

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

ПУРЫГА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ  
ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ПЛАЗМЕННЫХ  
ЛОВУШКАХ ИЯФ СО РАН**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Хильченко Александр Дмитриевич

Новосибирск — 2020

## Оглавление

<b>Введение</b>	<b>.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1.</b>	<b>Методы построения аппаратуры регистрации в диагностике томсоновского рассеяния.....</b>	<b>17</b>
1.1.	Физические основы томсоновского рассеяния .....	17
1.2.	Основные элементы диагностики томсоновского рассеяния .....	22
1.3.	Системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния .....	31
<b>Глава 2.</b>	<b>Система регистрации диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ.....</b>	<b>41</b>
2.1.	Особенности диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ – 3 и ГДЛ.....	41
2.2.	Модули фотоприемников на основе лавинных фотодиодов .....	50
2.3.	Модуль адаптера каналов связи Ethernet.....	55
2.4.	Регистратор ADC12500.....	56
2.4.1.	Аналоговый узел регистратора .....	57
2.4.2.	Цифровой узел регистратора.....	61
2.5.	Система синхронизации .....	68
2.6.	Программное обеспечение системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния .....	71
2.7.	Применение систем регистрации диагностик томсоновского рассеяния в плазменном эксперименте.....	72
2.8.	Основные результаты Главы 2.....	76
<b>Глава 3.</b>	<b>Система регистрации сигналов на основе метода масштабно-временного преобразования для диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ .....</b>	<b>79</b>

3.1. Модернизация диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ .....	79
3.2. Высокоскоростной регистратор на основе матрицы емкостных накопителей .....	88
3.2.1. Аналоговый тракт регистратора .....	89
3.2.2. Цифровой тракт регистратора .....	99
3.2.3. Дополнительные элементы регистратора .....	110
3.3. Основные результаты Главы 3 .....	112
<b>Заключение .....</b>	<b>118</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений .....</b>	<b>121</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>123</b>

## Введение

Диагностические комплексы являются средством для проведения экспериментальных исследований по физике высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС). Их задача заключается в определении параметров плазмы и динамики их поведения во времени. Такими параметрами могут быть температура, плотность электронов, плотность тока и другие величины, которые представляют интерес для экспериментатора. Особенную ценность представляют диагностические методы, позволяющие напрямую измерять те или иные параметры плазмы с локализацией в пространстве и разрешением по времени. Одной из таких диагностик, является диагностика томсоновского рассеяния (ТР), которая позволяет измерять локальные значения температуры и плотности плазмы. В её основу положена методика регистрации интенсивности и спектрального состава излучения, рассеянного на свободных электронах [1 - 3]. Диагностика ТР относится к числу основных и используется практически на всех экспериментальных термоядерных установках. В частности, на Токамаках JET (Калхэм, Великобритания), DIII-D (Сан-Диего, США), T – 10 (Москва, Россия), Глобус-М (Санкт-Петербург, Россия), стеллараторах W7-X (Грайфсвальд, Германия), LHD (Токи, Япония) [4 - 9]. Использование этой диагностики предполагается и на международном реакторе ITER, строящемся в исследовательском центре Кадараш во Франции [10].

Диагностические комплексы ТР содержат:

1. *Лазер*, выполняющий функции генератора зондирующего излучения. Доля рассеянной плазмой энергии ничтожна мала в сравнении с энергией зондирующего излучения и составляет величину  $\sim 10^{-14}$ . Для оценки, можно принять 1000 фотонов в качестве порогового количества зарегистрированных фотонов за длительность одного измерения. Использование детекторов и усилителей сигнала позволяет конвертировать такой оптический сигнал в заряд или напряжение, которое может быть зарегистрировано с соотношением сигнал/шум  $\sim 10$ .

Из оценки мощности томсоновского рассеяния для типичных параметров эксперимента следует, что зондирующий лазерный пучок должен иметь мощность порядка  $10^6$  Вт. Добиться этого можно только в импульсном или импульсно-частотном режиме работы лазера с частотой повторения импульсов от долей до сотен герц, при длительности импульса до нескольких десятков наносекунд. На начальном этапе развития диагностики ТР применялись рубиновые лазеры [11] с длиной волны  $0,69 \mu\text{m}$ , излучаемая энергия которых лежала в диапазоне 1-10 Дж. Первый опыт измерения электронной температуры плазмы при помощи томсоновского рассеяния на рубиновом лазере в токамаке Т-3 описан в работе [12]. С развитием технологий, большее распространение получили разнообразные неодимовые лазеры с длиной волны около  $1 \mu\text{m}$  или  $0.5 \mu\text{m}$  (вторая гармоника). При этом характерная длительность зондирующего импульса, и, соответственно, рассеянного сигнала лежит в диапазоне от 1 до 20 нс. Исключением, связанным с относительно малым временем удержания плазмы, является диагностика ТР в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу. В качестве примера, можно указать ТР на установке NIF (LLNL, Ливермор, США) [13], в которой длительность лазерного импульса 200 псек;

2. *Спектрометр*, анализирующий спектр рассеянного излучения. Для решения этой задачи используются приборы с высокой светосилой на основе дифракционной решётки или других спектрально-селективных элементах [14, 15];
3. *Детекторы* с высокой квантовой эффективностью в области спектра рассеянного излучения, обладающие высоким быстродействием. Помимо этого, они должны иметь большой амплитудный динамический диапазон, позволяющий перекрывать широкий диапазон плотностей, характерных для плазмы в современных установках. На установках с высоким фоновым излучением плазмы, например, на таких как ГОЛ-3

(Новосибирск, Россия) [16], Глобус-М [7], широкий амплитудный диапазон детекторов и измерительных трактов позволяет зафиксировать слабый сигнал рассеяния, наложенный на интенсивную фоновую компоненту, обусловленную паразитным линейчатым излучением атомов и ионов примесей, попадающих в плазму со стенок камеры;

#### 4. Система регистрации, обеспечивающая фиксацию сигналов детекторов.

Форма спектра нерелятивистского некогерентного томсоновского рассеяния описывается гауссовой кривой с центром на длине волны лазера и шириной, пропорциональной  $\sqrt{T_e}$ . Для определения температуры плазмы в одной локальной точке необходимо измерить ширину спектра. Практически, это требует его фиксации в нескольких спектральных окнах. Как правило, используется от четырёх до шести спектральных каналов, что предопределяет использование в диагностике ТР многоканальных измерительных систем. Измерение пространственных распределений плотности и температуры плазмы, то есть фиксация сигнала в нескольких точках, приводит к пропорциональному увеличению количества каналов регистрации. К примеру, если спектрометр ТР имеет шесть каналов, то для измерения пространственного профиля температуры и плотности электронов по десяти точкам, требуется 60 каналов системы регистрации. На крупных современных токамаках и стеллараторах диагностика ТР для центральной области плазменного шнура имеет порядка 50 точек. Поэтому, в случае данной диагностики, задача создания систем регистрации с большим количеством синхронных каналов является особенно **актуальной**.

Для построения систем регистрации ТР можно выделить несколько основных принципов. Исторически, первым начал использоваться метод, основанный на интегрировании сигнала детектора по времени и последующей его оцифровке. При этом максимальная частота повторения последовательности накопления и оцифровки сигнала ограничивает сверху

допустимую максимальную частоту следования лазерных импульсов. В данном методе могут применяться АЦП с относительно небольшой частотой дискретизации (~несколько МГц) и расширенным амплитудным динамическим диапазоном (14-16 бит). Аналогичный метод регистрации энергии сигналов малой длительности широко использовался и используется до сих пор в физике высоких энергий. Он хорошо отработан и апробирован на разных детекторах, что и стало его неоспоримым преимуществом при разработке регистрирующей аппаратуры для диагностики ТР. Главным преимуществом метода интегрирования сигнала, является увеличение соотношения сигнала к шуму за счёт уменьшения полосы частот, в котором происходит регистрация того и другого. Современные измерительные системы на практике демонстрируют соотношение сигнала к шуму, весьма близкое к теоретическому пределу  $\sqrt{N}$ , где  $N$  – полное количество фотоэлектронов в импульсе рассеяния. В диагностиках ТР метод интегрирования широко используется на установках с малым уровнем собственного излучения плазмы. В частности, на токамаках SST-1, HT-7A, ДШ-D [17, 18]. На основе метода интегрирования может быть построена многоканальная система регистрации, отличающиеся сравнительно низкой стоимостью за канал.

Недостатком метода интегрирования является невозможность отделения сигнала рассеяния от сигнала фонового излучения плазмы в одном измерении. Требуется минимум два измерения с интегрированием по времени, одно из которых содержит импульс рассеяния. Поэтому необходимым условием является постоянство фона в течение этих измерений. При этом метод интегрирования не предоставляет индикатора, по которому результаты должны быть отброшены в случае нарушения данного условия. Полная информация может быть предоставлена осциллограммой сигнала, зафиксированной в достаточной полосе частот с соответствующей частотой дискретизации. По мере развития микроэлектроники появились кристаллы АЦП с частотой дискретизации выше 100 МГц с динамическим диапазоном 10

бит и более. Это позволило использовать для регистрации сигналов рассеяния методику, основанную на прямой оцифровке их текущих амплитудных значений во всех спектральных окнах. Она позволяет регистрировать форму сигналов малой длительности в широком диапазоне изменения их амплитудных значений или контрастности импульса рассеяния по отношению к уровню фонового излучения плазмы. При этом может быть решена задача отделения сигнала рассеяния и фона. В качестве примеров измерений ТР с относительно высоким уровнем фонового излучения плазмы можно привести Глобус-М, ГОЛ-3, W-7X, ASDEX [19, 20, 8, 32] и некоторые другие [21 - 23].

Наиболее существенным недостатком описанной методики является высокая стоимость его аппаратных средств и высокие уровни потребления электроэнергии и тепловыделения. Поэтому оправданным и актуальным является поиск альтернативного метода высокоскоростной фиксации формы импульса, свободного от упомянутых недостатков. Наиболее привлекательной является методика масштабного-временного преобразования сигналов, основанная на фиксации их текущих амплитудных значений в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения (матрицы емкостных накопителей), и последующей их оцифровке относительно медленным АЦП. Её применение долгое время сдерживалось отсутствием необходимой микроэлектронной элементной базы. Ситуация поменялась с появлением SCA (switch capacitor array) технологии, в рамках развития которой были разработаны кристаллы, содержащие тысячи ячеек выборки и хранения. В качестве примера можно привести кристаллы DRS, PSEC, NECTAR, TARGET [24 - 26], разработанные в различных зарубежных учреждениях: PSI (Швейцария), EFI (США), IRFU (Франция), University of Hawai'i at Manoa (США). Регистраторы, построенные на базе таких кристаллов, имеют более низкую стоимость по сравнению с регистраторами на базе быстродействующих АЦП, большее количество измерительных трактов и соизмеримые или лучшие амплитудно-частотные характеристики. Они позволяют вести оцифровку сигналов с частотой дискретизации до

нескольких десятков гигагерц, но на ограниченной временной базе, определяемой количеством ячеек матриц емкостных накопителей. Регистраторы на основе такой методики преобразования сигналов широко используются в физике высоких энергий на таких детекторах, как ATLAS, MEGII, BELLEII [27 - 29].

**Целью диссертационной работы** является создание систем регистрации диагностики томсоновского рассеяния для экспериментов по физике плазмы и УТС в установках ГОЛ-3 и ГДЛ. В рамках диссертационной работы, были решены следующие **основные задачи**:

- Разработка системы регистрации для диагностических комплексов ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ, позволяющей фиксировать форму исследуемых сигналов длительностью 10-50 нс при наличии яркого фонового излучения плазмы в рабочем спектральном диапазоне;
- Разработка системы регистрации для модернизированного диагностического комплекса ТР установки ГДЛ с шестью линиями наблюдения для измерения динамики радиального профиля температуры и плотности электронной компоненты плазмы. Система обеспечивает регистрацию сигнала рассеяния длительностью около 10 нс с частотой повторения до 10 Гц.

Материал диссертационной работы представлен в следующем порядке.

**В первой главе** кратко рассматриваются физические принципы, лежащие в основе диагностики ТР. Здесь же рассматриваются основные компоненты диагностических комплексов ТР. Более детально обсуждаются различные методы регистрации сигналов малой длительности, их преимущества и недостатки.

**Вторая глава** посвящена измерительному комплексу, аппаратура регистрации которого построена на основе быстродействующих АЦП. На момент разработки этого комплекса в ИЯФ СО РАН уже имелась хорошая приборная база, в том числе были разработаны модули быстродействующих двухканальных регистраторов ADC12500, подходящих для фиксации

сигналов ТР. Была также отработана методика построения на основе этих приборов многоканальных синхронных измерительных систем [33].

В качестве источника излучения в диагностике ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН используется неодимовый лазер с длиной волны 1054 нм. С его помощью на установке ГОЛ-3 генерируется импульс лазерного излучения с энергией до 10 Дж и длительностью 20 нс, а на установке ГДЛ, импульс с энергией до 20 Дж при длительности 50 нс.

Измерительный комплекс диагностики имеет модульную архитектуру и строится на основе восьмиканальных измерительных подсистем, включающих в свой состав фотоприёмники, двухканальные регистраторы (ADC12500), модули синхронизации и адаптер канала связи Ethernet/UART. Фотоприёмники, построенные на основе лавинных фотодиодов, имеют рабочую полосу частот сигнала от 0 до 50 МГц. Адаптер канала связи Ethernet/UART обеспечивает связь фотоприемников с сервером диагностики. Регистраторы ADC12500, фиксируют текущие амплитудные значения сигналов рассеяния длительностью ~20-50 нс с частотой дискретизации до 500 МГц при амплитудном разрешении 12 бит и накапливают результаты измерений в буферном запоминающем устройстве (БЗУ) объемом 2 Мбайт. Модуль синхронизации обеспечивает прием и размножение внешнего импульса запуска, а также генерацию опорных синхросигналов, формирующих временную шкалу регистраторов ADC12500.

В **третьей главе** рассматривается система регистрации диагностики ТР, построенная на основе принципа масштабно-временного преобразования. Основой системы регистрации стали девятиканальные кристаллы матриц емкостных накопителей DRS4 [26], содержащие в каждом канале по 1024 ячейки выборки и хранения. Этот кристалл позволяет фиксировать текущие амплитудные значения сигналов рассеяния с временной дискретностью 200 пс в 11-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Неизбежным следствием выбранного принципа регистрации, является необходимость проведения дополнительных процедур калибровки ячеек матрицы емкостных

накопителей, что несколько усложняет их использование. В этой главе так же приводится детальное рассмотрение этих процедур.

В качестве источника излучения на модернизированной диагностике ТР на установке ГДЛ используется неодимовый лазер с длиной волны 1064 нм, Энергия в импульсе составляет 1.7 Дж, а его длительность 10 нс. Оптическая система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов в шести точках в плазме, расположенных вдоль лазерного пучка. Она имеет модульную архитектуру, в которой каждой пространственной точке соответствует отдельный спектральный прибор (спектрометр). Спектрометр содержит шесть спектральных каналов, использующих в качестве детекторов излучения лавинные фотодиоды. Седьмой, вспомогательный канал служит для регистрации энергии лазерного импульса. Сигнал этого канала формируется рpn диодом, установленным на оптической плите лазера. Он используется для измерения энергии в импульсе, необходимой для вычисления плотности электронов. Связь системы регистрации с сервером диагностики осуществляется посредством интерфейса Ethernet 10/100/1000.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

- Разработанные синхронные многоканальные системы сбора данных для диагностических комплексов томсоновского рассеяния на основе быстродействующих регистраторов формы импульсов ADC12500 были введены в эксплуатацию на линейных ловушках с магнитным удержанием плазмы: ГОЛ-3 и ГДЛ в ИЯФ СО РАН. Данные измерений, полученные при их помощи, впервые сделали возможными ряд исследований. На ГОЛ-3 были реализованы измерения температуры и плотности электронов по сигналам рассеяния с многократно превышающим их по амплитуде уровнем фонового излучения плазмы. На ГДЛ система регистрации томсоновского рассеяния впервые обеспечила достоверные измерения электронной температуры 1 кэВ, достигнутой в открытой магнитной ловушке с использованием микроволнового нагрева

плазмы. Благодаря высокому соотношению сигнал/шум измерительных каналов системы регистрации точность измерения электронной температуры составила  $1 \div 10\%$ , что сделало возможным экспериментальное исследование различных режимов нагрева плазмы в широком диапазоне изменения плотности электронов;

- Основой созданных систем сбора данных является двухканальный регистратор формы импульсов ADC12500, работающий с частотой дискретизации до 500 МГц в амплитудном динамическом диапазоне 12 бит. Его уникальными особенностями являются возможность программного управления параметрами измерительных трактов (амплитудный диапазон, частота дискретизации) и режимами работы (однократный или страничный). Последнее обстоятельство позволяет интегрировать систему регистрации в диагностику томсоновского рассеяния с импульсно-периодическими лазерами. Так же в регистраторе реализована возможность программной модификации алгоритма обработки данных при помощи загружаемого в ПЛИС цифрового узла конфигурационного файла. Это позволило использовать его не только в качестве основного элемента измерительного комплекса томсоновского рассеяния, но и в других диагностиках: нейтронной, гамма-спектроскопии и регистрации микроволнового излучения плазмы;
- Создана система регистрации сигналов томсоновского рассеяния нового поколения, включающая в свой состав: малошумящие детекторы на основе лавинных фотодиодов, быстродействующие регистраторы для фиксации высокочастотной компоненты рассеянного сигнала и восьмиканальные регистраторы для фиксации низкочастотной фоновой компоненты. Система регистрации оптимизирована для использования в диагностиках томсоновского рассеяния с большим числом пространственных точек наблюдения, характерных для современных крупномасштабных экспериментов по

физике плазмы и УТС. Быстродействующие регистраторы построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабного-временного преобразования. Регистраторы этого типа фиксируют текущие амплитудные значения рассеянного сигнала в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения (матриц емкостных накопителей), и последующей оцифровки с помощью АЦП, работающего в мегагерцовом диапазоне. Использование ПЛИС большой ёмкости со встроенным процессором для построения цифрового узла регистратора позволило перенести на программный уровень проведение ресурсоёмких калибровочных процедур, направленных на улучшение метрологических характеристик прибора. Применение ПЛИС позволило выполнять предварительную обработку данных на уровне системы регистрации и существенно сократить объём данных, передаваемый в диагностический сервер. Благодаря калибровочным процедурам удалось обеспечить следующие характеристики измерительных трактов системы регистрации: амплитудный динамический диапазон 10 бит при частоте дискретизации 5 ГГц. Использование решения типа «компьютер на кристалле» с интегрированным в ПЛИС процессором и контроллером Ethernet, позволило создать инновационную систему регистрации сигналов, оптимизированную для размещения на борту спектрометра томсоновского рассеяния или аналогичного прибора;

- В рамках разработки системы сбора данных диагностического комплекса томсоновского рассеяния установки ГДЛ были разработаны быстродействующие детекторы излучения ближнего ИК диапазона на основе лавинных фотодиодов и усилителей, обладающие ультранизкой величиной соотношения сигнал/шум  $\sim 40$ Дб в полосе частот 0 – 50 МГц. В этих детекторах шумовая

компонента измеряемого сигнала определяется статистикой фотоэлектронов лавинного фотодиода.

**Практическая значимость** работы характеризуется успешным опытом эксплуатации созданных электронных систем на установках ГДЛ и ГОЛ-3 на протяжении более восьми лет. Созданные системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния на ГОЛ-3 и ГДЛ позволили получить ценные физические результаты. В частности, система регистрации ТР сделала возможным экспериментальное подтверждение существенного роста электронной температуры плазмы в ГДЛ при инжекции микроволнового излучения. На основе прибора ADC12500, были разработаны регистратор ADC12500PXIe [34], сертифицированный по стандартам ИТЭР [85] и регистратор ADC122000 [87], входящий в состав измерительной системы томсоновского рассеяния на установке Глобус-М. Введение в эксплуатацию регистраторов на основе метода масштабного-временного преобразования (SCA), интегрированных в спектрометры модернизированной диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ, позволило реализовать модульную структуру всего комплекса, существенно уменьшить влияние внешних электромагнитных наводок, значительно уменьшить габариты системы регистрации и её стоимость.

**Теоретической значимостью** работы, в первую очередь, является вклад в развитие метода высокоскоростной регистрации импульсных сигналов малой амплитуды на основе принципов прямой оцифровки, а также масштабного-временного преобразования. Проведён сравнительный анализ технологий и решений в области микроэлектроники, актуальных на сегодняшний день для решения этой задачи. Разработанные подходы и методики обладают значительной вариативностью и имеют большой потенциал развития. В качестве примера, можно указать концепцию диагностики томсоновского рассеяния с лазерным импульсом малой длительности  $\sim 1$  нс и высокой частотой повторения с пространственной локализацией области наблюдения за счёт времяпролетной задержки импульса (LIDAR). Ярким примером такого

подхода является диагностика на токамаке JET [4]. Применение регистраторов на основе SCA, теоретически, способно значительно улучшить амплитудное разрешение и динамические характеристики системы.

**Личное участие автора** в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Им были предложены структурные решения, положенные в основу описанных систем регистрации. Автор принимал участие в аппаратной разработке большинства элементов систем регистрации томсоновского рассеяния. А именно: семейства детекторов на основе лавинного фотодиода, регистратора ADC12500, системы синхронизации, высокоскоростного регистратора сигнала на основе матриц емкостных накопителей и дополнительного модуля регистрации для измерения фонового излучения плазмы. Для регистратора ADC12500, модуля таймера, входящего в состав системы синхронизации, регистратора на основе матриц емкостных накопителей автором были лично реализованы алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС), выполняемые на базовых логических элементах ПЛИС. Автор лично занимался тестированием, отладкой и вводом в эксплуатацию всех элементов измерительных комплексов.

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН. Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на всероссийской научной конференции студентов – физиков ВНКСФ – 16 (Волгоград, 2010), 14-й, 16-й, 17-й и 18-й Всероссийских конференциях «Диагностика высокотемпературной плазмы» (г. Звенигород, 2011, 2015, 2017 и с. Красная Пахра, 2019), на международных симпозиумах по ядерной физике (г. Анахайм, США, 2012; г. Страсбург, Франция, 2016; г. Сидней, Австралия, 2018), на международной конференции по технологии и приборостроению в физике частиц (г. Амстердам, Голландия, 2014), на международной конференции по системам, работающим в режиме реального времени (г. Нара, Япония, 2014).

Основные результаты диссертации представлены в 7 статьях [30 - 36] и 12 докладах на конференциях [37 - 48].

На защиту выносятся **следующие положения:**

- Система регистрации диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ, построенная на основе восьмиканальных измерительных модулей АЦП прямого преобразования с амплитудным динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации до 500 МГц. Система позволяет фиксировать форму импульса рассеянного излучения длительностью 20-50 нс на фоне излучения плазмы в 2-3 раза, превышающего по амплитуде полезный сигнал;
- Регистратор формы импульса ADC12500 с программной конфигурацией алгоритма обработки данных, позволяющей его широкое применение в диагностических комплексах физических установок;
- Система регистрации модернизированной диагностики томсоновского рассеяния ГДЛ, состоящая из шести восьмиканальных измерительных модулей АЦП с амплитудным динамическим диапазоном 10 бит и частотой дискретизации до 5 ГГц. Измерительные модули АЦП построены на базе матриц емкостных накопителей, реализующих принцип масштабно-временного преобразования. Система позволяет фиксировать форму импульса длительностью около 10 нс при частоте следования измерений до 10 Гц.

