкими энергетическими параметрами с длительностью СШП-импульсов на полувысоте 60-65 пс (рис.5.7), которые включались каждые 5 минут последовательно на 20 секунд каждый. Всего в полете зафиксированы около 40 полноценных осциллограмм. Регистрация на осциллографе, расположенного на высоте 2 метра от земной поверхности, прекратилась на дистанции 6,7 км сразу после прекращения прямой видимости с полетным шаром. Регистрация на осциллографе, расположенном в корзине шара на высоте от 50 до 90 метров, продолжалась в течение всего времени эксперимента. Даже на дистанции 18,3 км при снижении до высоты 500 м регистрировались сигналы излучателей вместе с наводкой от внешнего источника с частотой около 500 МГц (не вошли в обработку).

Обработка осциллограмм СШП-приемников показывает практически незаметную деформацию формы и длительности импульсов до дистанций 10 - 15 км (рис. 5.9, 5.10, 5.11).

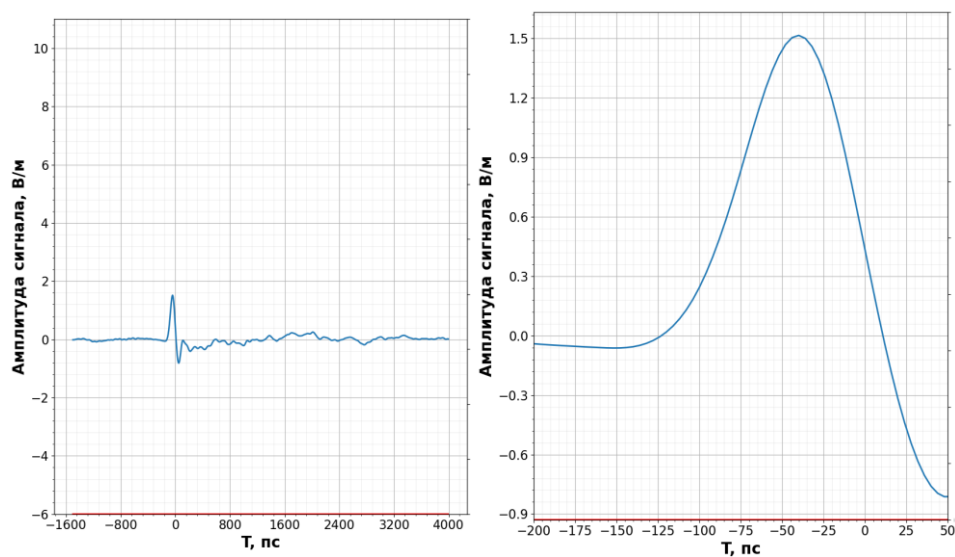


(a)

(б)

Рисунок 5.9 – Осциллограмма напряженности импульсного электрического поля вертикальной поляризации на дальности 5,6 км на высоте 1000 м.

(а) – регистрация на осциллографе; (б) – часть сигнала, несущая информацию о высокочастотной части спектра в увеличенном масштабе (время регистрации 6 часов 35 минут утра, развертки по времени 800 пс и 25 пс на деление).



(a)

(б)

Рисунок 5.10 – Осциллограмма напряженности импульсного электрического поля вертикальной поляризации на дальности 10,3 км (высота 880 м, время регистрации 6 часов 55 минут): (а) – регистрация на осциллографе; (б) – часть сигнала, несущая информацию о высокочастотной части спектра в увеличенном масштабе.