## Глава 1. Методы построения аппаратуры регистрации в диагностике томсоновского рассеяния

Диагностика ТР дает возможность бесконтактно измерять локальные значения температуры и плотности плазмы. Поэтому она нашла применение практически на всех термоядерных установках. Рассмотрим ее физические основы, которые необходимо учитывать при построении измерительного комплекса.

### 1.1. Физические основы томсоновского рассеяния

Напомним основные факты, относящиеся к рассеянию электромагнитной волны на свободных или слабо связанных электронах [1 - 3]. Плоскополяризованная волна, с частотой  $\omega$ , падая на свободный электрон, вызывает вынужденные колебания электрона с той же частотой  $\omega$  (Рисунок 1.1) [1]. Эти колебания являются источником вторичного рассеянного излучения ( $k_0$  и  $k_s$  — векторы падающей и рассеянной волны соответственно). Основная доля интенсивности рассеянного излучения сосредоточена вблизи от плоскости, перпендикулярной к направлению, в котором происходят колебания заряда, т.е. к направлению электрического вектора первичной волны  $E$ . Вдоль оси интенсивность рассеянного излучения равна нулю.

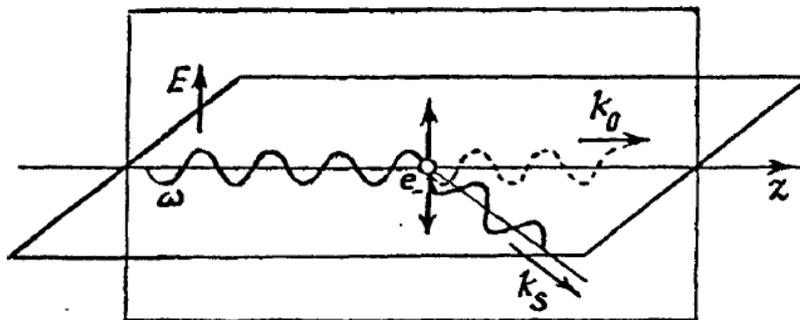


Рисунок 1.1 Рассеяние на свободном электроне.

Абсолютная интенсивность рассеянного излучения определяется величиной полного эффективного сечения рассеяния  $\sigma$ , которое равно

отношению энергии  $P$ , рассеиваемой электроном в единицу времени во всех направлениях, к плотности потока падающей энергии  $P_0/S$ . Дифференциальное эффективное сечение, характеризующее рассеяние в единицу телесного угла  $d\Omega$  одним электроном в направлении, составляющем угол  $\theta$  с направлением вектора  $E$  в падающей электромагнитной волне, определяется как:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \sin^2 \theta, \quad (1.1)$$

где  $r_0^2 = 7.95 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$  — квадрат классического радиуса электрона. Если считать, что суммарная интенсивность рассеянного света просто пропорциональна числу рассеивающих центров, то внутри телесного угла  $d\Omega$ , под углом  $\theta$  к направлению вектора  $E$  будет рассеяна мощность:

$$dP \cong n_e l S \frac{P_0}{S} d\sigma = r_0^2 n_e l P_0 \sin^2 \theta d\Omega, \quad (1.2)$$

где  $n_e$  — концентрация электронов;  $l$  — длина рассеивающей области вдоль зондирующего пучка. Величину телесного угла, в пределах которой удастся перехватить поток рассеянного излучения, трудно сделать больше  $10^3$  радиан. В этом случае при угле рассеяния  $\theta = 90^\circ$  и длине  $l = 1$  см даже для сравнительно плотной плазмы, например, с  $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , отношение мощности рассеянного излучения к мощности зондирующего луча:

$$\frac{P}{P_0} \approx 10^{-15}. \quad (1.3)$$

Зная мощность, легко оценить число фотонов, которое попадает в указанный телесный угол:

$$n_{\text{фотонов}} = \frac{Pt\lambda}{hc}, \quad (1.4)$$

где  $t$  — длительность импульса излучения,  $\lambda$  — длина волны,  $h$  — постоянная планка,  $c$  — скорость света. При мощности источника в сотни ватт, длине волны зондирующего излучения  $\sim 1$  мкм и длительности импульса несколько десятков наносекунд,  $n$  — существенно меньше единицы. Ввиду отсутствия источников зондирующего излучения существенно большей мощности попытки наблюдения ТР на электронах плазмы в течение

длительного времени не предпринимались. Практическая реализация диагностики стала возможной с появлением лазерных источников, которые позволили генерировать импульсы излучения с энергосодержанием в несколько джоулей [11].

Ключевую роль в процессе рассеяния зондирующего излучения в плазме играет параметр Солпитера (Salpeter)  $\alpha$  [1]:

$$\alpha = \frac{l}{2\pi\delta}. \quad (1.5)$$

В нем сравнивается дебаевский радиус  $\delta$  и  $l$  – длина волны, связанная с изменением волнового вектора  $k_0$  при рассеянии (Рисунок 1.2), определяемая как:

$$l = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}, \quad (1.6)$$

где  $\theta$  – угол между направлением зондирования и направлением наблюдения.

При  $\alpha \ll 1$ ,  $l$  много меньше дебаевского радиуса и рассеяние света на электронах связано с флуктуациями электронной плотности, обусловленными тепловым движением электронов. Спектр рассеянного излучения доплеровский и имеет форму гауссовой кривой, полуширина которой зависит от электронной температуры плазмы [49]:

$$\Delta\omega_{1/2} = 4\omega \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_e c^2} \ln 2}. \quad (1.7)$$

Это соотношение в единицах длин волн выглядит так:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 4\lambda \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{\frac{2kT_e}{m_e c^2} \ln 2}, \quad (1.8)$$

где  $T_e$  – электронная температура,  $k$  – постоянная Больцмана,  $m_e$  – масса электрона. Для рубинового лазера, длина волны которого составляет  $\lambda = 694$  нм, при рассеянии под прямым углом:

$$\Delta\lambda_{1/2} \approx 34\sqrt{T_e}, \quad (1.9)$$

где  $\Delta\lambda_{1/2}$  – в нанометрах, а  $T_e$  – в градусах Кельвина. При температуре в 100 эВ, уширение спектра на полувысоте пика составляет 32.4 нм. Оно

оказывается достаточно большим даже при относительно низких температурах плазмы.

При значении параметра Солпитера  $\alpha \geq 1$  рассеяние происходит на крупномасштабных неоднородностях, которые связаны с различного вида колебаниями плазмы (лэнгмюровские, ионно- и магнитозвуковые, альфвеновские и др.). Вклад в рассеянное излучение вносят как высокочастотная (электронная), так и низкочастотная (ионная) составляющие. Для термически равновесной плазмы соотношение между ними сводится к простому выражению [50]:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_i} = \frac{(1+2\alpha^2)}{\alpha^4}. \quad (1.10)$$

При  $\alpha \approx 1.5$  электронное  $\sigma_e$  и ионное  $\sigma_i$  сечения рассеяния сравниваются. Форма спектра изменяется (Рисунок 1.2). При  $\alpha \approx 1$  в центре появляется провал, с увеличением значения  $\alpha$  до  $\sim 4$ , в спектре формируются два симметричных, относительно частоты зондирования  $\omega_i$  спутника с частотами  $\omega_i \pm \omega_p$ , где  $\omega_p$  – электронная плазменная частота:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi c^2 n_e}{m_e}} \approx 5.64 \times 10^4 \sqrt{n_e}. \quad (1.11)$$

Последнее соотношение позволяет, зная положение спутников, определить электронную плотность плазмы.

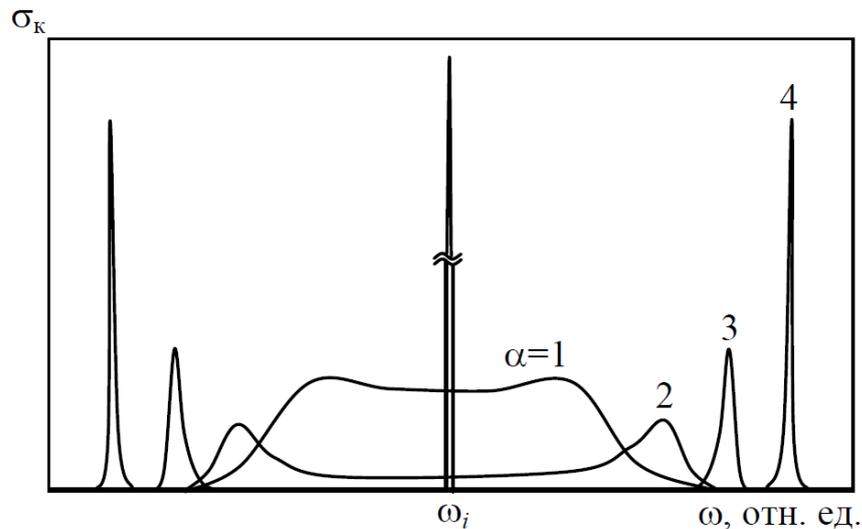


Рисунок 1.2 Спектры рассеянного излучения при  $\alpha \geq 1$ .

При большом значении параметра Солпитера  $\alpha \gg 1$ , величина  $\delta$  меньше  $l$  и рассеяние происходит на электронном облаке дебаевской сферы иона. Флуктуации электронной плотности, обусловленные движением электронов, вносят ничтожный вклад в рассеиваемую мощность, так как эффективный заряд наблюдаемой области из-за дебаевского экранирования близок к нулю. Флуктуации, связанные с движением ионов, становятся доминирующими. Полуширина спектрального контура рассеянного излучения зависит теперь от тепловой скорости ионов, так как доплеровское уширение спектра излучения происходит на электронном облаке дебаевской сферы:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 4\lambda \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{\frac{2kT_i}{mc^2} \ln 2}. \quad (1.12)$$

При проведении экспериментов по рассеянию можно выделить три их варианта: рассеяние на малые углы (рассеяние вперед), рассеяние на  $90^\circ$  и почти на  $180^\circ$  (рассеяние назад) [3]. При рассеянии на малые углы наблюдается область плазмы с  $\alpha$  изменяющейся от единицы до бесконечности. В этой области на форму спектра влияют корреляционные эффекты в плазме. При  $\alpha \gg 1$  по уширению ионного пика можно определить ионную температуру плазмы, а при  $\alpha \geq 1$  концентрацию электронов. К сожалению, эксперименты с рассеянием вперед очень сложны.

При рассеянии под углом  $90^\circ$  область спектра перекрывает значения от  $0 < \alpha \leq 1$ . Этот режим работы является наиболее предпочтительным, так как позволяет относительно простыми методами измерять локальные параметры плазмы, - ее температуру и плотность.

Эксперименты по рассеянию назад аналогичны экспериментам, проводимым по рассеянию вперед. Преимуществом этого вида рассеяния является то, что при его использовании вероятность попадания света в систему сбора света, отраженного элементами конструкции установки от первичного лазерного луча, минимальна.

Подводя итог, можно сделать вывод, что при ТР информативными являются как интенсивность сигнала рассеяния, так и ширина его

спектрального контура. Они содержат исчерпывающую информацию о текущих локальных значениях концентрации и температуры плазмы.

## 1.2. Основные элементы диагностики томсоновского рассеяния

В общем случае, диагностический комплекс ТР состоит из лазера, оптической системы сбора света, спектрометра, детекторов излучения, системы регистрации и обработки сигналов (Рисунок 1.3).

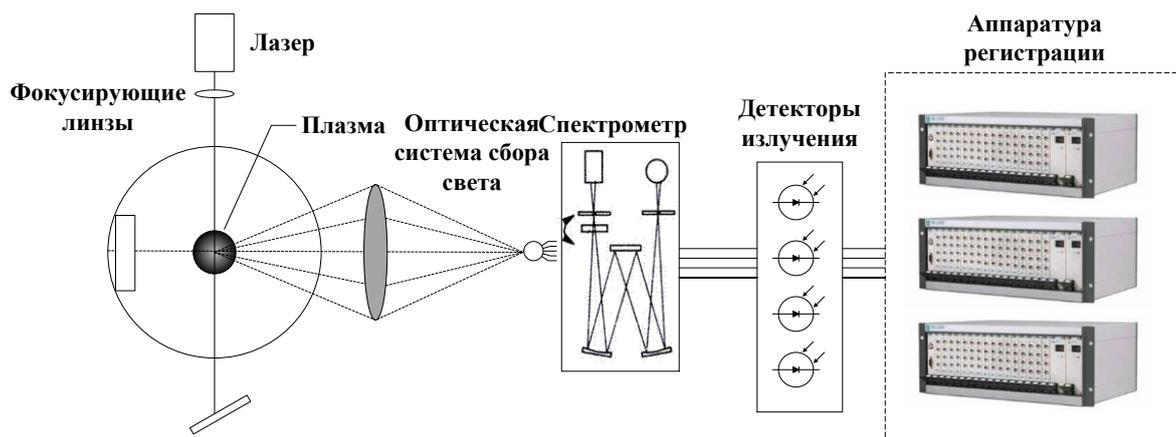


Рисунок 1.3. Схема диагностики ТР.

На начальном этапе развития диагностики ТР в качестве источника излучения использовались рубиновые лазеры [11] с длиной волны  $\lambda = 694.3$  нм, работающие в импульсном режиме. Они позволяли генерировать импульсы, мощность которых составляла  $\sim 1-10$  МВт при длительности 10-20 нсек. Исключением из правил является рубиновый лазер диагностики ТР установки JET. Он генерирует серию коротких импульсов длительностью  $\sim 300$  пс с энергией 1 Дж следующих с частотой повторения 4 Гц [4].

Существенной проблемой измерений с рубиновым лазером является интенсивное собственное излучение основной компоненты водородной и дейтериевой плазмы в области 656 нм. Дополнительный фон создаётся яркими линиями примеси углерода C-I в области 670-680 нм, присутствующей в относительно холодной периферии плазмы всех установок. Фон ограничивает возможности регистрации рассеянного излучения. Поэтому, по мере развития неодимовых лазеров [11], работающими в области длин волн  $\lambda \sim 1$  мкм, а также

эффективных детекторов излучения в этом спектральном диапазоне, стало происходить их постепенное внедрение в диагностики ТР и, соответственно, замещение рубиновых лазеров. Ближняя ИК область, в которой работают неодимовые лазеры, является более предпочтительной, так как в ней излучение плазмы и примесей относительно мало. Неодимовые лазеры, используемые в диагностике ТР, как правило, генерируют импульсы излучения длительностью 5-20 нсек с мощностью до сотен МВт. Лазеры этого типа широко используются на большинстве действующих плазменных установок: ДПП-D, W7-X, JT-60U, Глобус-М, Magnum-PSI и MST [5 - 8, 51 - 53].

Изображение интересующей области плазмы осуществляется с помощью оптической системы сбора света, состоящей из линз или зеркал, установленных на пути рассеянного излучения. Для обеспечения наибольшей светосилы и минимизации потерь излучения, система должна обладать одновременно большой апертурой и малыми aberrациями.

Эксперименты на плазменных установках сопровождаются высоким уровнем паразитного рентгеновского излучения и электромагнитных помех, что делает невозможным размещение регистрирующей аппаратуры в области их проведения. Поэтому для транспортировки излучения используются кварцевые световоды, по которым оно передается за пределы биологической защиты в помещение, в котором расположены спектральные приборы и средства регистрации.

В качестве спектрального прибора в диагностике ТР чаще всего используется спектрометр с дифракционной решёткой (схема Черни-Тёрнера, Литтроу) [14, 15]. На рисунке 1.4 представлена схема монохроматора Черни-Тёрнера. Свет, проходящий через входную щель попадает на зеркало, где он коллимируется и направляется на дифракционную решетку. Далее он попадает на второе вогнутое зеркало, которое фокусирует его на выходную щель. Поворачивая дифракционную решетку можно изменять диапазон длин волн, проходящих через выходную щель. Спектрометр размещается в

светопоглощающем корпусе, содержащем дополнительные диафрагмы и различные экраны для того, чтобы свести к минимуму паразитную фоновую составляющую света.

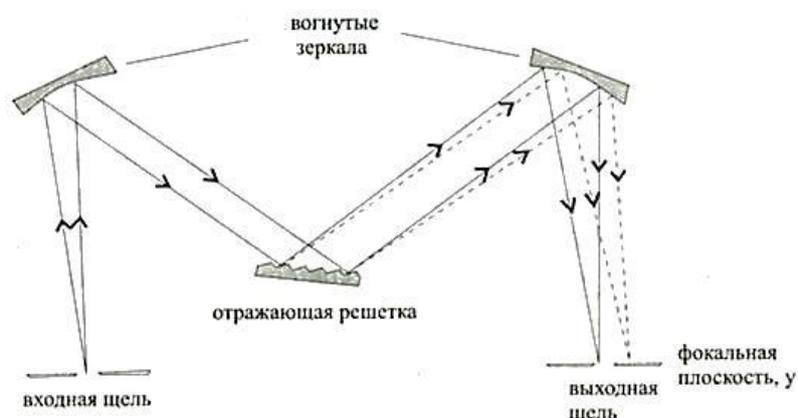


Рисунок 1.4. Схема Черни-Тернера.

В качестве примера, можно привести спектрометр, используемый в диагностическом комплексе ТР на установке W7-X, построенный по схеме Черни-Тёрнера. Он содержит пять спектральных окон, перекрывающих длины волн 750–920 нм, 920–1000 нм, 1000–1035 нм, 1035–1051 нм и 1051–1061 нм, что позволяет измерять температуру плазмы в диапазоне от 10 эВ до 10 кэВ [8].

На некоторых установках спектральные приборы строятся на основе интерференционных фильтров, представляющих собой интерферометры ОФабри – Перро с очень малым зазором между параллельными зеркалами. В частности, они используются в диагностике ТР установки Глобус-М, в котором формируют четыре спектральных окна различной ширины, перекрывающие диапазон длин волн от 850-1050 нм, ориентированные на измерение температуры плазмы в диапазоне от 10 эВ до 2 кэВ [7].

Важным элементом диагностики ТР являются детекторы излучения [54].

Ключевым параметром детектора излучения является его квантовая эффективность в рабочем спектральном диапазоне. Она определяется как отношение числа рождающихся электронов к числу фотонов, падающих на детектор:

$$\eta = \frac{N_a}{N_\phi}. \quad (1.13)$$

В документации на фотоприемники вместо квантовой эффективности часто используют другой параметр – токовую чувствительность, связанную с  $\eta$  соотношением:

$$S = \frac{q\lambda}{hc} \eta. \quad (1.14)$$

На начальном этапе развития диагностики ТР в качестве фотодетекторов использовались фотоэлектронные умножители (ФЭУ) [55]. Эти приборы обладают высоким коэффициентом усиления ( $10^5$ - $10^6$ ) и хорошим быстродействием. Однако квантовая эффективность их фотокатода мала. В современных ФЭУ она может достигать 50% в коротковолновой части спектра (от 400 нм до 700 нм), однако в ИК диапазоне, используемом в диагностике ТР на большинстве плазменных установок, она не превышает нескольких процентов. На рисунке 1.5 представлены графики зависимости токовой чувствительности (мА/Вт) и квантовой эффективности от длины волны излучения для различных типов ФЭУ, выпускаемых фирмой Hamamatsu [56], являющейся мировым лидером по производству приборов подобного типа. Сегодня ФЭУ еще используются в диагностиках ТР с источником излучения на основе рубинового лазера. В частности, на установках JET [4] и C-2/C-2U Tri Alpha Energy [57].

В последние десятилетия в системах регистрации сигналов диагностики ТР ФЭУ активно замещаются лавинными фотодиодами (ЛФД) [58]. Это связано с тем, что в ИК диапазоне квантовая эффективность этих приборов намного превышает аналогичный параметр ФЭУ. Кроме того, в отличие от ФЭУ, ЛФД нечувствительны к магнитному полю. Характерное напряжение смещения ЛФД составляет 200-400 В, что также является некоторым упрощением системы по сравнению с ФЭУ, требующим напряжение порядка 1 кВ.

В ЛФД усиление фототока происходит за счет лавинного умножения генерированных источником излучения носителей заряда в электрическом

поле обратно смещенного  $p$ - $n$ -перехода. При величине обратного напряжения  $U$ , близко к напряжению лавинного пробоя  $U_{np}$ , энергия свободных носителей заряда становится соизмерима с порогом ионизации. В результате их взаимодействия с электронами валентной зоны полупроводника образуются новые электрон-дырочные пары. Они ускоряются и порождают ливень из электронов и дырок. За счет этого ток, порожденный источником внешнего излучения в  $p$ - $n$  переходе, умножается в  $M$  раз [59]:

$$I_{\text{сигнала}} = MI_0. \quad (1.15)$$

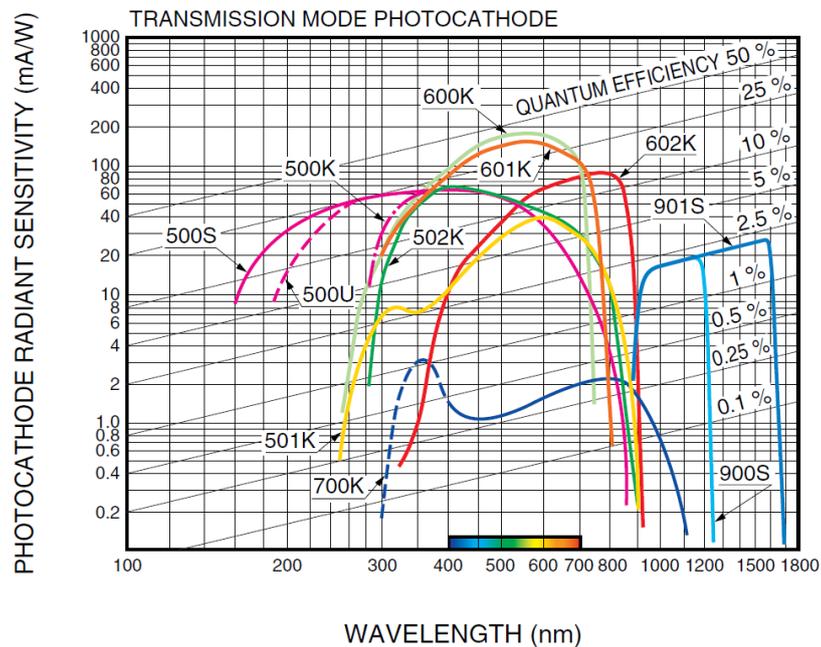


Рисунок 1.5. График зависимости светочувствительности от длины волны ФЭУ фирмы Hamamatsu.

Величину этого тока с учетом коэффициента пропускания оптических элементов тракта  $\gamma \sim 0.1$ , коэффициента лавинного умножения  $M \sim 50$ , квантовой эффективности  $60\%$  и при условии, что на один спектральный канал приходится  $\sim 25\%$  всех фотонов, можно оценить, как:

$$I_{\text{сигнала}} = \frac{0.25\gamma M \eta q n_{\text{фотонов}}}{t} = \frac{0.25\gamma M \eta q E \lambda}{thc} \approx 0.125 \cdot 10^{-7} M \approx 625 \text{ нА}, \quad (1.16)$$

где  $E \approx E_0 \cdot 10^{-15}$ ,  $E_0$  - энергия импульса зондирующего излучения  $10$  Дж при его длительности  $t \sim 10$  нс. Величина тока достаточно мала, поэтому

для уверенной регистрации сигнала в состав фотодетектора необходимо ввести дополнительные каскады усиления.

С практической точки зрения, важна не столько сама величина сигнального тока, а соотношение сигнал/шум, поскольку именно оно определяет разрешающую способность диагностики. Источниками шума в ЛФД являются поверхностный ток утечки, темновой ток и сигнальный ток. Дробовой шум, обусловленный этими составляющими, определяется как:

$$i_{\text{лфд}} = \sqrt{2q(I_0 + I_T)M^2B(M)\Delta f + 2qI_{\text{пу}}\Delta f}, \quad (1.17)$$

где  $I_T$  – темновой ток,  $I_{\text{пу}}$  – поверхностный ток утечки,  $\Delta f$  – полоса рабочих частот фотоприемника,  $M$  – коэффициент лавинного умножения,  $B(M)$  – коэффициент избыточного шума лавинного умножения. Коэффициент  $B(M)$  учитывает увеличение дробовых шумов ЛФД из-за нерегулярного характера процесса умножения, и определяется вблизи напряжения пробоя как:

$$B(M) = M^x, \quad (1.18)$$

где  $x$  – показатель степени шума, зависящий от материала ЛФД.

На рисунке 1.6 представлены графики, отражающие характер изменения сигнального и шумового тока в зависимости от  $M$  [59]. При идеальном приемнике тока:

$$SNR = \frac{M^2 I_0^2}{2q(I_0 + I_T)M^2 B(M)\Delta f + 2qI_{\text{пу}}\Delta f}. \quad (1.19)$$

Шумовая компонента, вносимая поверхностным током утечки мала в сравнении с компонентами, связанными с сигнальным и темновым током, поэтому ею можно пренебречь. При небольших значениях  $M$  темновой ток, много меньше сигнального. С ростом  $M$  шумовая компонента тока растет быстрее сигнальной, что приводит к падению SNR. Для получения максимальной величины SNR необходимо подбирать оптимальное значение коэффициента лавинного умножения  $M$ . Для большинства ЛФД оно не превышает сотни.

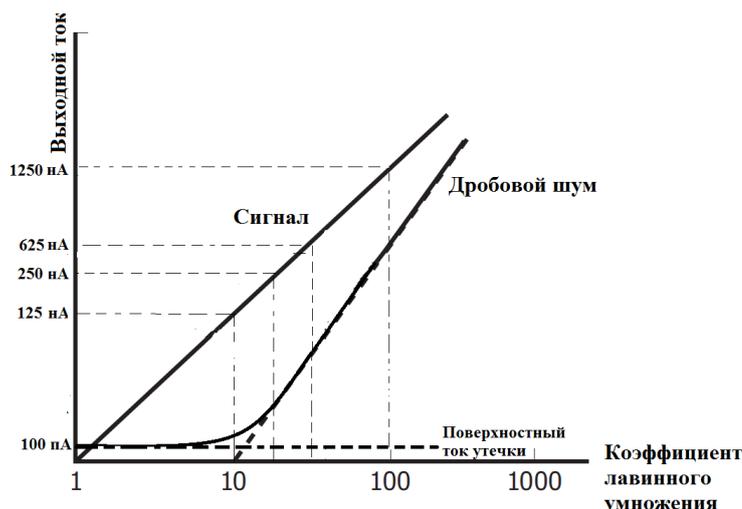


Рисунок 1.6. Графики зависимости сигнала и шумов от коэффициента лавинного умножения.

В качестве примера оценим потенциал ЛФД фирмы Hamamatsu S11519-30 [60]. Примем полосу рабочих частот фотодетектора равной  $0 - 50$  МГц, длину волну  $1054$  нм. В этой области его квантовая эффективность составляет 60%, темновой ток при  $M \sim 50$  составляет  $\sim 9$  нА:

$$i_{\text{лфд}} = \sqrt{2q(I_0 + I_T)M^2\Delta f} = \sqrt{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot (12.5 + 9) \cdot 10^{-9} \cdot 50^2 \cdot 50 \cdot 10^6} = 30 \text{ нА};$$

$$SNR = \frac{I_0^2}{2q(I_0 + I_T)\Delta f} = \frac{156 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 21.5 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 10^6} \approx 400.$$

Традиционно для усиления сигналов, формируемых ЛФД, используются трансимпедансные усилители (Рисунок 1.7). Из-за наличия входной емкости  $C_i + C_d$  амплитудно-частотная характеристика этого усилителя в области высоких частот начинает спадать со скоростью 40 Дб на декаду, что приводит к потере устойчивости. Исключить этот эффект позволяет корректирующая емкость  $C_f$ , включаемая в цепь обратной связи.

Применение любого усилителя не может улучшить величину соотношения сигнал/шум фотодетектора на основе ЛФД, так как шумовой ток ЛФД суммируется с дополнительными компонентами: шумом входного тока усилителя  $i_{\text{усил}}$ , тепловым шумом сопротивления обратной связи  $R_f$  и током шума  $i_c$ , формируемым на эквивалентной входной емкости  $C_{\text{общ}} = C_d + C_i$

шумовым напряжением. Приведенный ко входу усилителя шумовой ток можно представить, как:

$$i_{\text{дет}} = \sqrt{i_{\text{ЛФД}}^2 + i_{\text{усил}}^2 + i_{\text{тепл}}^2 + i_{\text{с}}^2} = \sqrt{2q(I_0 + I_T)M^2\Delta f + i_{\text{усил}}^2 + \frac{4kT\Delta f}{R_f} + (2\pi K_f e_n C_{\text{общ}})^2 \Delta f}, \quad (1.20)$$

где  $T$  – температура в  $K$ ,  $e_n$  – спектральная плотность приведенного ко входу напряжения шума усилителя,  $K_f$  соответствует частоте среза при коэффициенте передачи усилителя с замкнутой петлей обратной связи:

$$K_f = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_f C_f}}, \quad (1.21)$$

где  $GBP$  (*gain–bandwidth product*) – произведение коэффициента усиления на частоту единичного усиления. Это выражение справедливо только для усилителей, имеющих при разомкнутой петле обратной связи, спад амплитудно-частотной характеристики 20 дБ на декаду.

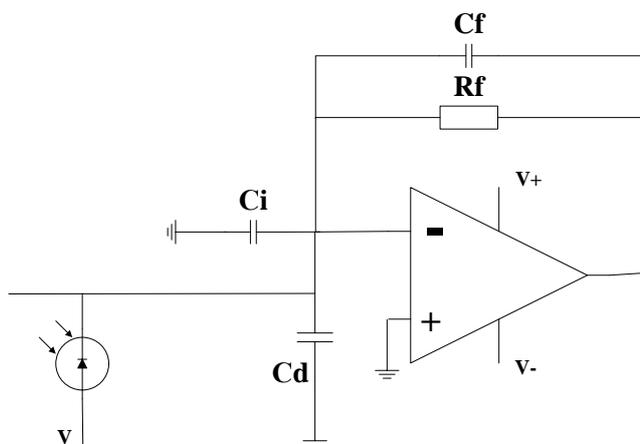


Рисунок 1.7. Упрощенная схема трансимпедансного усилителя  $C_i$  – паразитная емкость, связанная с входами усилителя,  $C_d$  – емкость ЛФД,  $R_f$  – сопротивление обратной связи.

Оценим влияние каждой шумовой компоненты. Исходя из соотношения (1.19) легко заметить, что оптимальным является выбор усилителя с минимальной величиной входного тока  $i_{\text{усил}}$  и малым значением напряжения шумовой компоненты  $e_n$ , приведенной ко входу. Для уменьшения теплового шума требуется увеличивать сопротивление обратной связи  $R_f$ . С другой стороны, полоса пропускания усилителя обратно пропорциональна величине

$R_f$ . При характерной для фотодетекторов диагностики ТР частоте среза  $\sim 50$  МГц, величина  $R_f$  при емкости  $C_f$  на уровне долей-единиц пФ не может превышать единиц кОм.

Величину  $i_c$  можно уменьшить с помощью специальных схемотехнических решений, позволяющих компенсировать паразитную емкость ЛФД. Например, с помощью полевого транзистора (Рисунок 1.8) [61]. Поскольку коэффициент передачи истокового повторителя  $\sim 1$ , емкость ЛФД практически не перезаряжается сигнальным током. Описанное решение эффективно при большой емкости ЛФД (сотни и тысячи пФ). При паразитной емкости ЛФД на уровне единиц и десятков пФ этот способ малоэффективен.

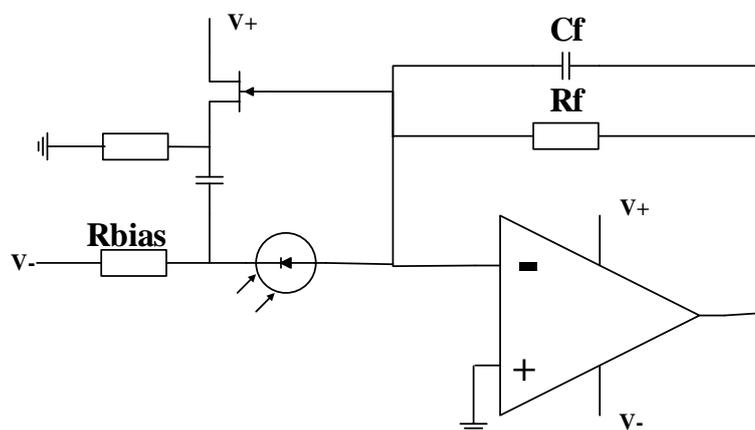


Рисунок 1.8. Компенсация входной емкости с помощью полевого транзистора.

Рассмотрим фотодетектор, построенный на основе ЛФД S11519-30 и трансимпедансного усилителя LMH6629 фирмы Texas Instruments [62]. Его характеристики:  $C_i = 1.7$  нФ,  $e_n = 0.69$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ,  $GBP = 900$  МГц и  $i_{noise} = 2.6$  нА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Для обеспечения полосы пропускания 50 МГц величину сопротивления обратной связи примем равной  $R_f = 2$  кОм, корректирующей емкости  $C_f = 2$  нФ. Емкость ЛФД составляет  $C_d = 12$  нФ. Шумовая компонента тока, приведенная ко входу усилителя, согласно соотношению 1.19, оценивается на уровне:

$$i_{дет} \approx 50 \text{ нА.}$$

Тогда её отношение к сигнальной компоненте тока  $I_{сигн} \approx 625 \text{ нА}$  будет составлять:

$$A = \frac{I_{сигн}}{i_{дет}} \approx 12.5.$$

Выходной сигнал усилителя при указанных значениях  $R_f$  и  $C_f$  имеет величину  $\sim 2 \text{ мВ}$ . Он очень мал, и для его уверенной регистрации необходим как минимум еще один каскад усиления с коэффициентом передачи 250-1000.

Детекторы на основе ЛФД с описанной архитектурой, несмотря на свойственные им ограничения, используются на большинстве плазменных установок: MAST, MST, COMPASS, Глобус-М, W7-X, HL-2A, DIII-D, SST-1 [19 - 23, 52, 63].

### **1.3. Системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния**

Измерительная аппаратура для диагностики ТР должна фиксировать форму широкополосных сигналов малого уровня или их вольт-секундной площади в большом количестве спектральных окон при наличии паразитной фоновой составляющей. Эта составляющая обусловлена собственным излучением плазмы, а также тепловым излучением элементов конструкций вакуумной камеры, попадающим в апертуру оптической системы. При исследовании параметров плазмы методом ТР на плазменных установках, характеризующихся малой интенсивностью собственного излучения плазмы, например, таких как JET, DIII-D, Глобус-М, ГДЛ, величина фонового сигнала фактически равняется нулю. На установках, в которых плазма содержит примеси, поступающие со стенок камеры, например, на установке ГОЛ-3, а также в диверторных зонах токамаков, фоновый сигнал может быть соизмерим с сигнальной компонентой или в несколько раз превышать ее.

Рассмотрим историю создания измерительной аппаратуры для диагностики ТР. На начальном этапе ее развития, для плазменных установок, работающих в однократном импульсном режиме, использовались регистраторы, построенные по схеме: интегрирование аналогового сигнала – преобразование интеграла в цифровой эквивалент. В связи с тем, что процесс был

однократным, для оцифровки интегральных значений сигналов использовались АЦП с относительно небольшой частотой дискретизации (~несколько МГц), обладающие расширенным амплитудным динамическим диапазоном (14-16 бит). Схема построения регистраторов такого типа показана на рисунке 1.9 а. Приборы с подобной архитектурой, так называемые преобразователи «заряд – цифра», широко использовались в физике высоких энергии и были апробированы на большом количестве разных детекторов.

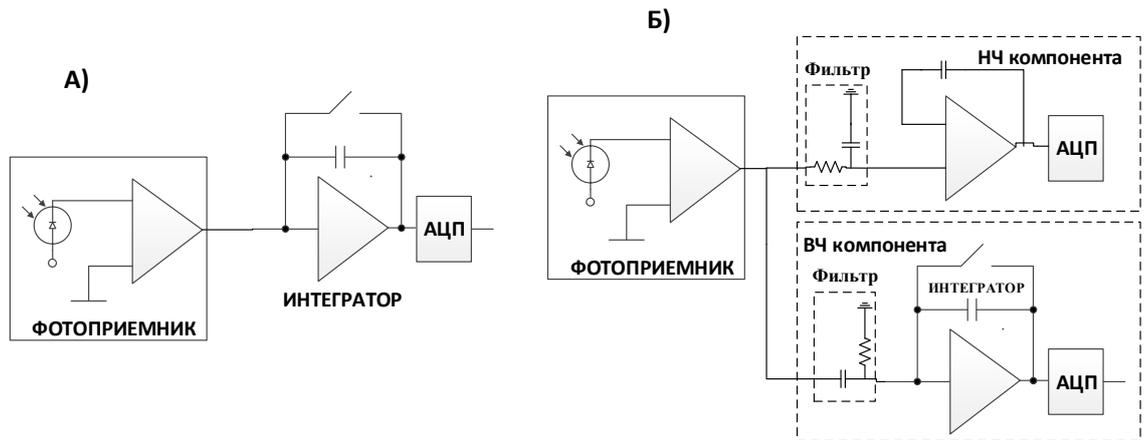


Рисунок 1.9. а) Интегрирующий метод регистрации б) разделение сигнала с детектора на ВЧ и НЧ компоненту.

Для плазменных установок, в которых интенсивность фонового излучения соизмерима или превышает полезный сигнал, описанный способ фиксации и преобразования в цифровой эквивалент сигналов ТР не подходит. Это обусловлено тем, что результат в приборах такого типа будет формироваться в виде суммы двух интегралов: фона и исследуемого сигнала. Причем величина фона – неизвестна. Для исправления ситуации, при существенном различии спектров полезного и фонового сигнала, можно использовать метод, основанный на их частотном разделении с помощью линейно-фазовых фильтров (Рисунок 1.9 б). В его рамках, без увеличения требований по амплитудному динамическому диапазону к трактам преобразования, сигнальная (ВЧ) и фоновая (НЧ) компоненты эффективно разделяются. В случае если спектры указанных компонент накладываются друг на друга описанный метод не дает правильного результата. Для проведения корректных измерений в такой ситуации используется метод двойной коррелированной

выборки. В его рамках производится интегрирование сигнала ТР на двух следующих друг за другом временных интервалах. На первом интегрируется сумма сигнала и фона, на втором только фоновая компонента. При равенстве временных интервалов, вклад в результат от фоновой компоненты, и в первом и во втором случае, будет одинаков. Поэтому при вычитании второго интеграла из первого фиксируется интеграл от искомого сигнала ТР. Как и в предыдущих случаях, метод двойной коррелированной выборки не предъявляет повышенных требований к быстродействию АЦП. А процедура вычитания «оцифрованных» интегралов не вызывает каких-либо затруднений. Недостатком метода двойной коррелированной выборки являются повышенные требования к динамическому диапазону АЦП по амплитуде.

Не трудно заметить, что для корректной работы рассматриваемого метода необходимо, чтобы длительность интервалов интегрирования была одинакова. В случае невыполнения этого требования, даже при постоянстве паразитной фоновой компоненты, возникает дополнительная ошибка, величину которой можно оценить, как:

$$Err = \left(1 - \frac{T_{\text{фона+сигнал}} A_{\text{фона+сигнал}} - T_{\text{фона}} A_{\text{фона}}}{(A_{\text{фона+сигнал}} - A_{\text{фона}}) T_{\text{регстр}}}\right) \times 100\%. \quad (1.22)$$

При длительности интервалов интегрирования 10 нс, разности в их длительности не более 200 псек, амплитуде сигнальной компоненты ~400 мВ, и в 5 раз большей амплитуде фоновой компоненты, величина результирующей ошибки достигает ~10%, что в большинстве случаев недопустимо.

Рассмотренные методы регистрации построения измерительной аппаратуры базируются на процедурах интегрирования сигналов, которые выполняются с помощью аналоговых компонент. На их работу влияет множество факторов. Например, температура окружающей среды, паразитные емкости ключей, напряжение сдвига нуля и входные токи усилительных трактов и многое другое. Это существенно усложняет процедуру разработки регистрирующей аппаратуры такого типа. Несмотря на все эти сложности, описанные выше методы регистрации построения измерительной аппаратуры

до сих пор используется на плазменных установках. В качестве примера, можно привести установки: EAST (Китай) [64], KSTAR (Корея) [65], DIII-D (США) [5], SST-1 (Индия) [17], HT-7 (Китай) [18].

Следующий этап создания измерительной аппаратуры для диагностики ТР был связан с развитием цифровой осциллографии, основанной на фиксации формы сигналов малой длительности. Преимущества осциллографии очевидны. В ее рамках полезный сигнал, даже при наличии мощной фоновой компоненты, может быть выделен визуально или с помощью процедур математической обработки (это справедливо, если полезный сигнал меньше, чем статистический «шум» фона). Осциллографические средства фиксации формы сигналов ТР первого поколения строились на основе метода масштабного-временного преобразования. В первых приборах такого типа использовались трубки с кремниевой мишенью, запоминающей изображение сигнала в виде потенциального рельефа, формируемого записывающим лучом [66]. Далее это изображение сканировалось, и уже в цифровом виде, определялись X и Y координаты засвеченных точек. Существенным недостатком этих приборов был маленький размер мишени осциллографической трубки, накладывающий соответствующие ограничения на амплитудный динамический диапазон и временную шкалу измерительных трактов. Кроме этого, высокая стоимость регистраторов на основе осциллографических трубок ограничивало их применение в плазменном эксперименте. В качестве примера таких регистраторов можно привести зарубежный цифровой осциллограф 7612D фирмы Tektronix [67] и отечественный осциллограф «Магнолия», разработанный в ИЯФ СО РАН [68].

Альтернативным средством фиксации формы моноимпульсных сигналов были приборы, строящиеся на основе аналоговых запоминающих устройств (АЗУ), подключаемых к отводам аналоговой линии задержки. Изначально, АЗУ строились на дискретной элементной базе, как это имело место, например, в регистраторах разработки ИЯФ СО РАН АФИ-16, АФИ-39

[69, 70]. Разрабатывались приборы такого типа и за рубежом, их описание можно найти в [71, 72].

Еще одно направление развития регистрирующей аппаратуры было связано с использованием ПЗС структур (приборы с зарядовой связью) [73], представляющих собой аналоговые регистры сдвига, содержащие в себе до 500 и более запоминающих ячеек. В качестве примера прибора, построенного на основе ПЗС можно привести регистратор формы однократных импульсных сигналов АФИ-1700 [74]. Частота дискретизации приборов на основе ПЗС не превышала 1 ГГц, а их амплитудное разрешение восьми двоичных разрядов. Поэтому они редко использовались при построении систем регистрации данных для диагностики ТР.

Благодаря бурному развитию микроэлектроники в начале 2000-ных, появилась возможность использовать для фиксации формы сигналов диагностики ТР метод прямого преобразования, основанный на «оцифровке» текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП. Появление АЦП с частотой дискретизации выше 100 МГц и амплитудным динамическим диапазоном 8 бит и более, позволило фиксировать сигналы относительно малой длительности даже при наличии фоновой компоненты, обусловленной излучением плазмы. Применение регистраторов на основе быстродействующих АЦП – наиболее простой и широко используемый метод фиксации данных в диагностике ТР, который даёт максимально возможный объём информации об параметрах плазмы. Структурная схема такого регистратора представлена на рисунке 1.10. В его состав входят:

- Входной аналоговый тракт, позволяющий согласовать диапазон изменения сигнала и амплитудную шкалу регистратора;
- Быстродействующий АЦП, обеспечивающий преобразование текущих значений амплитуды сигнала в цифровой эквивалент;
- Оперативное запоминающее устройство, обеспечивающее запись и хранение формируемых АЦП отсчётов, что позволяет устранить разрыв

между темпом набора данных и скоростью их передачи вычислительной технике.

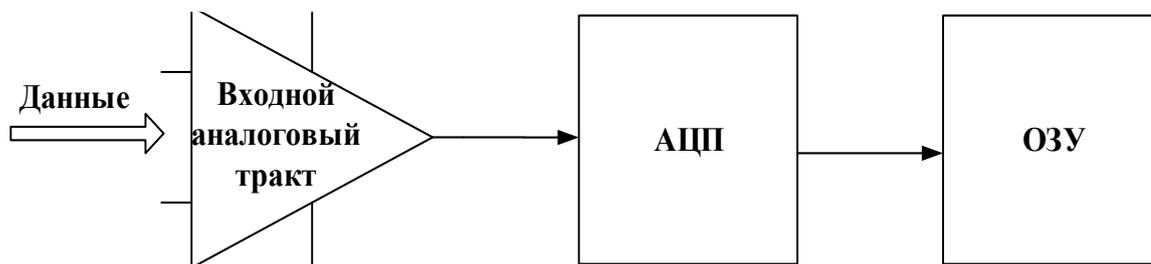


Рисунок 1.10. Структурная схема построения регистратора на основе быстродействующих АЦП.

С практической точки зрения, существенным недостатком приборов такого типа является их относительно высокая стоимость (Таблица 1.1). Соответственно, низкое соотношение «производительность/стоимость» такой системы регистрации, при количестве каналов в нескольких сотен, может оказаться определяющим фактором для выбора в пользу альтернативного подхода. Тем не менее системы регистрации и сбора данных диагностики ТР на основе быстродействующих АЦП с успехом используются как на российских, так и на зарубежных плазменных установках: MAST (1 ГГц, 8 бит) [75], С-2/С-2U (АЦП 2.5 ГГц, 8 бит) [23], стелларатор W-7X (1 ГГц,

Таблица 1.1. Характеристики высокоскоростных регистраторов

Название фирмы-производителя	Название прибора	Частота дискретизации	К-во бит	К-во каналов	Интерфейс передачи	Внешняя память	Цена
Keysight Technologies (Acqiris)	U5303A	4 ГГц	12	2	PCIe	4 ГГб	\$16,995
Teledyne SP Devices	ADQ7DC	5 ГГц	14	2	PCIe, PXIe, MTCA.4, 10 GbE	4 ГГб	\$20 000
GaGe	TB3 - EON	3 ГГц	12	2	PCIe	2 ГГб	\$14,950

14 бит) [8], токамаки ASDEX (Acqiris U1063A-002/DC270) [76], MST (Acqiris DC270) [52], COMPASS (1 ГГц, 8 бит) [21], HL-2A (1 ГГц, 12 бит) [22] и Глобус-М (10 бит, 2 ГГц) [19]. Следует ожидать дальнейшего распространения быстродействующих АЦП в системах регистрации диагностик, по мере перехода технологий создания микросхем в массовый сегмент рынка и их удешевления.