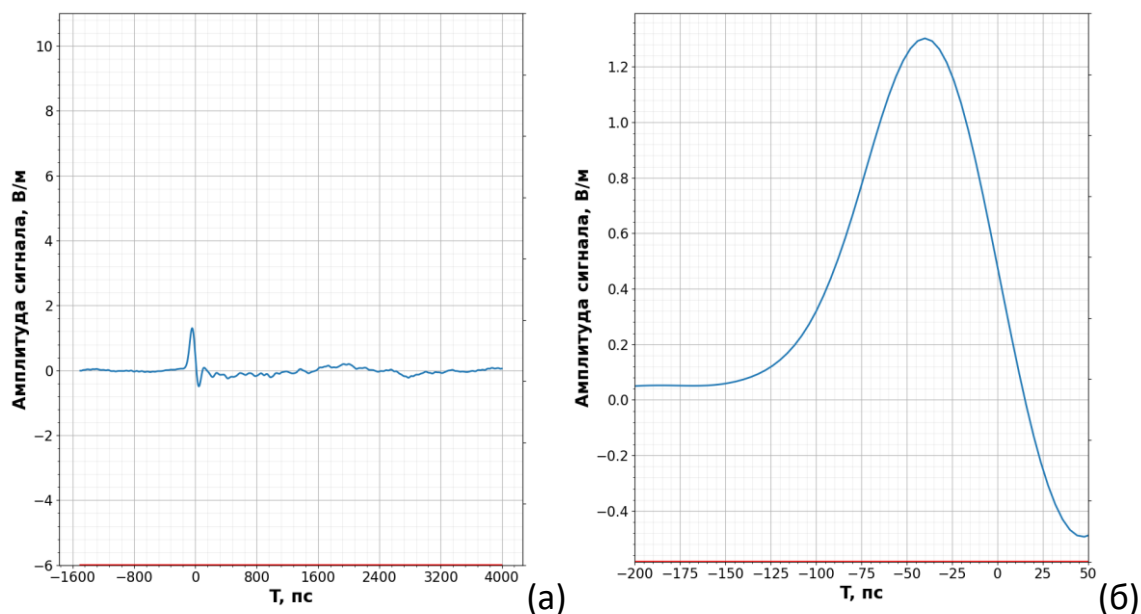


Рисунок 5.11. Осциллограмма напряженности импульсного электрического поля вертикальной поляризации на дальности 13,5км (высота 800 м, время регистрации 7 часов 10 минут):

Сигналы неизменной длительности СШП-сигналов также регистрировались вторым приемником на высоте 2 метра от земли до нарушения прямой видимости при уходе шара за линию горизонта на дальности 6,7 км.

Применяемая в экспериментах система регистрации, несмотря на использование достаточно быстродействующих осциллографических регистраторов, не смогла обеспечить передачу в регистратор исходного импульса излучения без заметного искажения длительности сигнала. Это явилось следствием наличия в канале регистрации приемной антенны с переходной характеристикой около 27 пс, высоковольтных разъемов N-типа, а также использования стандартного, а не специализированного

коаксиального радиочастотного кабеля связи между приемной антенной и осциллографом. Поэтому генераторы сверхкоротких импульсов возбуждения на основе полупроводниковых коммутаторов с выходными импульсами напряжения с длительностями фронтов нарастания 45-50 пс, будучи подключенными к импульсным антеннам, генерировали СШП-излучение, которое осциллографы (в начальной точке маршрута полета в контролируемых условиях точности наведения) регистрировали как импульсы длительностью 65 - 70 пс. В процессе регистрации из-за несовпадения осей диаграмм направленности СШП-излучателя и приемника излучения, происходило увеличение длительности регистрируемого импульса излучения, которое по уровню половинной амплитуды не превышало 12 % от исходного импульса на старте. Как указывалось выше, согласно расчетам работы [22] импульсы СШП-излучения на расстояниях свыше 10 км должны были увеличить свою длительность на 30 и более процентов, что должна была зафиксировать даже имеющаяся система регистрации. Однако такое событие не было зарегистрировано экспериментально.

На рис. 5.12 показаны сводные данные обоих излучателей по зарегистрированным импульсам излучения в терминах импульсного энергопотенциала  $E \times R$  (кВ), где  $E$  – напряженность электрического поля на расстоянии  $R$ , нормированные на максимальную вычисленную величину  $E \times R$  и центрированные по их максимальным значениям амплитуд. Графики построены на основе данных, аналогичных приведенным на вышеприведенных осциллограммах, но с использованием более чувствительных по амплитуде сигнала и пикосекундными временами развертки с ограничением длительности импульса излучения  $\frac{3}{4}$  первого периода.