Параллельно с развитием быстродействующих АЦП некоторые научные коллективы занимались разработкой средств регистрации формы импульсных сигналов на основе матриц емкостных накопителей, выполненных в рамках одной микросхемы, и работающих по такому же принципу, как и АЗУ. Структурная схема матрицы приведена на рисунке 1.11. Входной сигнал подается на все емкостные накопители  $C_0-C_n$  через ключи  $S_0-S_n$ . Таким образом, заряд, накапливаемый на конденсаторах, будет пропорционален мгновенным уровням напряжения на входной шине. Блок управления последовательно через равные промежутки времени размыкает ключи  $S_0-S_n$ . В результате на конденсаторах  $C_0-C_n$  остается профиль сигнала. Далее, с помощью ключей узла считывания  $K_0-K_n$  каждый конденсатор по очереди подключается к выходному усилителю. Это позволяет получить на выходе тот же профиль сигнала, что и на входе, но в ином масштабе времени.

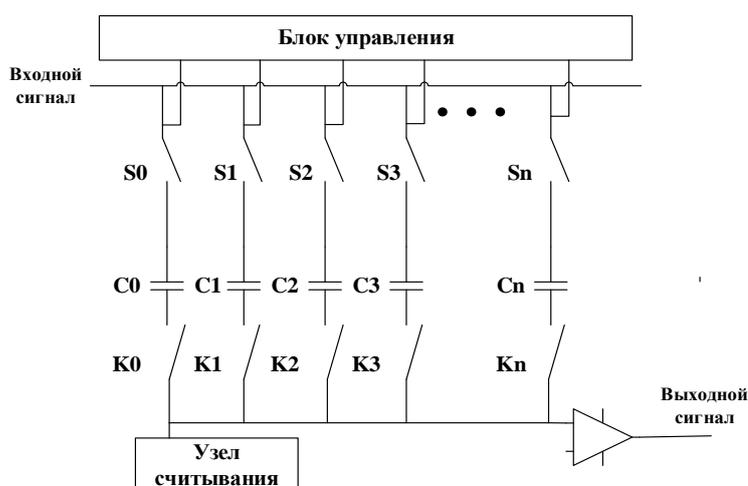


Рисунок 1.11. Структурная схема матрицы емкостных накопителей.

Матрица емкостных накопителей может включать в себя тысячи запоминающих ячеек. Это позволяет строить на её основе многоканальные регистраторы, работающие с высокой эффективной частотой дискретизации (единицы и десятки гигагерц) и амплитудным динамическим диапазоном 8-10 бит.

Из-за особенностей построения матриц емкостных накопителей (подробнее об этом будет описано в Главе 3) входные и выходные каскады каждой элементарной ячейки имеют различные напряжения сдвига нуля и коэффициенты передачи сигналов по амплитуде. Как следствие, при последовательном считывании содержимого этих ячеек, даже при фиксированном уровне входного сигнала, на выходе будет формироваться искаженный сигнал. Устранить эти искажения и получить приемлемое амплитудное разрешение емкостного накопителя, можно за счет использования процедур калибровки, требующих соответствующих вычислительных ресурсов. Прогресс, достигнутый в разработке и производстве такого электронного оборудования как, цифровые сигнальные процессоры (DSP) и быстродействующие программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС или матрицы) позволяет использовать их для решения этой задачи.

Ключевым недостатком матриц емкостных накопителей является достаточно большое мертвое время, обусловленное большой длительностью интервала считывания накопленной информации, в течение которого регистрация сигнала не выполняется. Поэтому фиксирование формы однократных импульсных сигналов с большой частотой следования, с их помощью невозможно. Величина мертвого времени зависит от кол-ва элементарных ячеек, частоты дискретизации и частоты считывания сигнала. В общем случае его можно оценить, как:

$$T_{dead} = N * \left( \frac{1}{F_{read}} - \frac{1}{F_{write}} \right), \quad (1.23)$$

где  $N$  – количество ячеек,  $F_{read}$  – частота считывания,  $F_{write}$  – частота фиксации входного сигнала.

Диагностики ТР на таких плазменных установках, как MST, Глобус-М и другие, работают с высоким разрешением по времени, используя, в качестве источника зондирующего излучения импульсно-пакетные (pulse-burst) лазеры с частотой следования импульсов в «пакете» до 250 кГц [77]. В данном примере, длительность цикла обработки данных не должна превышать 4 мкс, поскольку полная длительность цикла «регистрация – оцифровка – считывание – передача данных» должна быть меньше периода повторения импульсов. Из выражения 1.22 видно, что при фиксированном количестве ячеек в матрице емкостных накопителей, основным ограничивающим фактором является скорость считывания данных. В действительности, информация о полезном сигнале записана только в небольшой области матрицы. Таким образом, при считывании сегмента данных, содержащих представляющий интерес сигнал, величина мертвого времени существенно уменьшается. Это возможно при организации специального режима работы матриц емкостных накопителей, позволяющего обеспечить частичное чтение содержимого ячеек. Аналогичные возможности увеличения эффективной частоты следования кадров, например, задание ROI (Region Of Interest), реализуются в ПЗС устройствах для научных приложений.

В качестве основных исследовательских институтов, занимающихся разработкой матриц емкостных накопителей, можно выделить: Гавайский университет (США, Гавайи), исследовательский институт IRFU (Франция, Сент-Обен), Чикагский университет (США, Чикаго) и исследовательский институт Paul Scherrer Institute (Швейцария, Виллиген). Сегодня регистраторы, построенные на основе созданных ими накопителей, успешно используются в экспериментах в физике высоких энергий [27, 28] и обладают характеристиками, подходящими для фиксации сигналов диагностики ТР [78 - 80].

Подводя итог, можно сделать следующее заключение. Каждый метод регистрации сигналов ТР имеет свои области применимости и обладает рядом достоинств и недостатков. Метод, основанный на интегрировании сигналов ТР, подходит для использования на плазменных установках, на которых фоновый сигнал, обусловленный собственным излучением плазмы, фактически отсутствует в исследуемом спектральном диапазоне. Для установок, в которых сигнал рассеяния сопровождается мощной фоновой компонентой, возможно использование регистраторов, построенных на основе быстродействующих АЦП. В качестве альтернативного решения, более дешевого в плане реализации, могут рассматриваться регистраторы на основе матриц емкостных накопителей.

## Глава 2. Система регистрации диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ

### 2.1. Особенности диагностики томсоновского рассеяния установок ГОЛ – 3 и ГДЛ

Установка ГОЛ-3 (гофрированная ловушка) относится к классу многопробочных открытых ловушек с аксиально-симметричным магнитным полем, используемым для удержания плазмы с субтермоядерными параметрами. Нагрев водородной или дейтериевой плазмы на установке осуществляется сильноточными электронными пучками.

На ГОЛ-3 проводятся эксперименты, направленные на исследования физики удержания плазмы в открытых магнитных системах, физики коллективного взаимодействия электронных пучков с плазмой, взаимодействия мощных плазменных потоков с материалами, а также на отработку плазменных технологий.

Благодаря полученным физическим результатам, установки с гофрированным магнитным полем типа ГОЛ-3 сегодня рассматриваются как одна из ключевых технологий для построения будущего термоядерного реактора на базе линейной ловушки.

На ГОЛ-3 используется многоканальный измерительный комплекс ТР, позволяющий проводить измерения температуры электронной компоненты в диапазоне  $T_e$  от 10 до 1000 эВ при плотностях плазмы  $N_e$  от  $10^{13}$  до  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> [16].

Диагностический комплекс ТР установки ГОЛ-3 имеет ряд особенностей, определяемых спецификой экспериментов по нагреву плазмы в многопробочной ловушке. Эта специфика определяется высокой плотностью пристеночной плазмы, и соответственно большей мощностью её собственного излучения. Интенсивность этого излучения резко возрастает если измерения проводятся на стадии нагрева плазмы мощным релятивистском электронным

пучком. Схема диагностического комплекса ТР установки ГОЛ-3 показана на рисунке 2.1.

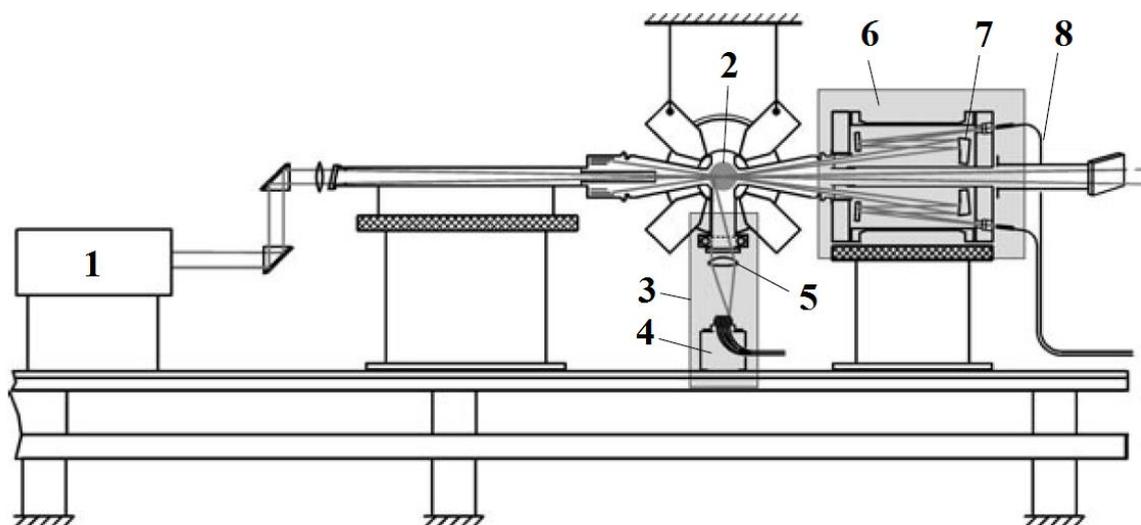


Рисунок 2.1. Схема области рассеяния излучения: 1 – лазер, 2 – плазма, 3 – система регистрации 90° рассеяния, 4 – волоконно-оптический коллектор, 5 – объектив, 6 – система регистрации 80° рассеяния, 7 – фокусирующие зеркала, 8 – световоды к системе регистрации.

В качестве источника излучения используется мощный импульсный лазер, построенный по схеме генератор (Nd:YLF,  $\lambda = 1053$  нм) и усилитель (фосфатное стекло ГЛС-21). Энергия лазерного излучения составляет  $\sim 10$  Дж, а его длительность составляет  $\sim 20$  нс при исходном диаметре пучка 40 мм и диаметре луча в фокусе – 0.1 мм.

После окончания фазы инжекции релятивистского электронного пучка интенсивность фонового излучения плазмы на ГОЛ-3 резко падает. Поэтому на этом этапе эксперимента энергия лазерного импульса может быть снижена до 0.2 Дж, что открывает возможность для измерения характера поведения параметров плазмы во времени. С этой целью необходимо использовать лазер, работающий в частотном режиме. Для диагностики ТР ГОЛ-3 был разработан специальный многоимпульсный лазерный осциллятор, генерирующий пакет из  $\sim 20$  импульсов в течении 300 мкс. Лазерный луч, генерируемый многоимпульсным осциллятором, с помощью призм вводится в

однопроходный усилитель и далее фокусируется в центр плазменного столба. Таким образом, в зависимости от задач эксперимента неодимовый лазер генерирует либо один импульс с энергией  $\sim 10$  Дж, либо серию из  $\sim 15-20$  импульсов с энергией  $0.2-1$  Дж.

Лазерный луч вводится в вакуумную камеру, проходит по транспортному каналу с системой диафрагм, служащих для уменьшения уровня фонового излучения, и фокусируется в центр плазменного столба.

Для регистрации рассеянного излучения используется несколько каналов его вывода. Как отмечалось в Главе 1, §1.1 изменение длины волны рассеянного излучения зависит от скорости рассеивающего электрона и направления рассеяния:

$$\Delta\lambda \sim v_k \sin \frac{\theta}{2}. \quad (2.1)$$

Поэтому наблюдение излучения, рассеянного в различных направлениях, позволяет расширить диапазон измеряемых температур, а также исследовать анизотропию функции распределения электронов. Канал вывода излучения, рассеянного на  $90^\circ$ , предназначен для определения параметров плазмы на стадии удержания. Оптическая система дает возможность регистрировать рассеянный свет из нескольких точек по сечению плазменного шнура, что позволяет проводить измерения пространственных распределений температуры и плотности плазмы. Для определения параметров немаксвелловских электронов плазмы во время инжекции пучка используются каналы вывода излучения на  $8^\circ$ . В этих каналах независимо регистрируется излучение, рассеянное как вдоль, так и поперек магнитного поля, что позволяет определять «продольную» и «поперечную» температуру плазмы.

Характерная для установки ГОЛ-3 осциллограмма импульса рассеянного излучения показана на рисунке 2.2 [16]. На этой осциллограмме можно увидеть, помимо сигнала рассеяния (отмечен цифрой «1»), сигнал динамической калибровки (отмечен цифрой «2»). Он используется для

мониторирования энергии лазерного импульса и относительной чувствительности оптических каналов регистрации. Как видно из рисунка 2.2, сигнал рассеяния и сигнал калибровки накладываются на интенсивную фоновую компоненту, в несколько раз превышающую полезный сигнал. Она обусловлена собственным излучением плазмы.

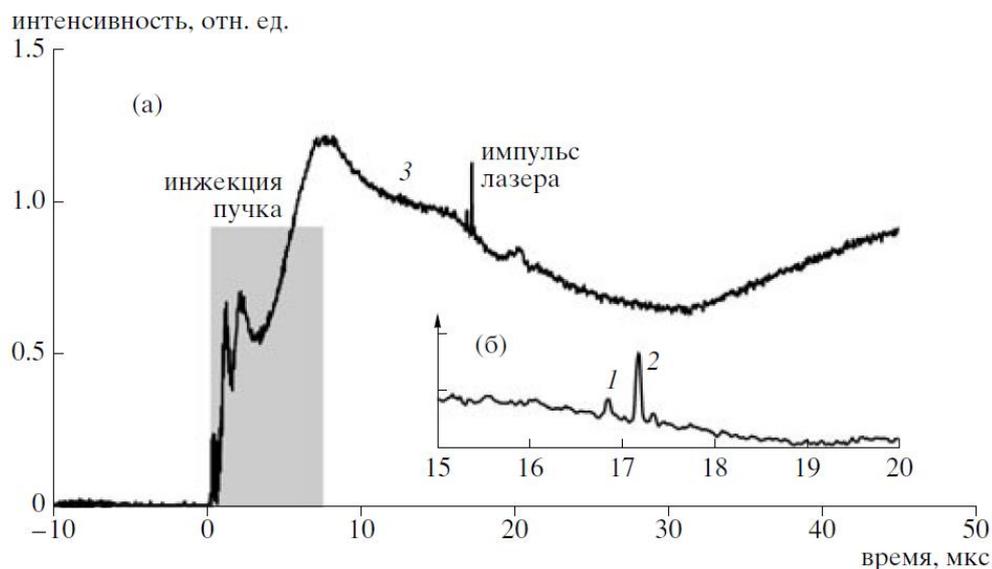


Рисунок 2.2. Типичная осциллограмма сигналов диагностики ТР на установке ГОЛ-3: а) Полная осциллограмма б) участок сигнала в момент срабатывания лазера 1) Сигнал рассеяния 2) Сигнал динамической калибровки 3) Фоновое излучение плазмы.

Для спектрального анализа рассеянного излучения при измерении температуры плазмы, используется спектрометр, созданный на основе монохроматора ЛОМО МДР-2. На рисунке 2.3 представлена его оптическая схема, выполненная по автоколлимационной системе Литтроу [14]. Излучение поступает во входные щели S1, S2 и попадает на параболическое зеркало З1. Отражившись от него, луч проходит через призму Р, а затем отражается от плоского зеркала З2, проходит вновь через призму Р и фокусируется зеркалами З1 и З3 на выходные щели S3, S4. Сканирование спектра в фокальной плоскости прибора обеспечивается поворотом зеркала З3. В результате двукратного прохождения излучения через дифракционную решетку достигается двукратное увеличение линейной дисперсии и разрешающей способности спектрального прибора. Излучение, проходящее

через входную щель S1 раскладывается на шесть спектральных окон, а проходящее через входную щель S2 на четыре окна.

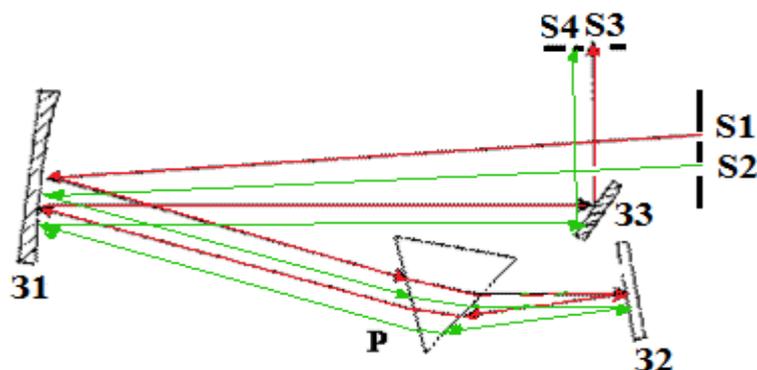


Рисунок 2.3. Оптическая схема модифицированного монохроматора МДР-2.

Как отмечалось ранее, осциллограмма рассеянного сигнала диагностики ТР установки ГОЛ-3 содержит интенсивную фоновую составляющую, обусловленную собственным излучением плазмы. Это исключает использование в этой диагностике метода регистрации данных, основанного на интегрировании сигнала рассеяния (Глава 1, §1.3).

Установка газодинамическая ловушка (ГДЛ), построена в ИЯФ СО РАН в 1986 году. Она также, как и ГОЛ-3, относится к классу открытых ловушек. Установка ГДЛ, представляет собой длинный пробкотрон с большим пробочным отношением. Первые эксперименты на ГДЛ были направлены на проверку основных положений теории газодинамического удержания плазмы. Полученные на сегодняшний день результаты имеют принципиальное значение, как для фундаментальной физики плазмы, так и для решения ряда практических задач. Одна из таких задач – это создания термоядерного нейтронного генератора с большой яркостью. Источник нейтронов D-T реакции востребован специалистами в области ядерного и термоядерного материаловедения. В частности, он необходим для создания материалов, обладающих высокой нейтронной стойкостью. Также нейтронный источник может использоваться как для «дожигания» радиоактивных отходов, так и для получения радиоизотопов [81].

В диагностике ТР установки ГДЛ в качестве источника зондирующего излучения используется неодимовый лазер на фосфатном стекле с длиной волны 1054 нм (Рисунок 2.4). Длительность импульса излучения  $\sim 50$  нс, а его энергия составляет  $\sim 20$  Дж. Лазер состоит из генератора (ОКГ), предварительного усилителя (ПУ), пятипроходного телескопического и однопроходного оконечного усилителей (ТУ и ОУ). Для предотвращения самовозбуждения пятипроходного усилителя, вблизи вогнутого зеркала помещена кювета с жидкостью, просветляющейся под воздействием излучения. После оконечного и предварительного усилителя установлены устройства из плоскопараллельной стеклянной пластинки, нейтральных светофильтров и коаксиальных вакуумных фотоэлементов (ФЭК) для измерения мощности лазерного излучения. Аналогично схеме диагностики ТР на ГОЛ-3, часть излучения лазера, при помощи длинной оптоволоконной линии заводится в спектрометр. В спектрометре это излучение распределяется, обеспечивая равномерную засветку коллектора световодов, транспортирующих оптические сигналы в измерительные модули.

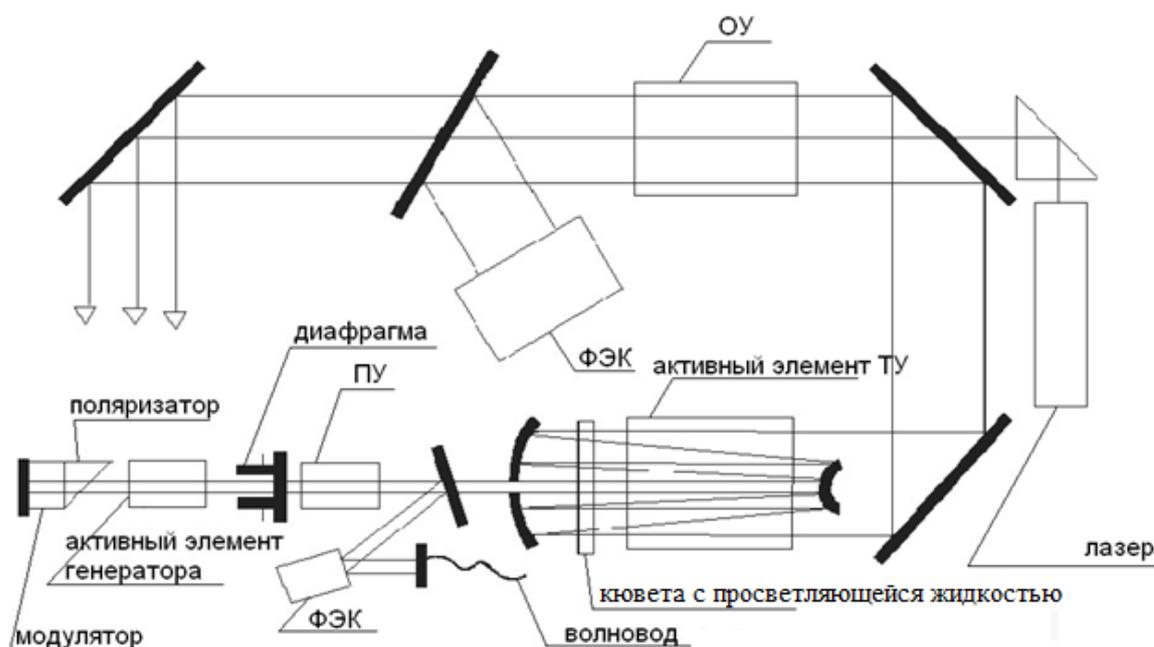


Рисунок 2.4. Диагностика ТР на установке ГДЛ.

Спектрометр (полихроматор) диагностики ТР на ГДЛ построен на базе монохроматора ЛОМО МДР-2. Он раскладывает рассеянное излучение на семь спектральных окон, перекрывающих диапазон длин волн от 850-1050 нм. С его выхода составляющие излучения поступают на коллектор световодов, передающих оптические сигналы в семь измерительных модулей, как показано на рисунке 2.5. Конструктивные особенности лазера и оптической системы более детально описаны в работе [82].

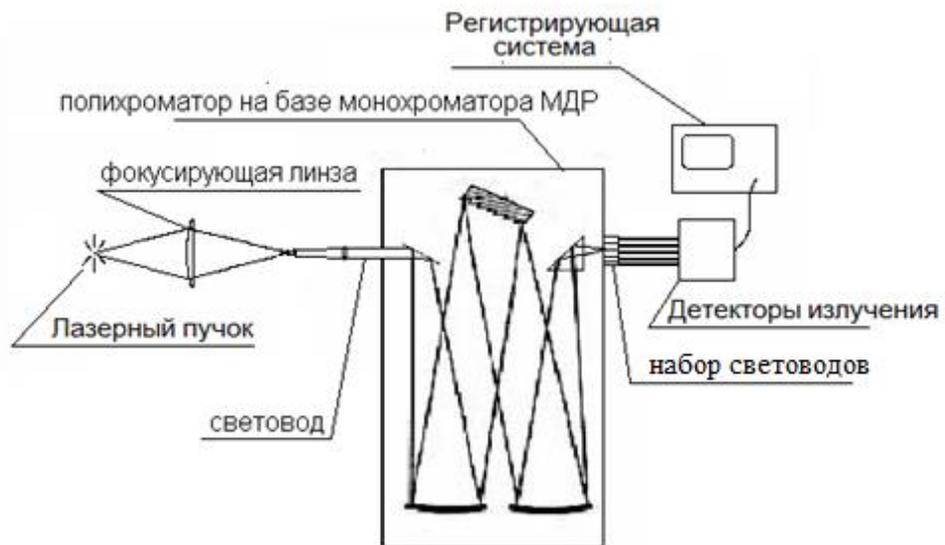


Рисунок 2.5. Оптическая система регистрации диагностики ТР на установке ГДЛ.

Характерные для установки ГДЛ осциллограммы импульсов рассеянного излучения показана на рисунке 2.6. На этих осциллограммах интенсивность фона близка к нулю. При этом спектры флуктуаций фонового излучения ограничены частотой в несколько сотен кГц. Поэтому на ГДЛ для фиксации сигналов рассеяния можно использовать любой метод регистрации из рассмотренных в главе 1. Учитывая целесообразность создания унифицированного измерительного комплекса для диагностик ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ, в качестве базового для его построения был выбран метод прямого преобразования. Он позволяет зарегистрировать сигналы малой длительности и небольшой интенсивности даже при наличии фоновой

компоненты, при использовании АЦП с частотой дискретизации до нескольких сотен МГц и с амплитудно-динамическим диапазоном более  $10^3$  (10-12 бит).

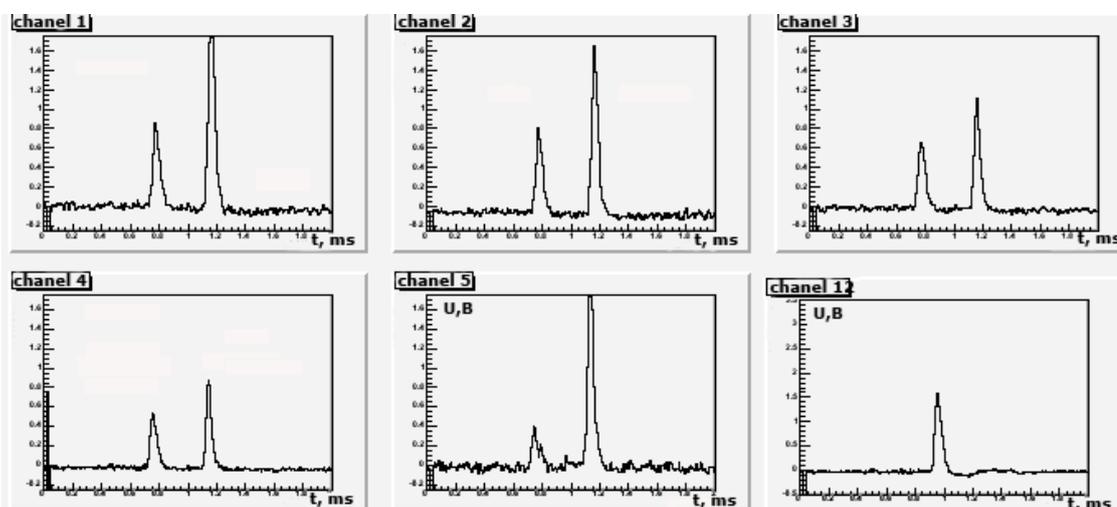


Рисунок 2.6. Типичные сигналы рассеяния на установке ГДЛ.

Измерительный комплекс диагностики ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ, включает в свой состав (Рисунок 2.7):

1. Измерительные подсистемы, содержащие до восьми трактов регистрации данных, строящихся на основе быстродействующих АЦП;
2. Ведущий модуль синхронизации и запуска, обеспечивающий синхронный режим работы всех измерительных подсистем;
3. Коммутатор Ethernet 10/100 верхнего уровня, связывающий элементы измерительных подсистем с сервером диагностики.

Каждая измерительная подсистема может включать в свой состав до восьми трактов регистрации данных. В ее состав входят (Рисунок 2.8):

1. Модули фотоприёмников, обеспечивающих фиксацию оптического сигнала малой интенсивности и его преобразование в электрический сигнал;

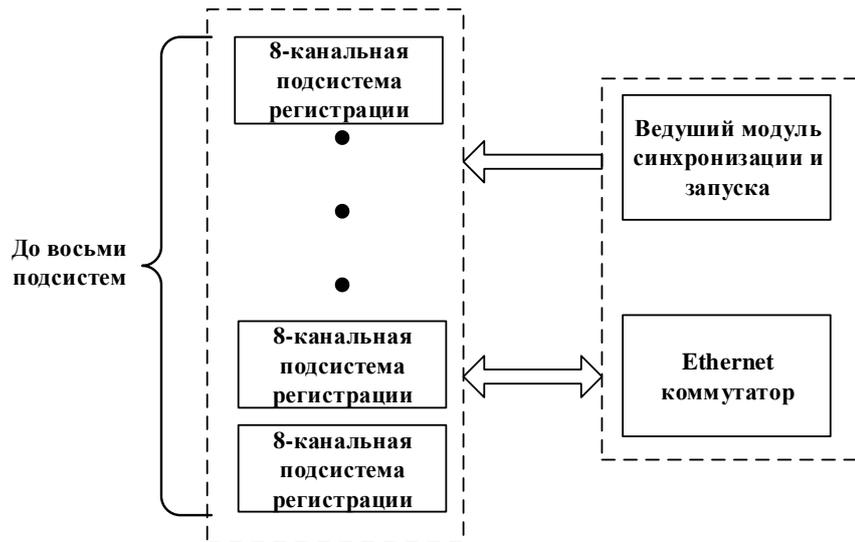


Рисунок 2.7. Архитектура измерительная комплекса для диагностики ТР на установке ГОЛ-3 и ГДЛ.

2. Двухканальные модули регистрации данных на основе быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП), фиксирующие форму сигналов фотоприёмников;
3. Модуль синхронизации и запуска, обеспечивающий синхронный режим модулей регистрации;
4. Адаптер каналов связи Ethernet/UART, сопрягающий фотоприёмники с промежуточным коммутатором Ethernet 10/100;

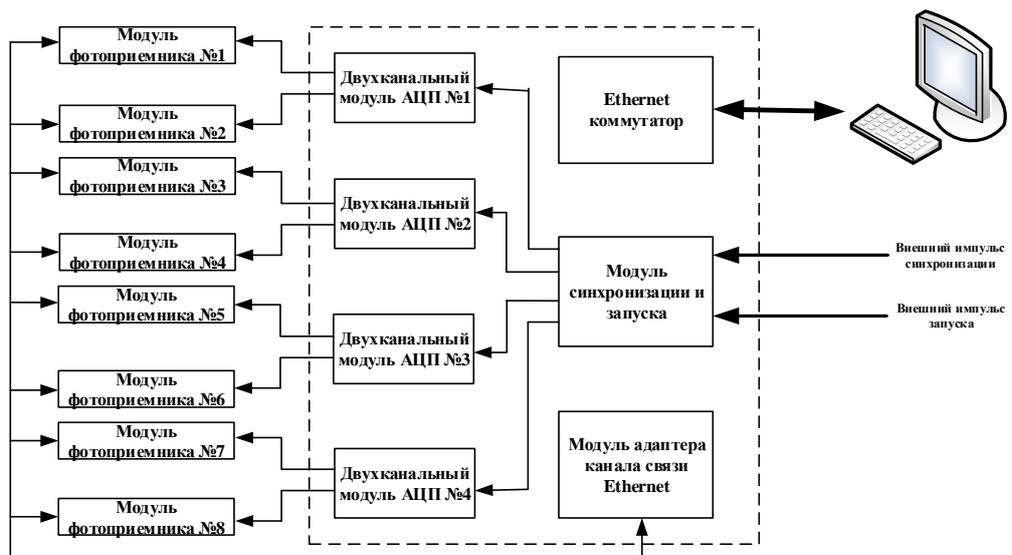


Рисунок 2.8. Восьмиканальная измерительная подсистема для диагностики ТР на установках ГДЛ и ГОЛ-3.

5. Промежуточный восьмиканальный коммутатор Ethernet 10/100, связывающий базовые модули подсистемы с коммутатором более высокого уровня.

Рассмотрим каждый из элементов этой подсистемы более подробно.

## 2.2. Модули фотоприемников на основе лавинных фотодиодов

В измерительном комплексе диагностик ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в качестве детектора излучения используется модуль фотоприемника, функциональная схема которого приведена на рисунке 2.9. Его основой является кремниевый лавинный фотодиод С30659Е-1060-3А фирмы Perkin Elmer со встроенным трансимпедансным усилителем. В данном детекторе верхнее значение частоты среза достигает 50 МГц. Его рабочий спектральный диапазон 500 – 1100 нм, чувствительность 470 кВ/Вт при длине волны 980 нм (Рисунок 2.10). Максимальное среднеквадратичное значение спектральной плотности шума на выходе – 35 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ .

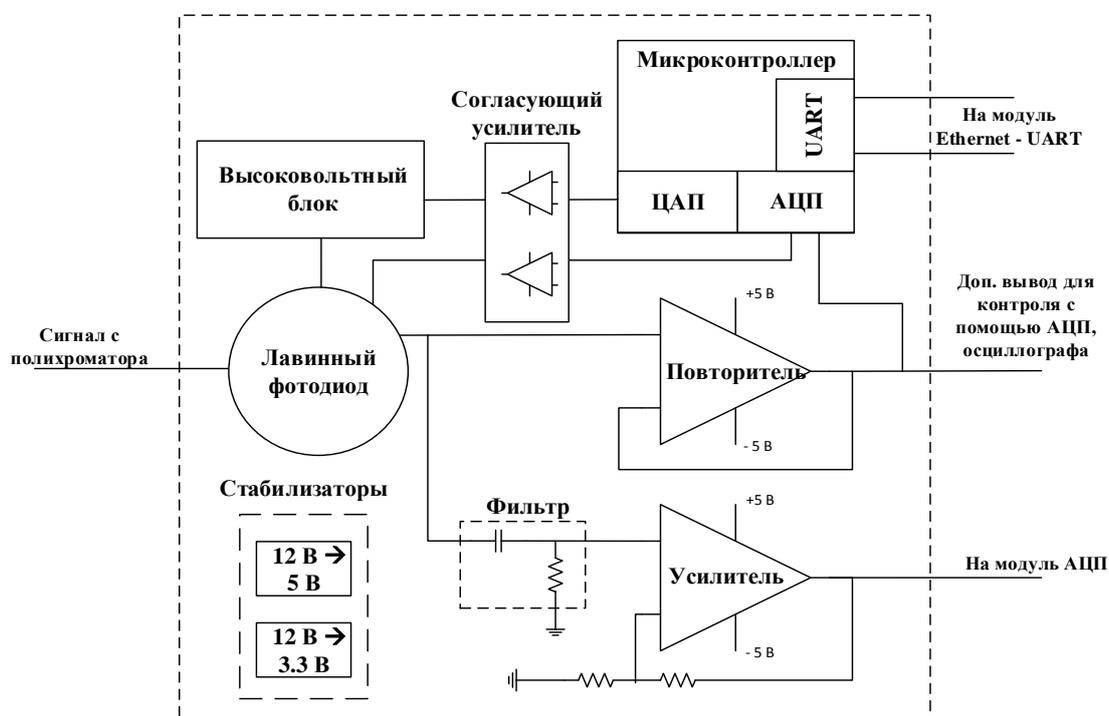


Рисунок 2.9. Функциональная схема фотоприёмника.

Для формирования напряжения смещения лавинного фотодиода используется управляемый электрическим сигналом DC-DC преобразователь

серии С05 фирмы ЕМСО с выходным напряжением до 500 В. Его характеризует низкий уровень шума (<0.004% от выходного сигнала), высокая стабильность выходного напряжения (<0.07% от выходного сигнала) и линейная зависимость выходного напряжения от амплитуды управляющего сигнала.

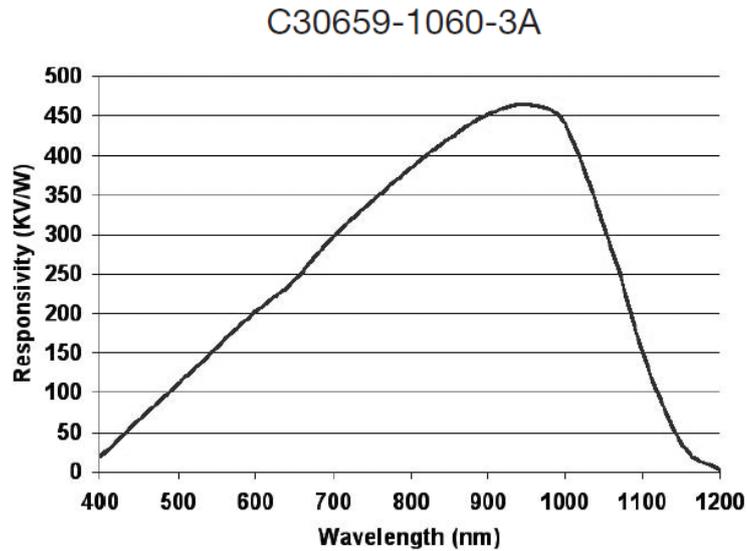


Рисунок 2.10. Спектральная чувствительность лавинного фотодиода С30659Е.

Оценим величину сигнала на выходе детектора для установок ГОЛ-3 и ГДЛ. На ГОЛ-3 лазер формирует импульс длительностью 20 нс с энергией 10 Дж, на установке ГДЛ при 50 нс – 20 Дж. В рабочем спектральном диапазоне 850-1050 нм чувствительность фотоприемника изменяется в диапазоне от 350 кВ/Вт до 470 кВ/Вт, тогда согласно 1.14 и 1.16, амплитуды сигналов составят:

$$U_{\text{гол-3}} = \sigma \cdot \gamma \cdot E_{\text{гол-3}}(\text{ВТ}) \cdot S\left(\frac{\text{В}}{\text{ВТ}}\right) \approx 42 - 57 \text{ мВ};$$

$$U_{\text{гдл}} = \sigma \cdot \gamma \cdot E_{\text{гдл}}(\text{ВТ}) \cdot S\left(\frac{\text{В}}{\text{ВТ}}\right) \approx 35 - 47 \text{ мВ},$$

где  $\sigma$  – доля фотонов попадающих в один спектральный канал,  $\gamma$  – коэффициент пропускания оптических элементов тракта.

Такой величины сигналов недостаточно. Для того чтобы согласовать ее с амплитудной шкалой преобразования АЦП, использующихся для

регистрации этих сигналов, в состав фотоприёмника включен выходной усилитель с коэффициентом передачи  $\sim 20$ , построенный на операционном усилителе AD8099. Этот усилитель выбирался исходя из условия, что величина приведенной к его входу спектральной плотности шума не превышает спектральную плотность шума фотодиода, а частота его единичного усиления обеспечивает необходимую полосу пропускания (0 МГц – 50 МГц). В указанной полосе частот среднеквадратичное значение шума всего фотоприемника не превышает  $\sim 1.34$  мВ, что приемлемо для диагностики ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ.

Фотоприемник включает в себя два сигнальных тракта – высокочастотный (ВЧ) и низкочастотный (НЧ). Сигнал с выхода лавинного фотодиода поступает на ВЧ тракт через дифференцирующую RC цепочку, отсекающую паразитную фоновую компоненту. Это позволяет регистрировать сигналы рассеяния с помощью быстродействующих АЦП относительно небольшой разрядности (10-12 бит). НЧ тракт используется для фиксации фоновой компоненты, обусловленной собственным свечением плазмы, медленными АЦП. Поскольку амплитуда этой компоненты на установке ГОЛ-3 может существенно превышать амплитуду сигнала рассеяния, то коэффициент усиления НЧ тракта был выбран равным единице. Так же этот тракт используется при проведении процедур калибровки оптических элементов диагностики при помощи постоянного входного сигнала.

Помимо усилителей в состав фотодетектора включен управляющий узел на основе микроконтроллера C8051F351 фирмы Silab со встроенными АЦП, ЦАП и последовательным каналом связи UART, обеспечивающим взаимодействие с консолью оператора. Он решает следующие задачи:

- Регулировка коэффициента лавинного усиления за счет изменения управляющего напряжения для DC-DC преобразователя с помощью встроенного ЦАП (Рисунок 2.11). Регулировка коэффициента усиления позволяет адаптировать амплитуды сигналы разных спектральных каналов (Рисунок 2.12 и Рисунок 2.13), которые могут значительно отличаться друг от друга (на порядок и более), к шкале преобразования АЦП;

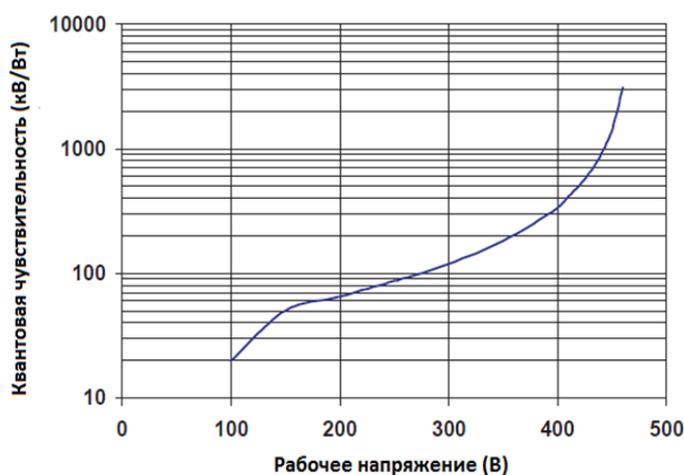


Рисунок 2.11. Светочувствительность фотоприёмника С30659Е-3А.

- Компенсация температурной зависимости коэффициента лавинного усиления. Для решения этой задачи реализуется петля обратной связи, включающая в свой состав: датчик на основе диода (D1), измеряющий текущее значение температуры лавинного фотодиода, АЦП микроконтроллера, обеспечивающее регистрацию текущего значения напряжения смещения, ЦАП, формирующий необходимое управляющее напряжение для DC-DC преобразователя и процессорное ядро, отвечающее за вычислительные операции. Температурный коэффициент имеет величину 2.4 – 3.7 В/С° (индивидуален для каждого фотоприемника), что требует относительно небольшого изменения напряжения смещения для поддержания коэффициента усиления на заданном уровне;

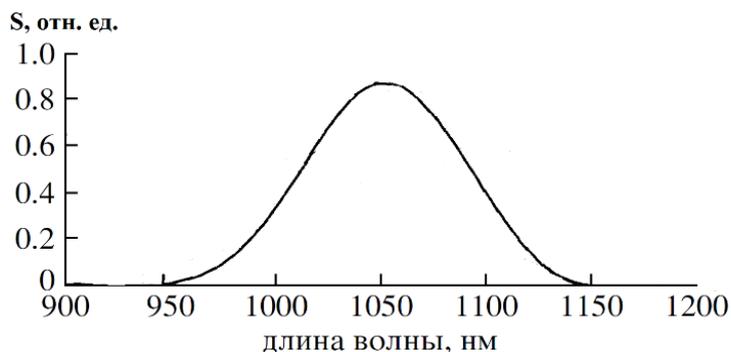


Рисунок 2.12. Результирующая спектральная характеристика системы регистрации установки ГОЛ-3 при температуре  $T_e=1$  кеВ.

- Предотвращение перехода фотодиода в режим лавинного пробоя. С этой целью АЦП микроконтроллера измеряет напряжение на выходе фотодиода. При выходе его за граничное значение, заданное оператором, напряжение смещения с помощью ЦАП, управляющего DC-DC преобразователем снимается. Эта функция носит защитный характер и в нормальном режиме работы не реализуется;
- Сопряжение с консолью оператора с помощью последовательного порта связи UART для приема/передачи данных о состоянии фотоприемников и выбора нужного коэффициента усиления.

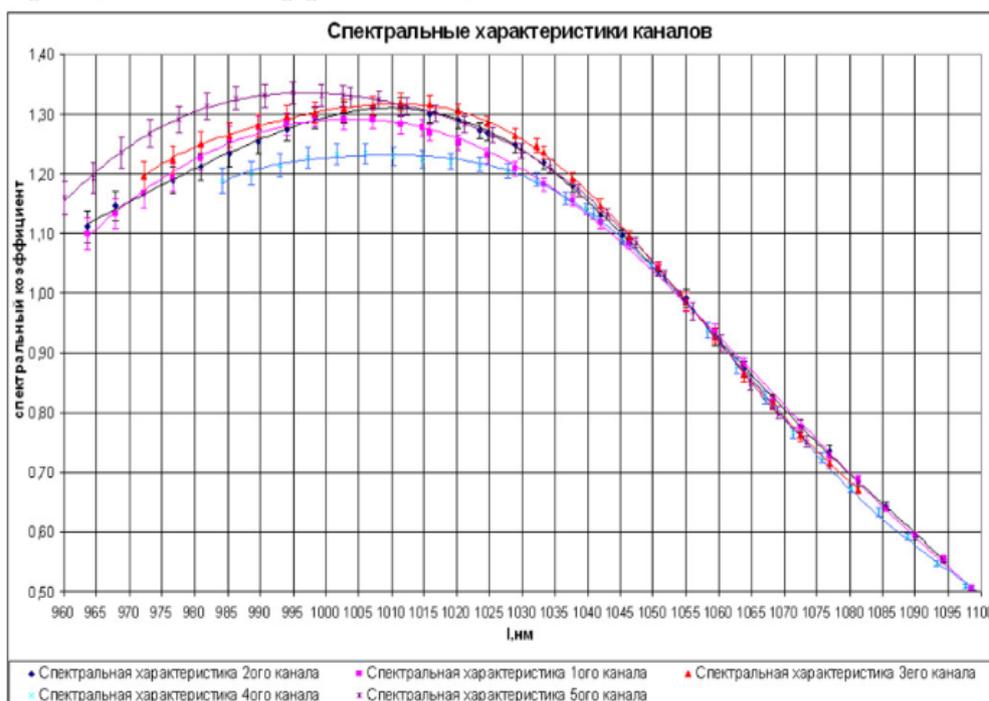


Рисунок 2.13. Функции спектрального отклика для 5 каналов диагностики ТР на установке ГДЛ.

### 2.3. Модуль адаптера каналов связи Ethernet

Адаптер каналов связи выполняет функции коммуникационного узла, сопрягающего модули фотоприемников с каналом связи Ethernet, используемым на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в качестве приборного интерфейса. Поскольку особых требований к быстродействию протоколов обмена между консольным компьютером и фотоприемниками нет, то для сопряжения адаптера с консолью оператора был выбран распространённый интерфейс связи UART. Функциональная схема адаптера приведена на рисунке 2.14. В его состав включены:

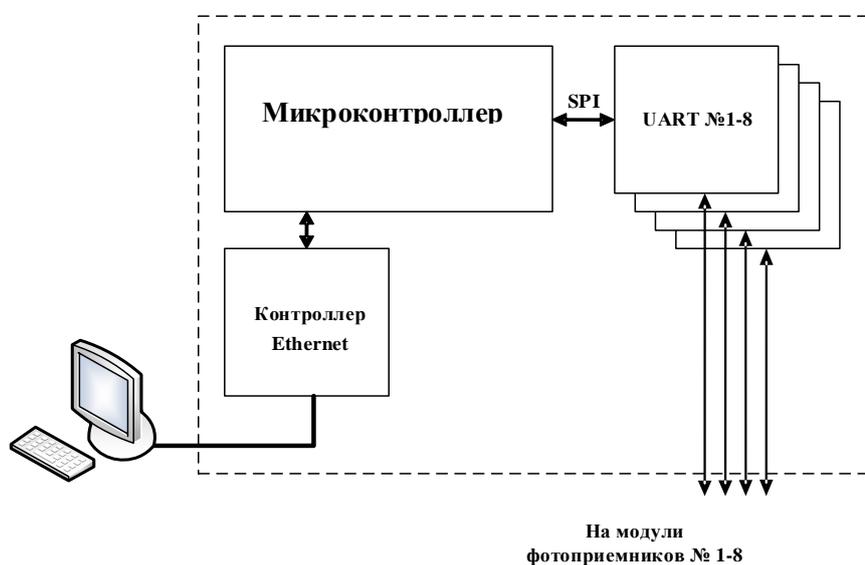


Рисунок 2.14. Функциональная схема модуля адаптера канала связи Ethernet.