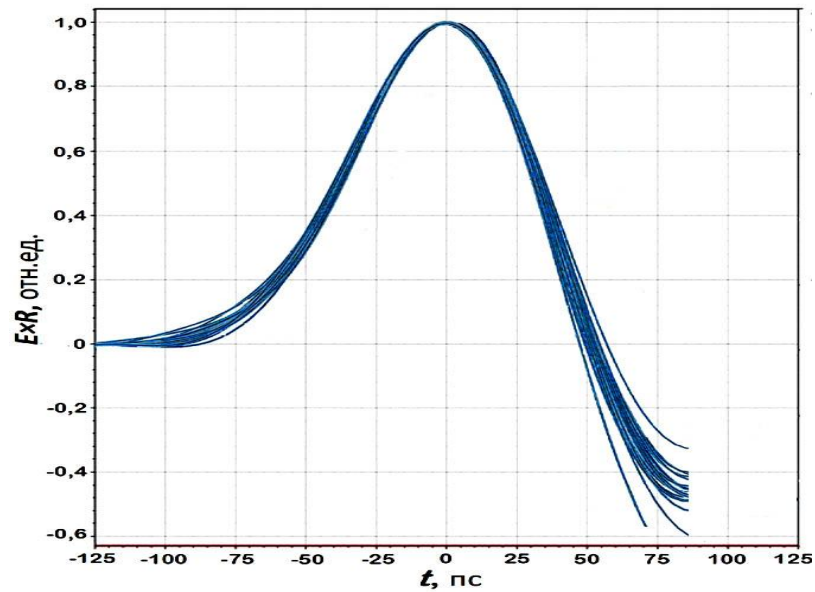


Рисунок 5.12 – Нормированные сигналы излучения всех зарегистрированных полетных экспериментов на дальности 0,6-14,3 км.

С учетом суммарной переходной характеристики канала регистрации восстановленное значение длительности импульса излучения на полувысоте амплитуды на входе в приемную антенну, по нашим оценкам, должно составлять 60-65 пс. Для излучения СШП-импульсов с длительностью 50 пс и менее необходимы генераторы импульсных напряжений с длительностью фронта нарастания импульса напряжения 25-30 пс и наличие канала регистрации с очень малой переходной характеристикой.

Итак, в работе экспериментально установлено, что на дистанциях 10-15 км СШП-импульсы длительностью 65 - 70 пс не претерпевают трансформации своей формы и не меняют полуширину, что дает основание применять эти новые знания в дальнейших проектных разработках. В частности, отсутствие деформации таких сигналов при прохождении десятикилометрового слоя атмосферы дает практическую возможность постановки экспериментов по прохождению слоя ионосферы с высоты 300 км, доступной для геофизических ракет.



Рисунок 5.13 – Аспирант и пилот Антон Морев в корзине подъемного шара после удачного приземления на дальности 18,3 км.



#### 5.4. Выводы к главе 5

1. Разработанный в главе 4 диссертации пикосекундный генератор импульсов тока с фронтом до 50 пс позволил создать СШП-излучатели с полушириной длительности импульсов 65 – 70 пс, позволяющие провести сравнение с расчетными работами по деформации импульсов при прохождении атмосферы.

2. Проведенные полевые эксперименты на малых дистанциях до 60 метров позволили получить данные о влиянии отраженных от земной поверхности сигналов на четкость регистрации основного импульса и установить достаточный угол в 5 градусов возвышения над поверхностью Земли для проведения полномасштабного эксперимента.

3. Выполненные оценки уровней регистрируемых СШП-сигналов позволили принять решение о возможности применения в прямом эксперименте на дальностях 10 км излучателя на одном модуле генератора при условии разработки квазирупорной приемной антенны с чувствительностью на два порядка большей, чем у стандартизованного измерителя ИППЛ.

4. Проведенный усилиями трех институтов (ОИВТ РАН, ИОФ РАН и ВНИИЭФ) прямой эксперимент показал неизменность полуширины СШП – импульсов длительностью 65 – 70 пс при прохождении ими дистанции до 13,5 км. Этот результат позволяет, в частности, дать основания для постановки дальнейших исследований по прохождению СШП – импульсов в ионосфере.