- Микроконтроллер C8051F350, обеспечивающий согласование протоколов обмена по каналам связи Ethernet и UART и пересылку между ними команд и данных;
- Контроллер канала связи Ethernet CP2201, работающий в рамках протокола TCP/IP. Он сопрягается с микроконтроллером с помощью параллельного порта ввода/вывода;
- Восемь приёмопередатчиков последовательных линий связи UART, реализованных с помощью кристаллов SC16IS762, обслуживающих модули фотоприемников.

Обмен информацией между сервером диагностики и фотоприёмниками реализуется в режиме запрос-ответ. Ведущим абонентом в этом информационном обмене является консоль оператора. Запрос формируется двумя способами:

- Периодически с частотой 2 Гц. Запрос такого рода предусматривает чтение всех регистров модулей фотоприёмников. В ответ на запрос, на консоль оператора передаются: результаты измерений управляющего напряжения DC-DC преобразователя, температуры фотодиода и величины постоянной составляющей выходного сигнала;
- При изменении оператором опорных параметров, задающих режим работы модуля фотоприёмника, например, величину напряжения смещения фотодиода.

#### **2.4. Регистратор ADC12500**

Для фиксации выходных сигналов фотоприёмников диагностики ТР были специально разработаны двухканальные регистраторы ADC12500 [30]. Они фиксируют текущие значения амплитуды сигналов с частотой дискретизации 500 МГц в 12-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Емкость памяти регистратора составляет  $3 \times 10^6$  отсчетов на канал. Это обеспечивает возможность работы измерительного комплекса диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ как в моноимпульсном, так и многоимпульсном режиме. Цифровой узел регистраторов ADC12500 построен на основе переконфигурируемых ПЛИС, что позволяет адаптировать его программными методами к различным приложениям (спектроскопия, интерферометрия и др.).

### 2.4.1. Аналоговый узел регистратора

Схема построения аналогового узла регистратора ADC12500 показана на рисунке 2.15. Сигнал с выхода фотоприемника поступает на усилительный блок A1, основой которого является усилитель AD8174R с переключаемыми входами и резистивный R-2R делитель (R2-R1). Каждое звено R-2R делителя ослабляет входной сигнал в два раза, обеспечивая работу с входным сигналом амплитудой 2.5 В, 5 В, 10 В, 20 В. Выбор усилителя AD8174R был обусловлен его широкой полосой пропускания (до 100 МГц), высокой стабильностью близкого к единице коэффициента передачи, в амплитудном диапазоне, соответствующем шкале преобразования АЦП.

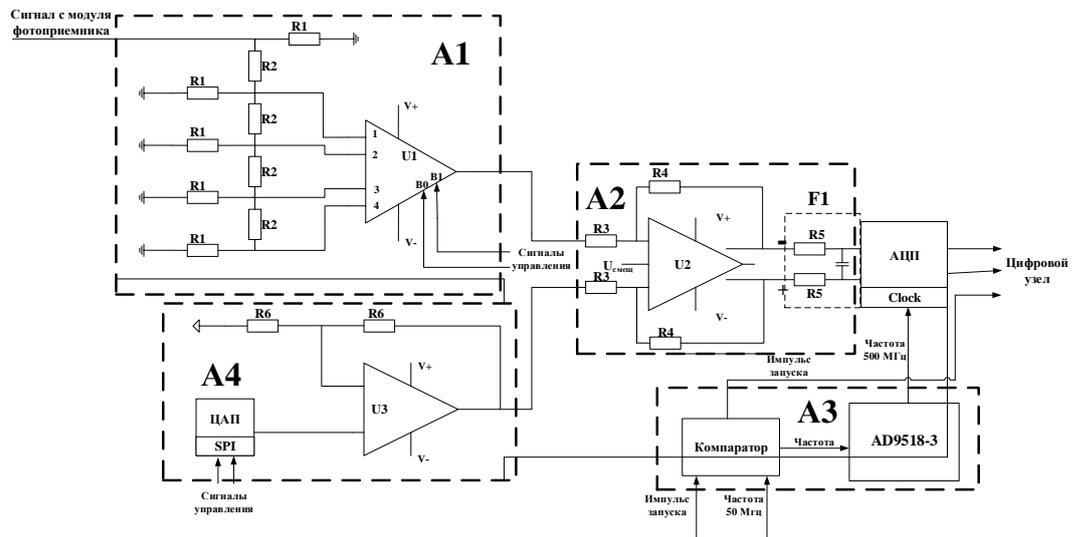


Рисунок 2.15. Аналоговый тракт модуля АЦП.

Вспомогательным элементом измерительного тракта является блок A4, который формирует напряжение смещения нуля входного сигнала. Он построен на основе 2х-канального 12-разрядного ЦАП AD5624. По каналу связи SPI в ЦАП загружается опорная константа, в соответствии с которой формируется необходимое напряжение сдвига нуля. Сигналы с выхода ЦАП поступают на усилительный блок A2 через буферный усилитель U3.

Блок A2, решает три основные задачи: суммирует сигналы с блоков A4 и A1, преобразует входной сигнал в дифференциальный и согласует его со шкалой преобразования АЦП по амплитуде. Основой блока A2 является

дифференциальный усилитель ADA4937-1, обладающий малой величиной, приведенной к его входу спектральной плотности шума ( $\sim 2.2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ ) и частотой единичного усиления 1.9 ГГц. Усилитель ориентирован на работу с быстродействующими (сотни МГц) АЦП с разрешающей способностью до 16 бит. Помимо этого, усилитель ADA4937-1 смещает уровень выходного сигнала на величину  $U_{\text{смещ}}$ , что позволяет согласовать его уровень со амплитудной шкалой АЦП с однополярным питанием.

Фильтр  $F1(R5 - C1 - R5)$  включенный между каскадом А2 и АЦП, решает две задачи: нейтрализует броски тока, возникающие в момент фиксации значения амплитуды входного сигнала устройством выборки и хранения (УВХ) АЦП и ограничивает сверху полосу пропускания аналогового тракта сверху  $\sim 50 \text{ МГц}$ .

Ключевым элементом регистратора является кристалл АЦП. На этапе разработки этого прибора на рынке радиоэлектронной элементной базы были доступны кристаллы АЦП, параметры которых указаны в таблице 2.1. Из их числа нами был выбран кристалл ADS5463 [83], поскольку он обладал максимальной частотой дискретизации при приемлемом амплитудном разрешении.

Таблица 2.1. Сравнительная характеристика кристаллов АЦП, существующих на момент разработки измерительной системы.

Название кристалла	Разрядность	Частота дискретизаций	SNR	Тип выходного каскада	Полоса пропускания аналогового тракта
ADS5463	12 бит	500 МГц	64,6 Дб	LVDS	2 ГГц
ADS5474	14 бит	400 МГц	69,8 Дб	LVDS	1.4 ГГц
AD12401	12 бит	400 МГц	63 Дб	LVDS	500 МГц

При оцифровке импульсных сигналов с высокой скоростью нарастания и спада существенное влияние на результирующую точность аналого-цифрового преобразования оказывает апертурная неопределенность момента фиксации выборочных значений сигнала. Апертурная неопределённость – параметр, характеризующий флуктуации истинного момента взятия отсчёта относительно предполагаемой временной координаты (Рисунок 2.16). Максимальное значение амплитудной погрешности равно произведению скорости нарастания сигнала на величину апертурной неопределенности. При обработке входного сигнала с верхним значением частоты  $F_{вх}$  и погрешности в единицу младшего разряда для N-разрядного АЦП величина апертурной неопределенности:

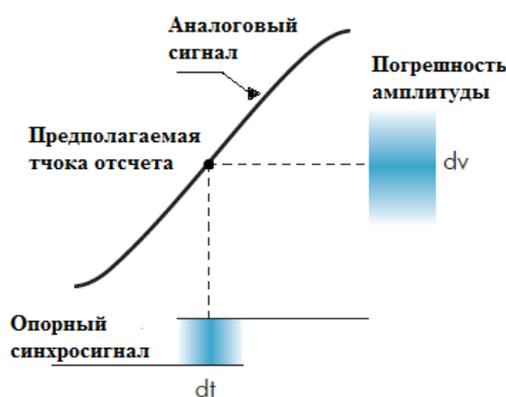


Рисунок 2.16. Влияние величины апертурной неопределенности на оцифрованный сигнал.

$$t_a \leq \frac{1}{2\pi F_{вх} \cdot (2^N - 1)}. \quad (2.2)$$

График зависимости величины апертурной неопределенности от частоты входного синусоидального сигнала полной амплитуды для АЦП различной разрядности приведен на рисунке 2.17.

Для уменьшения величины апертурной неопределенности до предельно малых значений в узле синхронизации АЗ регистратора ADC12500 используется ГУН (генератор, управляемый напряжением) с петлей ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты) (Рисунок 2.18) [84]. Принцип работы такого узла «очистки» синхросигнала от избыточных фазовых шумов синхросигнала

достаточно прост. Фазовый детектор сравнивает частоты опорного синхросигнала  $F_{ex}$  и синхросигнала генерируемого ГУН  $F_{гун}$ . Он формирует выходной сигнал, который является мерой их фазового рассогласования. Если частоты  $F_{ex}$  и  $F_{гун}$  не равны друг другу, то сигнал фазового рассогласования после фильтрации и усиления будет воздействовать на ГУН, приближая частоту  $F_{гун}$  к  $F_{ex}$ . Фильтр низких частот (НЧ-фильтр) петли обратной связи подавляет все высокочастотные колебания разностного сигнала и формирует для ГУН очищенный от шумов управляющий сигнал. Поэтому апертурная неопределенность выходного синхросигнала будет определяться его стабильностью и коэффициентом подавления шумовых компонент фильтром низких частот (ФНЧ) петли ФАПЧ.

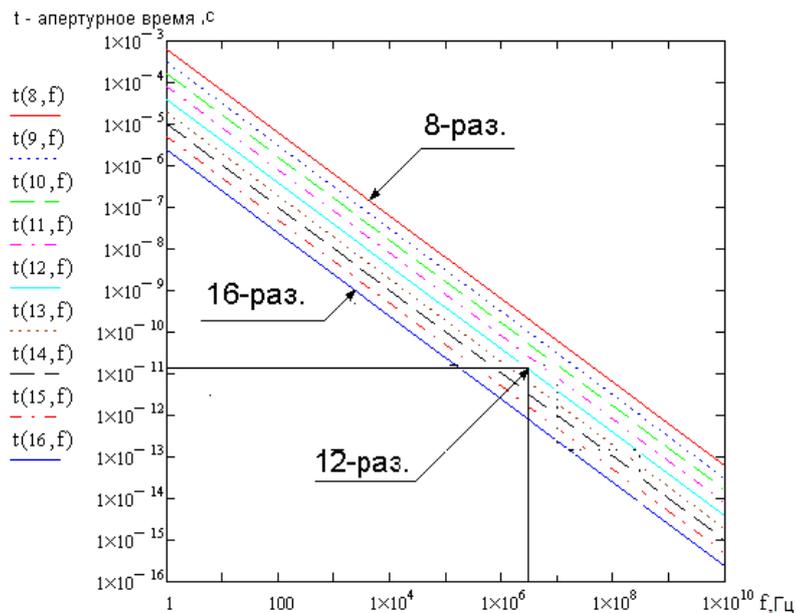


Рисунок 2.17. Зависимость апертурной неопределенности от входной частоты.

Электронными фирмами выпускаются специальные кристаллы «очистки» опорных синхроимпульсов от избыточного фазового шума, строящиеся по описанной выше схеме. В регистраторе ADC12500 для решения этой задачи используется кристалл AD9518-3 [85]. В его состав входят: ГУН (VCO) с низким уровнем фазового шума, приёмник опорного синхросигнала, вспомогательный набор делителей частоты ГУН, сигналы с которых

поступают на шесть выходных формирователей. Синхросигнал, задающий частоту дискретизации АЦП, поступает с одного из этих формирователей. Коэффициент связи между частотой опорного и выходного сигнала в этом кристалле задается программным способом с помощью шины SPI. В регистраторе ADC12500 применение этого кристалла позволило получить результирующую апертурную неопределённость синхроимпульсов, задающих частоту АЦП 500 МГц, на уровне  $\sim 0.7$  псек.

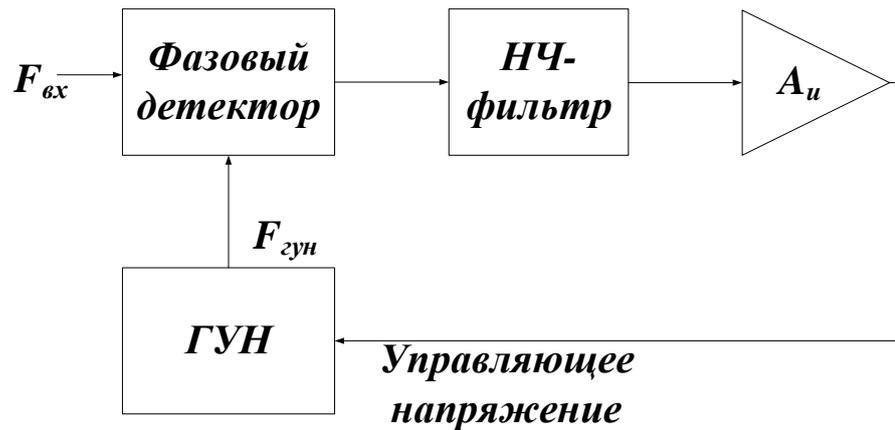


Рисунок 2.18. Схема фазовой автоподстройки частоты.

Узел синхронизации и таймирования регистратора АЗ на основе кристалла AD9518-3 включает в себя также приемники внешнего опорного синхросигнала и импульса запуска. Что позволяет, при наличии общего генератора внешних опорных синхроимпульсов, построить на основе регистраторов ADC12500 многоканальную измерительную систему, характеризующуюся единым масштабом временной шкалы всех измерительных трактов.

#### 2.4.2. Цифровой узел регистратора

Цифровой узел регистратора ADC12500 решает следующие задачи:

- Принимает данные от кристаллов АЦП с заданным темпом;
- Загружает опорные константы в регистры управления коэффициентом передачи аналогового тракта;

- Загружает величины напряжения смещения нуля каждого аналогового тракта в ЦАП;
- Инициализирует кристалл ГУН с петлей ФАПЧ посредством загрузки необходимой последовательности управляющих констант в его регистры управления;
- Выполняет процедуры предварительной обработки данных;
- Управляет работой буферного запоминающего устройства (ЗУ), фиксирующего отсчёты каждого кристалла АЦП;
- Считывает накопленные в буферном ЗУ данные и передает их по каналу связи Ethernet консольному компьютеру.

Цифровой узел построен на основе программируемой логической матрицы (ПЛИС/FPGA) фирмы Altera серии Cyclone III (Рисунок 2.19). Для решения перечисленных задач в его состав включены:

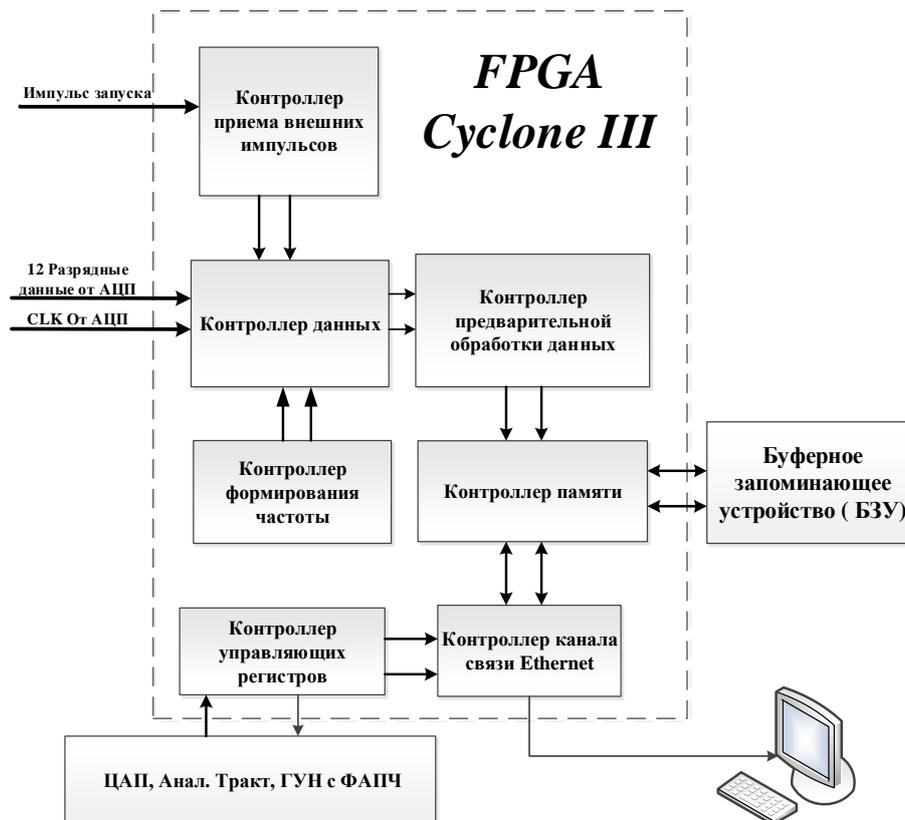


Рисунок 2.19. Структурная схема цифрового узла регистратора ADC12500.

- Контроллер приема данных, обеспечивающий фиксацию поступающих от АЦП отсчетов с помощью входных приемников DDIO (Double data input/output) по обоим фронтам сопровождающего их опорного синхросигнала с частотой 250МГц;
- Контроллер памяти, реализующий несколько режимов работы регистратора: непрерывный, непрерывный с предысторией и страничный;
- Контроллер управляющих регистров, обеспечивающий выбор необходимого коэффициента передачи аналогового тракта, загрузку соответствующих управляющих констант в кристалл ГУН с петлей ФАПЧ и ЦАП по последовательной шине SPI;
- Блок синхронизации и таймирования, формирующий опорные синхросигналы для всех измерительных трактов;
- Узел формирования частоты дискретизации, обеспечивающий запись в ЗУ как без, так и с прореживанием исходного потока данных;
- Блок предварительной обработки данных. С его помощью реализуются процедуры обработки информации, поступающей от АЦП, необходимые в конкретных диагностиках. Например, усреднение отсчетов, выделение максимальных и минимальных значений, формирование амплитудных спектров;
- Контроллер канала связи Ethernet, отвечающий за взаимодействие с консольным ПК.

Регистратор ADC12500 разрабатывался как прибор универсального назначения. С целью расширения его функциональных возможностей в состав цифрового узла были включены средства управления частотой дискретизации, амплитудной шкалой преобразования, реализованы различные режимы работы буферного ЗУ и алгоритмы предварительной обработки данных.

Кроме того, в состав регистратора были включены внешнее ЗУ относительно большого объема (3М отсчетов на канал) и узел удалённой загрузки, позволяющий изменять логику работы цифрового узла.

В качестве базового элемента для построения буферного ЗУ в регистраторе был использован кристалл А63Р0636 емкостью 1048576 (1М) 36-разрядных слов с предельной частотой записи 250 МГц. Для согласования темпа поступления данных от АЦП с темпом их записи в ЗУ используется процедура распараллеливания данных. Её суть заключается в следующем (Рисунок 2.20). С помощью PLL (Phase Locked Loop), входящих в состав ПЛИС, формируется три синхроимпульса, следующих с частотой 500/3 МГц, сдвинутых друг относительно друга по фазе на 120°. По первым двум синхросигналам обеспечивается запись данных в 12-разрядные регистры Reg\_1 и Reg\_2. По последнему синхросигналу данные, от приемника и зафиксированные в регистрах Reg\_1 и Reg\_2, записываются в выходной 36-разрядный регистр.

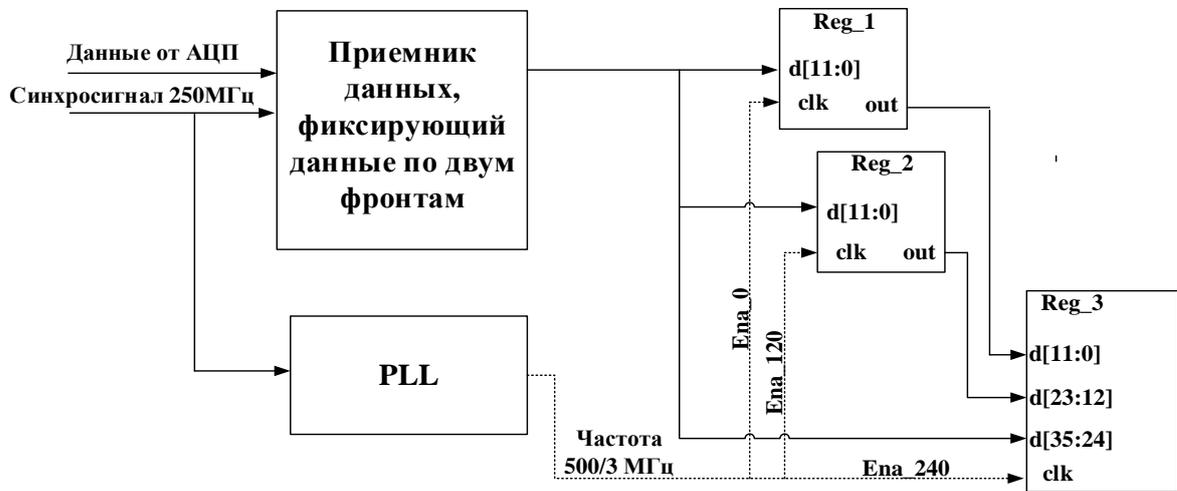


Рисунок 2.20. Процедура распараллеливания данных, поступающих от АЦП.

Длительность цикла фиксации данных в регистраторах на основе быстродействующих АЦП определяется двумя факторами: частотой дискретизации и объемом ЗУ. При фиксированном объеме ЗУ реализовать необходимую пользователю временную шкалу можно только за счет

изменения частоты дискретизации АЦП. Обычно необходимая частота дискретизации формируется делением опорной частоты в несколько раз. При этом возникает риск роста апертурной неопределенности результирующего синхросигнала, что может привести к увеличению динамической ошибки трактов а-ц преобразования. Для исключения ошибок подобного рода в регистраторе ADC12500 частота дискретизации фиксирована, а необходимая временная шкала формируется с помощью процедуры прореживания потока данных от АЦП при их записи в буферное ЗУ. В этом случае, запись в регистры Reg\_1, Reg\_2, Reg\_3 (Рисунок 2.20) ведется не с частотой 500/3 МГц, а с частотой, деленной в соответствующее число раз. В регистраторе ADC12500 эквивалентная частота дискретизации перестраивается в диапазоне от 8 МГц до 500 МГц.

Из выходного регистра Reg\_3 данные поступают на контроллер памяти и в случае необходимости на узел предварительной обработки.

Контроллер памяти реализует следующие режимы накопления данных: непрерывный, страничный и непрерывный с регистрацией предыстории.

В непрерывном режиме (Рисунок 2.21) с приходом программного разрешения работы контроллер памяти переходит в режим ожидания внешнего или программного запуска. Процесс регистрации данных начинается по любому из них и продолжается до заполнения объема ЗУ, заданного пользователем. Максимальный объем ЗУ в этом режиме работы составляет 3М отсчетов.

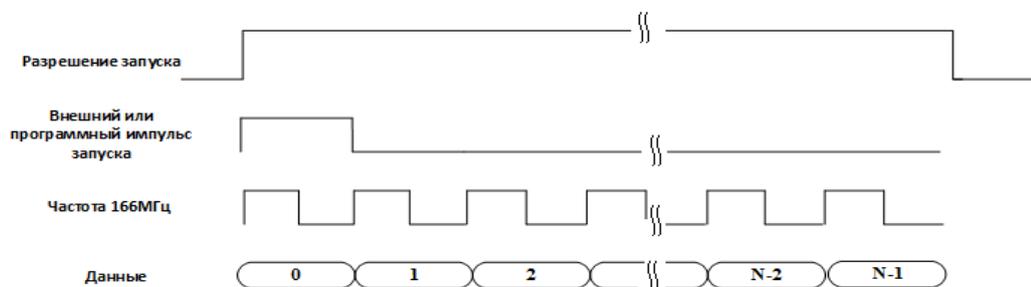


Рисунок 2.21. Непрерывный режим работы регистратора. Где N – объем памяти, задается пользователем.

Страничный режим регистрации отличается от непрерывного тем, что в его рамках запись данных в ЗУ регистратора ведется после каждого запуска (программного или по внешнему импульсу) не до заполнения всего объема памяти, а лишь до конца текущей страницы (Рисунок 2.22). Размер страницы составляет  $4096 \times 3$  отсчетов по каждому каналу. По окончании записи в текущую страницу ЗУ указатель её номера инкрементируется, а процесс регистрации данных приостанавливается. Контроллер памяти ожидает следующий импульс запуска, с поступлением которого начинается запись данных от АЦП в следующую страницу ЗУ. Процесс накопления данных в страничной моде заканчивается после заполнения числа страниц, заданных пользователем.

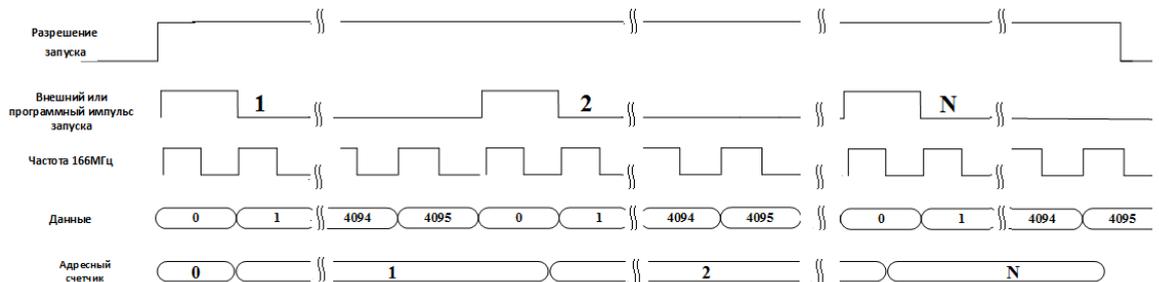


Рисунок 2.22. Страничный режим работы регистратора. Где N – количество страниц, задается пользователем.

Характер работы регистратора в непрерывном режиме с регистрацией предыстории отражает временная диаграмма, представленная на рисунке 2.23. Циклический процесс записи данных в ЗУ регистратора начинается после программного разрешения. Заканчивается он после истечения фиксированного интервала времени (интервала «послеистории»), отсчитываемого от момента поступления внешнего импульса запуска. Информация, зафиксированная в ЗУ до момента поступления запускающего импульса, отражает «предысторию» поведения входных сигналов, а вся остальная «послеисторию». Длительность интервала «послеистории» задаётся программно. Поскольку в рассматриваемом режиме работы регистратора адресный счетчик ЗУ работает циклически, его состояние в момент поступления импульса запуска может быть произвольным. Чтобы правильно

восстановить последовательность записи отсчётов АЦП в ЗУ на этапе вывода данных, в момент поступления импульса запуска состояние адресного счётчика фиксируется в одноименном регистре. Перед выводом данных из ЗУ, содержимое этого регистра считывается.

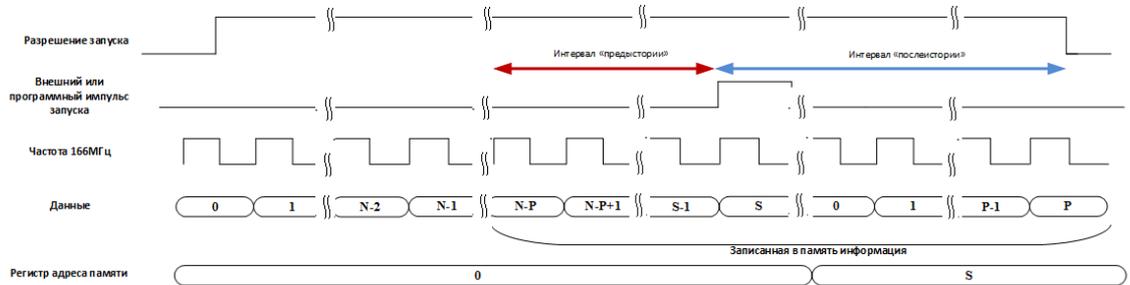


Рисунок 2.23. Непрерывный режим работы регистратора с регистрацией предыстории. Где  $N$  – объем памяти, задается пользователем,  $S$  – адрес остановки.

За взаимодействие регистратора с консольным ПК отвечает контроллер Ethernet. Он решает следующие задачи:

- Записывает информацию, полученную от консольного ПК, в управляющие регистры регистратора и передает ему информацию о текущем состоянии этих регистров;
- Передает информационные массивы, накопленные в буферном ЗУ регистратора консольному ПК;
- Загружает в ПЛИС конфигурационный файл, определяющий схемотехнику и логику работы цифровых узлов регистратора.

Процедуры информационного обмена между консольным ПК и регистратором выполняются в режиме «запрос-ответ». Такой обмен базируется на использовании стандартных Ethernet фреймов и передаче служебной информации в их поле данных.

В автономных приборах, подобных регистратору ADC12500, для загрузки конфигурационного файла в ПЛИС обычно используются специализированные кристаллы постоянных запоминающих устройств (ПЗУ). При включении питания ПЛИС считывает конфигурационный файл из ПЗУ. Очевидно, что описанная процедура ограничивает функциональные

возможности регистратора, поскольку фиксирует логику работы его цифровых узлов. Этот недостаток устраняется за счет использования процедуры удаленной загрузки ПЛИС. Её выполняет загрузчик с уникальным сетевым адресом включенный в состав контроллера канала связи Ethernet. При приёме адресованного к нему сообщения, загрузчик переадресует поток данных из канала связи Ethernet на порт JTAG ПЛИС, с помощью которого производится загрузка конфигурационного файла. Загрузчик построен на основе энергонезависимой ПЛИС MAX3000A.

Все элементы цифрового узла регистратора ADC12500, построенные на элементах ПЛИС, разрабатывались и верифицировались с помощью САПР Quartus 11 версии 9.0.

### **2.5. Система синхронизации**

В соответствии с требованиями, изложенными в §2.1, комплекс регистрации сигналов ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ построен на основе отдельных измерительных подсистем. Ключевым элементом комплекса является система синхронизации, обеспечивающая формирование единой временной шкалы для регистраторов всех подсистем (Рисунок 2.24). Она имеет иерархическую структуру и содержит два вида модулей: таймера и синхронизатора. Таймер выполняет функции ведущего модуля системы. Он отвечает за формирование опорного синхросигнала, задающего частоту дискретизации регистраторов измерительных подсистем, за прием внешнего импульса запуска и его привязку к опорному синхросигналу. Модуль синхронизации, входящий в состав каждой измерительной подсистемы, ретранслирует сигналы запуска и опорный синхросигнал, формируемый таймером, регистраторам ADC12500.

Упрощенная схема построения таймера представлена на рисунке 2.25. Опорный синхросигнал формируется тандемом из кварцевого генератора и ГУН с петлей ФАПЧ (AD9552). Он тиражируется выходными буферными формирователями и передается по оптоволоконным или обычным кабельным линиям связи модулям синхронизации.

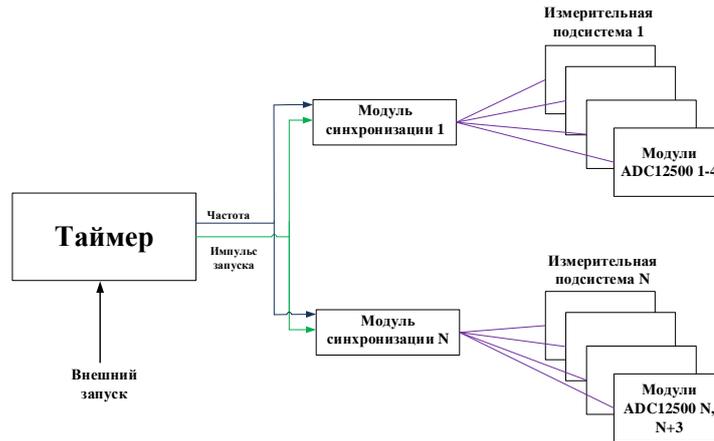


Рисунок 2.24. Структурная схема системы синхронизации на установках ГОЛ-3 и ГДЛ.

Рабочий цикл измерительного комплекса ТР начинается с поступления на таймер внешнего импульса запуска (амплитуда 5-10 В, длительность 20-100 нсек). Этот импульс поступает на программно-управляемую линию задержки, реализованную на элементах ПЛИС. На ее выходе формируется до восьми импульсов запуска, сфазированных с опорным синхросигналом. Дискретность перестройки задержки импульсов запуска составляет 20 нсек на интервале до 1.3 мсек. Это позволяет инициализировать рабочий цикл измерительных подсистем в заданные пользователем моменты времени. Сформированные таймером синхроимпульсы через выходные формирователи поступают на модули синхронизации. Загрузка управляющих констант, определяющих длительность интервала задержки и параметры ГУН с петлей

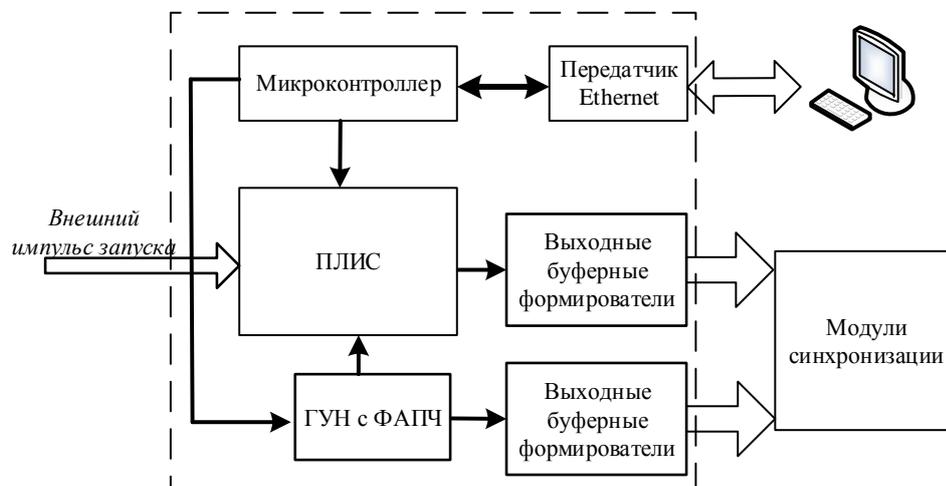


Рисунок 2.25. Структурная схема таймера.

ФАПЧ, производится с помощью микроконтроллера, связанного с консолью оператора по каналу связи Ethernet 10/100.

Схема построения модуля синхронизации представлена на рисунке 2.26. Этот модуль может работать в составе локальных подсистем или в тандеме с таймером в составе полномасштабного измерительного комплекса.

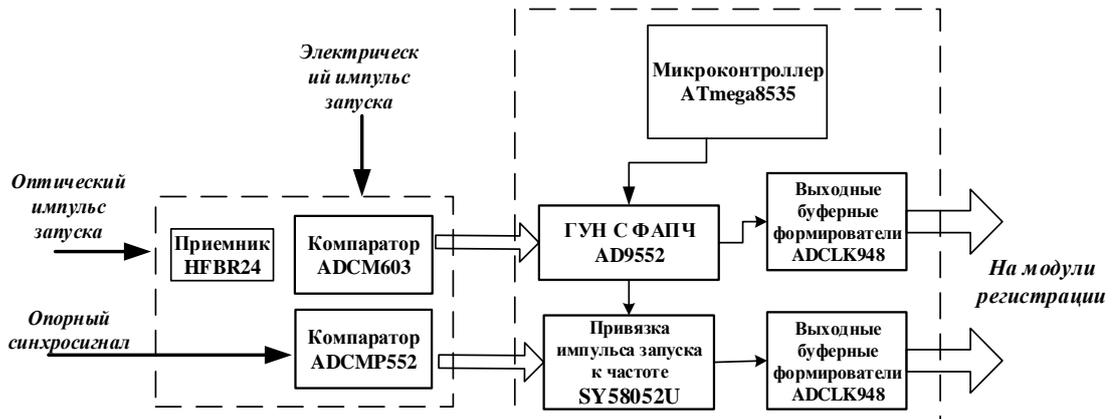


Рисунок 2.26. Структурная схема модуля синхронизации.

В его состав входят приемники импульсов запуска и опорных синхросигналов, поступающие от таймера либо по оптоволоконным, либо по обычным кабельным линиям связи, а также блок, отвечающий за «размножение» и передачу этих сигналов регистраторам подсистемы. Основой этого блока является такой же, как и в таймере, кристалл ГУН с петлей ФАПЧ. Он обеспечивает подавление избыточного фазового шума, появляющегося из-за внешних воздействий на линии связи, а также дисперсии этих сигналов в данных линиях связи. Как следствие, уменьшается величина апертурной неопределенности опорных синхросигналов, поступающих далее на регистраторы, до субнаносекундного уровня  $\sim 0.5$  псек. В отличие от таймера микроконтроллер, входящий в состав модуля синхронизации не связан с консольным компьютером и обеспечивает только начальную загрузку опорных констант в ГУН с петлей ФАПЧ. Вспомогательный D-триггер, обеспечивает привязку внешнего импульса запуска к опорным синхросигналам. С помощью выходных буферных формирователей,

выполняется размножение импульсов запуска и опорных синхросигналов для всех регистраторов измерительной подсистемы.

## 2.6. Программное обеспечение системы регистрации диагностики томсоновского рассеяния

Для системы регистрации диагностики ТР было разработано тестовое программное обеспечение (ПО). Оно позволяет управлять его тремя основными элементами: регистраторами ADC12500, модулями фотоприемников и системой синхронизации. Компонент тестового программного обеспечения, отвечающий за управление регистраторами, позволяет оператору с помощью элементов графической панели (Рисунок 2.27) выполнять следующие функции:

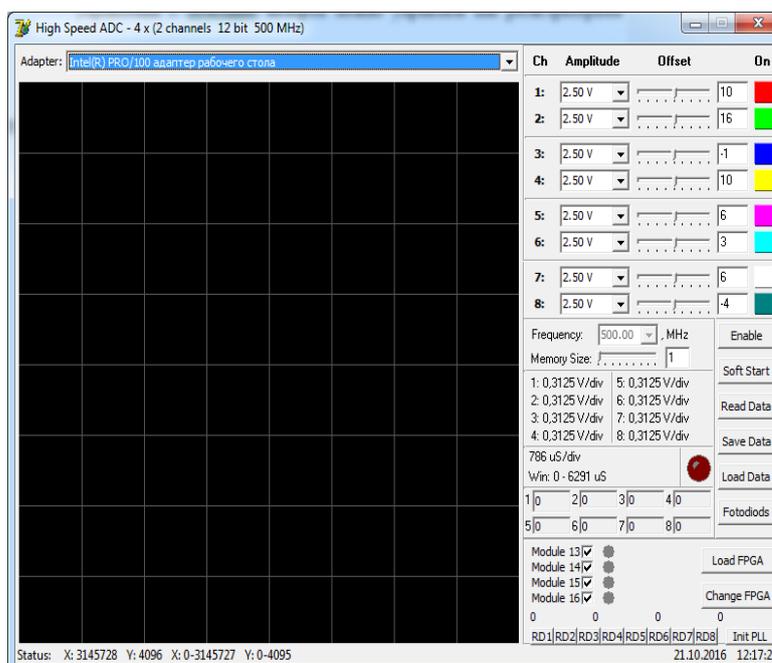


Рисунок 2.27. Графическая панель тестового программного обеспечения.

- Загрузку конфигурационных файлов в регистраторы;
- Определять режим работы регистратора, объем фиксируемых им данных, частоту дискретизации АЦП, амплитудную шкалу преобразования и уровень смещения нуля;

- Отображать на графической панели осциллограммы сигналов, зафиксированные регистратором в непрерывном, страничном и непрерывном с регистрацией предыстории режимах работы.

Компонент, управляющий модулями фотоприемников, позволяет оператору:

- Задавать рабочее и максимальное напряжение смещения лавинных фотодиодов, а также максимально допустимые величины постоянной составляющей на их выходе;
- Контролировать температуру лавинных фотодиодов, величины напряжений смещения и постоянной составляющей выходного сигнала.

Программное обеспечение системы синхронизации ориентировано на работу с модулем таймера. С его помощью оператор может задать величину задержки импульса запуска для каждой измерительной подсистемы.

Тестовое ПО использовалось на этапе наладки и ввода в эксплуатацию систем регистрации на установках ГОЛ-3 и ГДЛ. Помимо описанных выше функций, рабочее программное обеспечение подсистем архивирует экспериментальные данные и выполняет процедуры их математической обработки.

### **2.7. Применение систем регистрации диагностик томсоновского рассеяния в плазменном эксперименте**

На установке ГОЛ-3 в составе диагностики ТР эксплуатируются три измерительные подсистемы. На рисунке 2.28 приведена характерная осциллограмма ВЧ компоненты сигнала рассеянного излучения в одном из спектральных окон. Цифрой «1» отмечен сигнал рассеянного излучения, цифрой «2» сигнал динамической калибровки, а цифрой «3» фоновая составляющая, обусловленная собственным излучением плазмы. Для формирования сигнала динамической калибровки часть излучения лазера проходит через линию задержки в виде длинного световода и подается

непосредственно на вход модулей фотоприемников. Динамическая калибровка предназначена для оперативного измерения относительной чувствительности спектральных каналов.

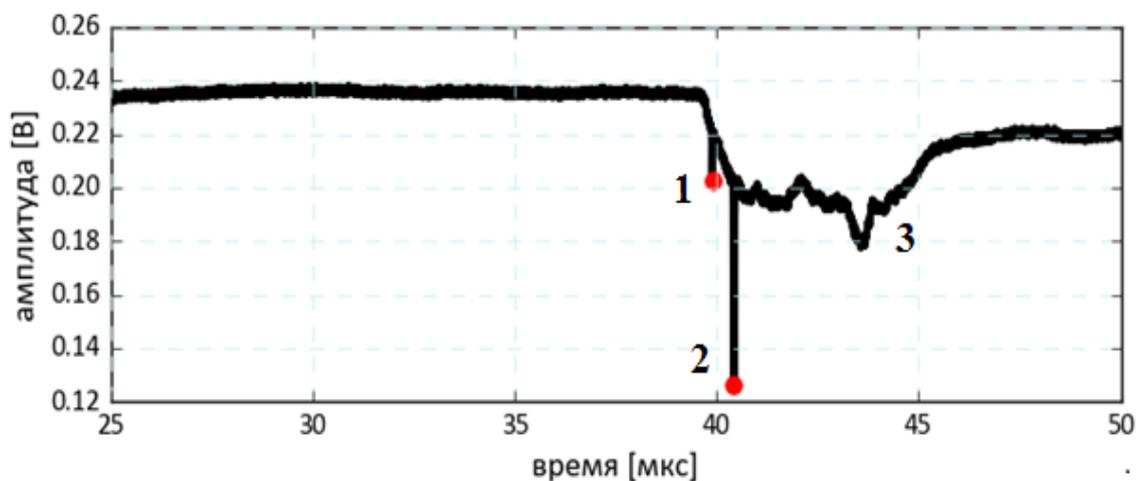


Рисунок 2.28. Осциллограмма ВЧ компоненты сигнала рассеянного излучения на установке ГОЛ-3.

Исходную информацию для измерения температуры плазмы несет интенсивность излучения в каждом спектральном окне, определяемая как вольт-секундная площадь сигнала рассеянного излучения. Полученные данные представляются в координатах логарифм интенсивности рассеянного излучения от  $\Delta\lambda^2$ , где  $\Delta\lambda$  — разность между длиной волны сигнала рассеяния и длиной волны излучения лазера. В случае максвелловского распределения электронов по скоростям данные в этих координатах ложатся на прямую линию, угол наклона которой прямо пропорционален температуре плазмы.

Для измерения плотности плазмы сигналы со световодов передаются на модули фотоприемников, минуя монохроматор. Это позволяет измерить плотность плазмы одновременно в нескольких пространственных точках. Плотность плазмы пропорциональна интенсивности сигнала рассеяния на входе модуля фотоприемника и коэффициенту ослабления интенсивности рассеянного излучения оптическим трактом. Этот коэффициент определяется с помощью процедуры калибровки, выполняемой до измерений плотности плазмы. Калибровка основана на рэлеевском рассеянии лазерного излучения на газе. В его рамках интенсивность рассеянного излучения зависит от

интенсивности зондирующего излучения, коэффициента ослабления и плотности газа. При фиксированном давлении газа и известной мощности лазерного излучения, коэффициент ослабления интенсивности рассеянного излучения легко определяется для каждого измерительного тракта. На рисунке 2.29 в качестве примера приведены результаты измерения профиля плотности в плазме ГОЛ-3.

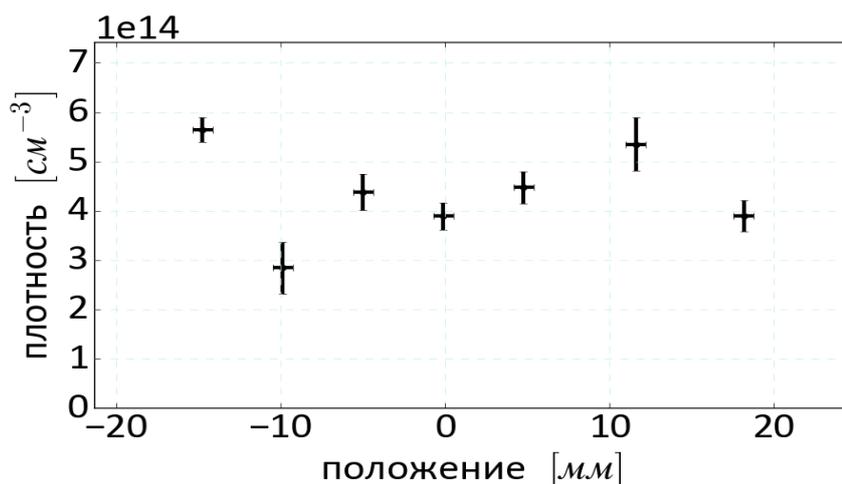


Рисунок 2.29. Радиальный профиль плотности плазмы на установке ГОЛ-3.