## Заключение

В диссертационной работе достигнуты следующие результаты:

1. Разработан компактный генератор наносекундных импульсов с амплитудой 500 кВ, длительностью импульсов 10 нс по схеме индуктивного накопителя энергии и размыкающих ДДРВ ключей. В качестве основных силовых ключей использовались высоковольтные сильноточные ФИД ключи.
2. Разработан компактный высокостабильный генератор генератор прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой до 30 кВ. Достигнута долговременная амплитудная стабильность 0.1%, одновременно с временным джиттером около 30 пс RMS, при полной задержке 300 нс. Применен в отклоняющих системах синхротронов.
3. Разработан многоканальный пикосекундный генератор с амплитудой 600 В, длительностью 250-300 пс и максимальной частотой следования 15 МГц. Нашел применение в мощных СШП-излучателях.
4. Разработан компактный наносекундный генератор с амплитудой 10 кВ и максимальной постоянной частотой следования до 1 МГц.
5. Разработан и применен принцип умножения амплитуды высоковольтных импульсов на кабельных линиях с коэффициентом 6 для генераторов мегагерцового диапазона.
6. Разработан генератор прямоугольных импульсов с амплитудой 5 кВ и длительностью в десятки наносекунд и максимальной частотой следования 5 МГц в пакетном режиме. Применен в системах отклонения электронных пучков.

7. Разработана серия генераторов импульсов напряжения с фронтом 20-40 пс и амплитудой 15 кВ, что на три порядка больше достигнутого мирового уровня. В качестве ключей использовались ФИД приборы и ДДРВ нового поколения. Применяется для запитки СШП-антенн.
8. Достигнута сверхвысокая временная стабильность для пикосекундных генераторов мегаваттного уровня. При амплитуде 15 кВ и фронте менее 40 пс зарегистрирован джиттер менее 2 пс RMS, и полный размах задержки от импульса к импульсу менее 9 пс при полной задержке около 90 пс.
9. Разработан СШП излучатель на основе генератора пикосекундных импульсов с фронтом около 50 пс и амплитудой 10 кВ для применения в фундаментальных исследованиях при прохождении СШП-сигналов в атмосфере.
10. Экспериментально исследовано прохождение СШП электромагнитного импульса с фронтом 60-70 пс через атмосферу Земли на расстояние до 15 км. Установлено, что подобные сигналы распространяются на расстояние 10 км без заметного увеличения фронта и длительности, что означает малое искажение исходного спектра СШП сигнала.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Fedorov V. M., Efanov M. V., Ostashev V. Ye., Tarakanov V. P. and Ul'yanov A. V. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. Vol. 11, Issue 9, 1011.( 2021). <https://doi.org/10.3390/electronics10091011>.

2. Kolykhalova E. D., Dudelev V. V., Zazulin S. V., Losev S. N., Deryagin A. G., Kuchinskii V. I., Efanov M. V., Sokolovskii G. S. Generation of high-power ultrashort optical pulses using a semiconductor laser with controlled current humping // *Technical Physics* volume 62, pages 1885–1888 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1063784217120131>.
3. Dudelev V. V., Zazulin S. V., Kolykhalova E. D., Losev S. N., Deryagin A. G., Kuchinskii V. I., Efanov M. V., Sokolovskii G. S. Generation of high-power ultrashort optical pulses by semiconductor lasers // *Technical Physics Letters* volume 42, pages 1159–1162 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1063785016120191>.
4. Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В., Федоров В.М., Шурупов М.А. Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере Земли // *Теплофизика высоких температур*. 2001, том 59, №6, с. 877-884.
5. Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов В.М., Ефанов М.В., Казанцев С.Ю., Кодола Б.Е., Комаров Ю.Н., Кононов И.Г., Подлесных С. В., Сивачев А.А., Фирсов К. Н., Щуров В.В., Ярин П.М. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // *Квантовая электроника*, Т. 40 № 5, 2010. Сс. 393-396.
6. Ефанов М.В., Ефанов В.М., Краснов А.В. Генератор высоковольтных импульсов // Патент на изобретение № RU2636108C1 с приоритетом от 14.02.2017 г.
7. Ефанов М.В., Затулин С.В., Краснов А.В. Генератор мощных наносекундных импульсов (варианты) // Патент на изобретение № RU2580787C1 с приоритетом от 11.02.2015 г.

8. Мырова Л.О., Фомина И.А., Пименов П. Н., Панкина Е.Г., Минченко Т.В., Ефанов М.В., Киричек Р.В. Многоканальный комплекс воздействия сверхкороткоимпульсного электромагнитного излучения с высокой частотой повторения на наземные широкополосные линии радиосвязи // Патент на изобретение № RU2579986C1 с приоритетом от 05.02.2015 г.
9. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Генератор импульсов // Патент на изобретение № RU 2589240 C1 с приоритетом от 20.04.2015 г.
10. Ефанов М.В., Краснов А.В. Система стабилизации задержки// Патент на изобретение № RU2580445C1 с приоритетом от 31.12.2014 г.
11. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Способ управления электронным ключом // Патент на изобретение № RU 2533326C1 с приоритетом от 22.04.2013 г.
12. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Ускоритель // Патент на изобретение № RU 139712 U1 с приоритетом от 29.04.2013 г.
13. Ефанов В.М., Ефанов М.В. Импульсный трансформатор на неоднородной линии // Патент на изобретение № RU 2542755 C1 с приоритетом от 20.10.2013 г.

### **Благодарности**

Автор диссертации благодарит коллектив ПК «ФИД-Техника» за многолетнее сотрудничество и сотрудников лаборатории мощных импульсных излучателей за предоставленную возможность принять участие в постановке, обеспечении приборами и в проведении фундаментальных исследований прохождения СШП-сигналов в атмосфере. Также автор выражает благодарность В.Е. Осташеву, А.В. Ульянову и В.М. Федорову за содействие в выполнении работы и консультации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев, Формирование субнаносекундных перепадов тока при задержке пробоя кремниевых р-п переходов, Письма в ЖТФ 5(15), 950-953 (1979).
2. И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, С. В. Шендерей, “Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения”, Письма в ЖТФ, 9:7 (1983), 435–439
3. Ж. И. Алфёров, В. М. Ефанов, Ю. М. Задиранов, А. Ф. Кардо-Сысоев, В. И. Корольков, С. И. Пономарев, А. В. Рожков, “Электрически управляемые трехэлектродные высоковольтные переключатели субнаносекундного диапазона на основе многослойной GaAs–AlGaAs гетероструктуры”, Письма в ЖТФ, 12:21 (1986), 1281–1285
4. Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Мощные полупроводниковые обострители субнаносекундного диапазона // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 135–136.
5. V.M. Efanov; A.F. Kardo-Sysoev; M.A. Larionov; I.G. Tchashnikov; P.M. Yarin; A.V. Kriklenko. Powerful semiconductor 80 kV nanosecond pulser. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No.97CH36127)
6. Грехов И. В. и др. Мощные дрейфовые обострители с наносекундным временем восстановления // ПТЭ. 1984. в.5. С.103–105.
7. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.А. «Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов», Доклады Академии Наук, т.330, No3, с.315-317, 1993г.
8. A SUB-PICOSECOND PULSED 5 MeV ELECTRON BEAM SYSTEM. J. Paul Farrell and Ken Batchelor Brookhaven Technology Group, Setauket, NY I. Meshkovsky, I. Pavlishin, V. Lekomstev, A. Dyublov, and M. Inochkin Optoel Scientific Innovation Company, St. Petersburg, Russia T. Srinivasan-Rao and John Smedley, CP576, Application of Accelerators in Research & Industry, 16<sup>th</sup> Int’l Conf. AIP, eds., J.L. Duggan & LL.Morgan, pp. 787-790 (2001)

9. A. I. Gusev, M. S. Pedos, S. N. Rukin, and S. P. Timoshenkov, "Solid-state repetitive generator with a gyromagnetic nonlinear transmission line operating as a peak power amplifier," *Rev. Sci. Instrum.* 88, 074703 (2017).
10. A. I. Gusev, M. S. Pedos, A. V. Ponomarev, S. N. Rukin, S. P. Timoshenkov, and S. N. Tsyranov, "A 30 GW subnanosecond solid-state pulsed power system based on generator with semiconductor opening switch and gyromagnetic nonlinear transmission lines," *Rev. Sci. Instrum.* 89, 094703 (2018).
11. E. A. Alichkin, M. S. Pedos, A. V. Ponomarev, S. N. Rukin, S. P. Timoshenkov, and S. Y. Karelin, Picosecond solid-state generator with a peak power of 50 GW, *Review of Scientific Instruments* 91, 104705 (2020)
12. S. N. Rukin, Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review. *Rev. Sci. Instrum.* 91, 011501 (2020)
13. M. R. Ulmaskulov, G. A. Mesyats, A. G. Sadykova, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, and M. I. Yalandin, "Energy compression of nanosecond high-voltage pulses based on two-stage hybrid scheme", *Review of Scientific Instruments* 88, 045106 (2017)
14. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. - М.: Наука, 2004.
15. Пикосекундная субмегавольтная техника / К. А. Желтов. - Москва : [б. и.], 2007. - 183, [1] с. : ил.; 24 см.; ISBN 978-5-7493-1160-0
16. T E Broadbent, New high-voltage multi-stage impulse generator circuit, 1960 *J. Sci. Instrum.* 37 231
17. Воробьев Г.А., Месяц Г.А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов, М.: Госатомиздат, 1963.
18. Ковальчук, Б.М., Кремнев, В.В. Генераторы Аркадьева–Маркса для сильноточных ускорителей. – Физика и техника мощных импульсных систем / [Под ред. Е.П. Велихова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
19. Grekhov, I.V., Ivanov, P.A., Konstantinov, A.O. et al. On the possibility of creating a superfast-recovery silicon carbide diode. *Tech. Phys. Lett.* 28, 544–546 (2002). <https://doi.org/10.1134/1.1498779>



20. Afanasyev, A.V., Ivanov, B.V., Ilyin, V.A., Kardo-Sysoev, A.F., Kuznetsova, M.A., Luchinin, V.V., 2013. Superfast Drift Step Recovery Diodes (DSRDs) and Vacuum Field Emission Diodes Based on 4H-SiC. MSF 740–742, 1010–1013.
21. Ilyin, V.A., Afanasyev, A.V., Ivanov, B.V., Kardo-Sysoev, A.F., Luchinin, V.V., Reshanov, S.A., Schöner, A., Sergushichev, K.A., Smirnov, A.A., 2016. High-Voltage Ultra-Fast Pulse Diode Stack Based on 4H-SiC. MSF 858, 786–789. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.858.786>
22. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М: Наука, 1967. 685с
23. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007. том. 177, № 11. С. 1145–1177.
24. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. М.: Росгидромет, 1972. 348 с.3.
25. Грудзинская Г.П. Распространение радиоволн. М: Высшая школа, 1975. 280 с.
26. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М.: Наука, 1990. 452 с.
27. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли . М.: Радио и связь, 1983. 223 с.
28. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. 2-е изд.. М., Энергия. 1975, 528 с.
29. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. К вопросу о расплывании импульсов в диссипативных и неравновесных средах // Известия Вузов, Радиофизика, т. 22, № 10, 1999. С. 1223-1229.
30. Зеркаль А.Д., Вопросы практического использования системы ближней радиолокации на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением // Журнал радиоэлектроники. 2012. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/3/text.html>.
31. Иванченко В.А., Николаев В.В. Особенности распространения сверхкоротких импульсов в среде загрязнитель–атмосфера // Письма в ЖТФ. 2000, том 26, вып.19. С. 66 - 71.

32. Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Журавлев А.В. Исследование взаимодействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов с вертикально стратифицированной атмосферой // Электронный журнал «Исследовано в России». 2002 год. С. 1-19.
33. Стадник А.М., Ермаков Г.В. Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли // Радиотехника и электроника. 1995, том 40, вып.7. С.1009 – 1016.
34. Наумов Н.Д. Дифракция радиоимпульсов в ионосфере // Прикладная физика, 2017. № 1
35. Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М. Распространение сверхширокополосного радиоимпульса в холодной плазме // ДАН, сер. Физика. 2006, т.408, №6, С. 754-757.
36. Касперович М.М., Кондратёнок В.А. Влияния концентрации электронов в ионосфере на сверхширокополосные сигналы // Информационные технологии в образовании, науке и производстве. Вторая Международная научно-техническая конференция. 04 декабря 2014. Секция: Информационные технологии в производстве и научных исследованиях. [Электронный ресурс]. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/>
37. Кондратенко В.А, Горшков С.А. и др. Коррекция искажений, возникающих при прохождении сверхширокополосных сигналов через ионосферу // Информационные технологии в образовании, науке и производстве. Третья Международная научно-техническая конференция. 20-21 ноября 2015. Электронный ресурс. URL: <https://www.openrepository.ru/article?id=58158>.
38. Строев А. К. Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сверхширокополосных радиолокационных сигналов, позволяющих компенсировать их искажения при прохождении через неоднородную ионосферу. Дисс. канд. физ.-мат. наук. М. МФТИ, 2019 .119 с.
39. Солдатов А.В., Терехин В.А. Распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме // Физика плазмы. 2016. Т. 42, № 10. С. 927 - 935.

40. Пятаков Н.П., Солдатов А.В. Аналитические решения некоторых задач дифракции сверхширокополосного электромагнитного излучения в высокочастотном приближении для уравнений Максвелла // Реферат РФЯЦ ВНИИЭФ, Серия теоретическая и прикладная физика, выпуск 5, 2018.
41. Петренко П.Б., Бонч-Бруевич А.М. Моделирование и оценка ионосферных искажений широкополосных радиосигналов в локации и связи // Вопросы защиты информации. 2007. №3. С. 24.
42. Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Безродный К.П. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2012. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.html>.
43. Жиганов С.Н. Модель отраженного от подстилающей поверхности сигнала // Проектирование и технология электронных средств. 2011. №1, С. 52–54.
44. Курангышев А.В., Дедушкин А.В., Казначеев А.В. Оценка ослабления радиосигнала по методу идеальной радиопередачи с учетом влияния земной поверхности // Молодой ученый. 2016, №3 (1070), С. 131-133.
45. Жарко В.О., Барталев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 159-170.
46. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Ершов Д.В. и др. Спутниковый мониторинг лесов России. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 443-447.
47. Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Миронов В.Л. и др. Векторное радиопросвечивание лесного полога // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2002. – № 1.
48. Ветлужский А.Ю., Калашников В.П. Экспериментальное исследование влияния растительности на распространение широкополосных сигналов // ВЕСТНИК ВСГУТУ. 2015. №4(55), С. 5 - 8.

49. Наумов Н.Д., Никольский В.А. Влияние дождя на распространение радиоимпульсов // Успехи прикладной физики, 2017, вып.5 (общая физика), №1. С. 41-44.
50. А. Г. Гранков, А. А. Мильшин. А.А. Чухланцев, Н. К., Шелобанова. Спектральные измерения ослабления радиоволн кронами деревьев в природных условиях. Препринт ИРЭ РАН, Москва, 2004, 22 с.
51. Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А. Влияние поверхности земли на распространение сверхкоротких импульсов электромагнитного поля. // Технологии электромагнитной совместимости (ЭМС). М. Технология. 2006, №2, С. 50-53
52. В.Е.Осташев, А.В.Ульянов, В.М.Федоров, Радиотехн. и электрон., 65, (3), 234 (2020).
53. Ефанов М.В., Лебедев Е.Ф., Ульянов А.В., Федоров В.М., Шурупов М.А. Излучательно-измерительный комплекс для исследования прохождения сверхширокополосных сигналов в атмосфере и ионосфере Земли // Теплофизика высоких температур, 2021, том 59, вып.6, С. 877-884
54. Сайт ТРИМ
55. Сайт Picosecond Labs
56. S.D. Velikanov, S.G. Garanin, A.P. Domazhirov, V.M. Efanov, M.V. Efanov, S.Yu. Kazantsev, B.E. Kodola, Yu.N. Komarov, I.G. Kononov, S.V. Podlesnykh, A.A. Sivachev, K.N. Firsov, V.V. Shchurov, P.M. Yarin, Solid-state laser-pumped high-power electric-discharge HF laser. // Quantum Electronics 40 (5) 393-396, 2010.
57. V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kriklenko, P.M. Yarin, S.V. Zazoulin, High-Voltage and High-PRF FID Pulse Generators. // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9, 2010.
58. V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.S. Arbuzov, A.V. Kriklenko, N.K. Savastianov. Megavolt all-solid-state FID pulse generators for accelerator applications. // 2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science (ICOPS).

59. Пат. 2580787, Российская Федерация, МПК H03K 3/53, генератор мощных наносекундных импульсов (варианты). // Ефанов М.В., Зазулин С.В., Краснов А.В. Заявка 2015104632/08 2015.02.11.
60. Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye., Tarakanov V.P., Ul'yanov A.V. Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // Electronics. 2021. V. 10. № 9. P. 1011.