На установке ГДЛ в диагностике ТР использовались две измерительные подсистемы. На рисунке 2.30 приведен пример характерной осциллограммы ВЧ компоненты рассеянного сигнала в одном из спектральных окон. Как и в предыдущем случае, на осциллограмме цифрой «1» отмечен сигнал рассеянного излучения, цифрой «2» сигнал динамической калибровки. С помощью консоли оператора рабочей программы можно задавать следующие параметры: энергию лазерного импульса, положение точек наблюдения в вакуумной камере, длины волн излучения, попадающих в каждый спектральный канал, температурные коэффициенты для модулей фотоприемников, а также амплитуду фоновой компоненты сигнала фотоприемника. Результаты обработки представляются в координатах логарифм интенсивности рассеянного излучения,  $\Delta\lambda^2$  (Рисунок 2.31), что позволяет по наклону вписанной прямой определить температуру электронной компоненты плазмы. Измерительные каналы расположены на

крыле гауссовой кривой спектра рассеяния со стороны меньших длин волн от длины волны лазера.

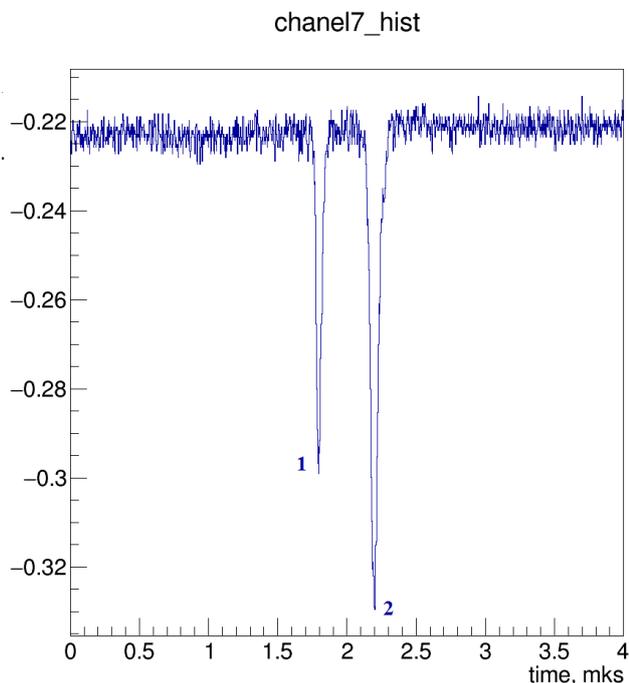


Рисунок 2.30. Сигнал рассеянного излучения на установке ГДЛ.

В отличие от экспериментов на ГОЛ-3, на ГДЛ для измерения плотности плазмы используется тот же набор результатов измерений в каждом спектральном окне, что и для измерения температуры плазмы. На их основе восстанавливается спектр в гауссовом представлении. Далее вычисляется его площадь, которая нормируется на коэффициент ослабления, полученный в калибровке по рэлеевскому рассеянию.

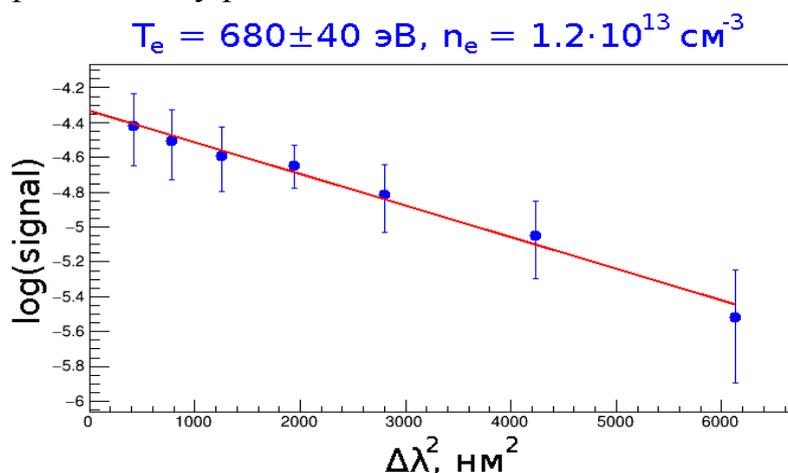


Рисунок 2.31. Экспериментальные результаты и вписанная линия позволяющая определить температуру и плотность плазмы.

Радиальные профили температуры и плотности плазмы на установке ГДЛ восстанавливаются по результатам последовательности экспериментов, в каждом из которых фиксируются сигналы рассеяния, поступающие из одной точки пространства. Настройка оптической системы диагностики на другую точку производится между «выстрелами» установки. На рисунке 2.32 приведены результаты измерений плотности и температуры плазмы.

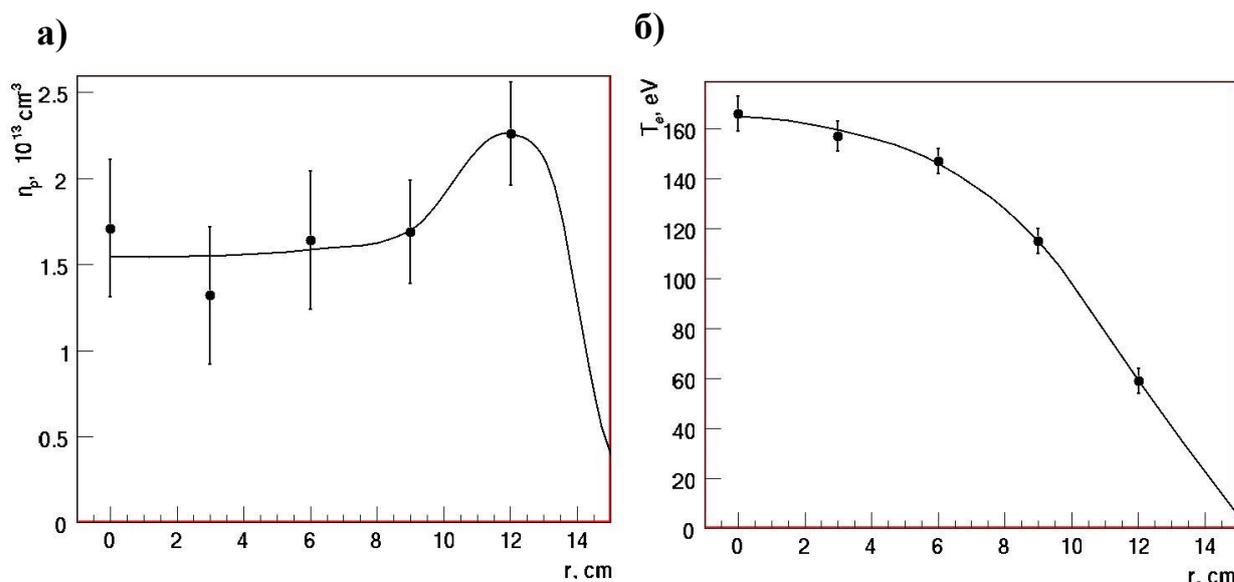


Рисунок 2.32. а) радиальный профиль плотности на установке ГДЛ б) радиальный профиль температуры плазмы на установке ГДЛ.

Системы регистрации диагностики ТР на установках ГДЛ и ГОЛ-3 находятся в эксплуатации более 8 лет. Несмотря на их сложность и относительно высокую стоимость, опыт эксплуатации этих систем подтвердил правильность выбора осциллографического метода регистрации данных для регистрации большого количества однократных импульсных сигналов малой длительности. Результаты использования таких систем в плазменном эксперименте приведены в работах [30], [32] и [34].

## 2.8. Основные результаты Главы 2

1. Разработаны модули фотоприемников на основе лавинных фотодиодов со встроенными трансимпедансными усилителями. Полоса рабочих частот этих фотоприемников 0-50 МГц. В указанной полосе частот

соотношение сигнал/шум фотоприемника  $\sim 50$ , что удовлетворяет требованиям диагностики ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ.

2. Разработаны модули адаптеров, сопрягающих фотоприемники с приборным интерфейсом на основе канала связи Ethernet 10/100.
3. На основе метода прямого преобразования, базирующегося на оцифровке текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП, разработаны двухканальные регистраторы ADC12500. Они фиксируют текущие значения амплитуды сигналов с частотой дискретизации 500 МГц в 12-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Полоса рабочих частот регистраторов составляет 0-50 МГц. На рисунке 2.33 а приведено распределение отсчетов на выходе одного из АЦП регистратора при подаче на его вход нулевого сигнала. Эти отсчеты АЦП формируют гистограмму распределения шумовой компоненты, которая показана на рисунке 2.33 б. Что определяет разрешающую способность (ENOB) регистратора на уровне  $\sim 10,7$  бит [34].

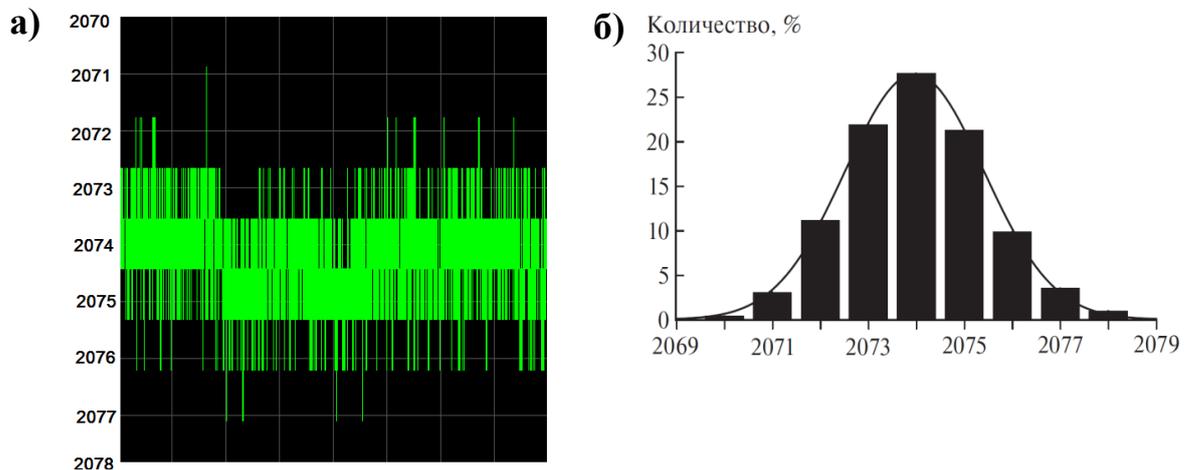


Рисунок 2.33. а) Нулевой сигнал, зарегистрированный системой регистрации б) Шумовая гистограмма.

4. Разработаны программно-исполняемые алгоритмы, позволившие использовать регистратор ADC12500 для анализа амплитудного распределения импульсов в нейтронной диагностике [31]. Кроме того,

эти приборы используются в экспериментах на установке ГОЛ-3 в для регистрации сигналов в диагностике микроволнового излучения, генерируемого плазмой [41].

5. На основе двухканальных регистраторов ADC12500 были разработаны регистратор ADC12500PXIe [34], сертифицированный по стандартам ИТЭР [85] и регистратор ADC122000 [87], входящий в состав измерительной системы томсоновского рассеяния на установке Глобус-М.
6. Разработана система синхронизации, обеспечивающая формирование единой временной шкалы для всех измерительных подсистем сигналов ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ.
7. Изготовлены шесть измерительных подсистем (4 для установки ГОЛ-3, 2 для установки ГДЛ), каждая из которых включает в свой состав: 8 модулей фотоприемников, модуль адаптера, 4 двухканальных регистратора ADC12500, модуль синхронизации. Указанные подсистемы находятся в эксплуатации на установках ГОЛ-3 и ГДЛ более восьми лет.

На рисунке 2.34 представлена фотография измерительной системы для диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ, а на рисунке 2.35 ее базовые модули.

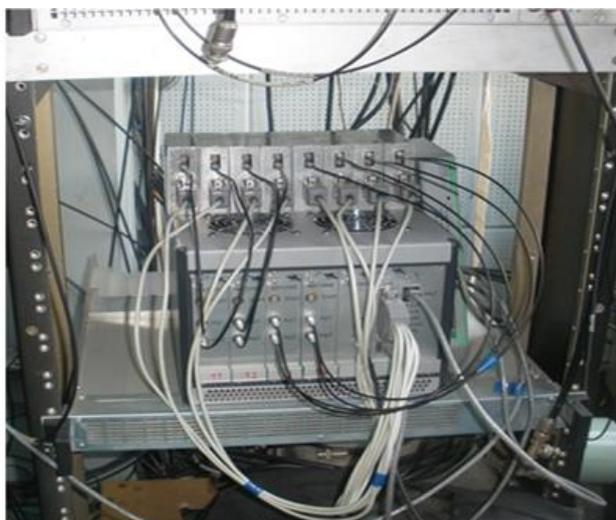


Рисунок 2.34. Измерительная система для диагностики ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ.

а)



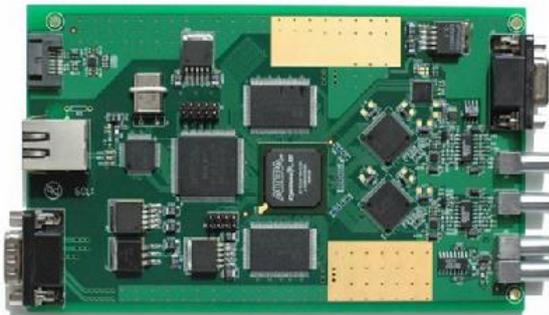
б)



в)



г)



д)

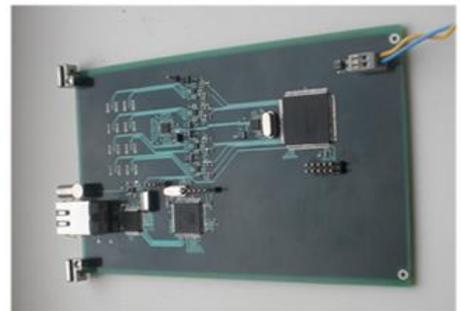


Рисунок 2.35. а) Модуль фотоприемника; б) Модуль адаптера; в) Модуль синхронизации; г) Модуль регистрации ADC12500; д) Модуль таймера.

## **Глава 3. Система регистрации сигналов на основе метода масштабного-временного преобразования для диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ**

### **3.1. Модернизация диагностики томсоновского рассеяния установки ГДЛ**

Описанный в Главе 2 диагностический комплекс ТР на ГДЛ измеряет плотность и температуру электронной компоненты плазмы только в один момент времени в одной точке пространства. Измерение радиальных профилей температуры и плотности плазмы производится в серии воспроизводимых рабочих импульсов путем настройки оптической системы на различные точки вдоль лазерного пучка в разных «выстрелах». Это увеличивает затраты времени на эксперименты и позволяет измерять пространственные распределения и временную эволюцию параметров плазмы, лишь усреднённую по серии «выстрелов». Для устранения этого недостатка в 2014 году было принято решение о разработке нового диагностического комплекса ТР, способного фиксировать динамику радиальных профилей электронной температуры и плотности плазмы в каждом рабочем импульсе [35]. На рисунке 3.1 представлена схема нового диагностического комплекса.

В качестве источника излучения предполагается использовать неодимовый лазер (Nd:YAG) компании Spectra Physics. Энергия лазерного излучения  $\sim 1.75$  Дж, длительность импульса  $\sim 10$  нсек, диаметр пучка 8 мм, угловая расходимость менее 4 мрад. Лазер может работать как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов 10 Гц. Система сбора света рассчитана на измерение температуры и плотности электронов плазмы в 6 пространственно-распределённых по радиусу точках, расположенных вдоль лазерного луча. Каждой точке соответствует отдельный спектральный прибор (спектрометр), построенный на основе узкополосных

интерференционных фильтров. Концепция полихроматора на интерференционных фильтрах для спектральной селекции излучения была изначально предложена для обработки оптических сигналов ТР в работе [88]. Принцип работы системы фильтров поясняет рисунок 3.2. Излучение, попадающее на фильтр №1 пропускается в узком спектральном диапазоне 1050-1054 нм и отражается за его пределами с коэффициентом отражения  $\sim 1$ . Отраженное излучение поступает на фильтр №2, в котором пропускается только диапазон 1040-1050 нм, а остальное излучения отражается. Оставшиеся фильтры пропускают излучение в диапазонах 1030-1040 нм, 1020-1030 нм, 980-1020 нм и 900-980 нм. При этом полосы пропускания фильтров достаточно слабо пересекаются. Каждый спектрометр имеет 6 спектральных окон.

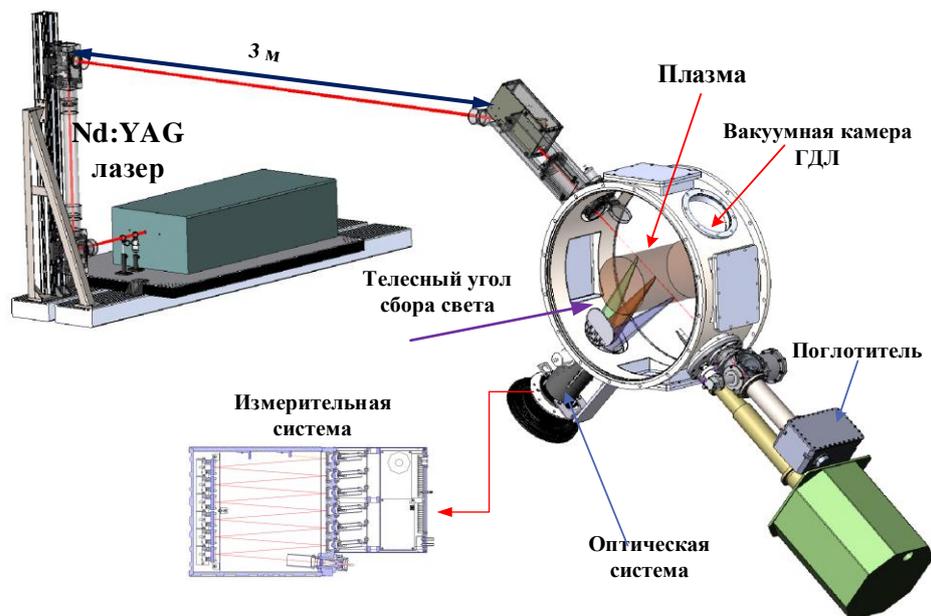


Рисунок 3.1. Модернизация диагностического комплекса ТР на установке ГДЛ.

При выборе детектора излучения необходимо было учесть два основных требования. Детектор должен обладать высокой квантовой эффективностью на длине волны лазерного излучения  $\sim 1064$  нм. При усилении сигнала с детектора трансимпедансным усилителем нужно учитывать собственную емкость детектора, поскольку она оказывает существенное влияние на величину отношения сигнал/шум (Глава 1, §1.2). Детекторы, обладающие

необходимой квантовой эффективностью в интересующем спектральном диапазоне вблизи 1 мкм, выпускаются только двумя фирмами-производителями: HAMAMATSU и Perkin Elmer (Excelitas). Из их числа нами был выбран лавинный фотодиод HAMAMATSU S11519-15, работающий в спектральном диапазоне 600 – 1150 нм, обладающий квантовой эффективностью 50% на длине волны лазерного излучения 1064 нм. Собственная емкость перехода лавинного фотодиода такого типа зависит от величины приложенного к нему обратного напряжения и при превышении некоторого значения достигает минимального значения (Рисунок 3.3). Кроме того, величина емкости зависит от диаметра сенсора, который в S11519-15 составляет 1.5 мм. Величина емкости перехода при этом уменьшается до уровня ~3 пФ при напряжении выше 150 В. Для сравнения лавинный фотодиод HAMAMATSU S11519-30 с диаметром сенсора 3 мм, при том же напряжении смещения имеет емкость перехода 12 пФ.

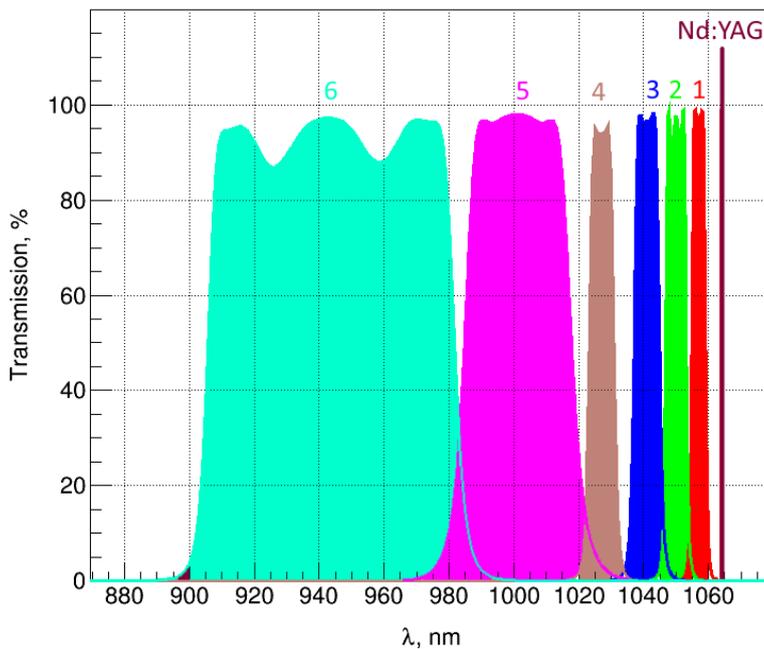


Рисунок 3.2. Полосы пропускания интерференционных фильтров.

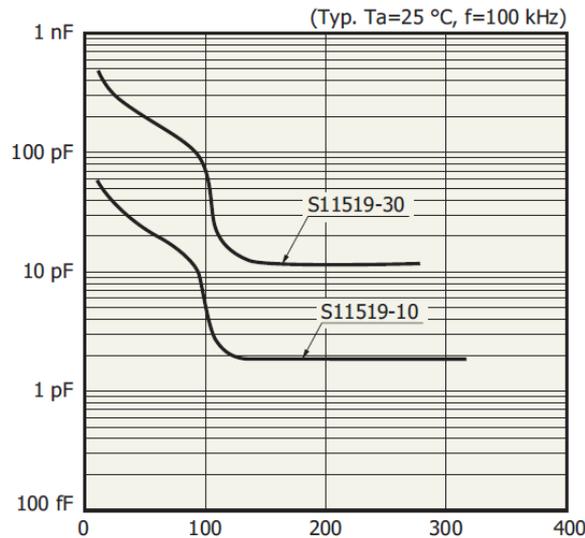


Рисунок 3.3. Зависимость величины емкости перехода лавинного фотодиода от приложенного напряжения.

Рисунок 3.4 поясняет конструкцию спектрометра, оптическая система которого спроектирована так, что позволяет сфокусировать излучение в область диаметром не более 1.3 мм при максимально возможной светосиле.

При указанных выше параметрах лавинного фотодиода и энергии лазерного излучения  $E_0 \sim 1.75$  Дж при длительности импульса  $t \sim 10$  нсек, величина сигнального тока фотодиода (формула 1.16, Глава 1):

$$I_{\text{сигнала}} = \frac{0.3\gamma M \eta q}{t} \times \frac{E\lambda}{hc} = I_0 \times M \approx 15.6 \cdot 10^{-9} M \approx 780 \text{ нА.}$$

Где  $E$  – энергия рассеянного излучения,  $\eta$  – квантовая эффективность лавинного фотодиода,  $I_0$  – ток, порожденный источником внешнего излучения в р-п переходе лавинного фотодиода,  $M$  – коэффициент лавинного умножения  $\sim 50$ .

Оценим среднеквадратичное значение шумового тока фотодиода (Формула 1.17):

$$i_{\text{лфд}} = \sqrt{2q(I_0 + I_T)M^2\Delta f_{\text{лфд}}} \approx 45 \text{ нА.}$$

Где  $I_T$  – темновой ток лавинного фотодиода  $\sim 9$  нА,  $\Delta f_{\text{лфд}}$  – полоса рабочих частот лавинного фотодиода 0 – 100 МГц.

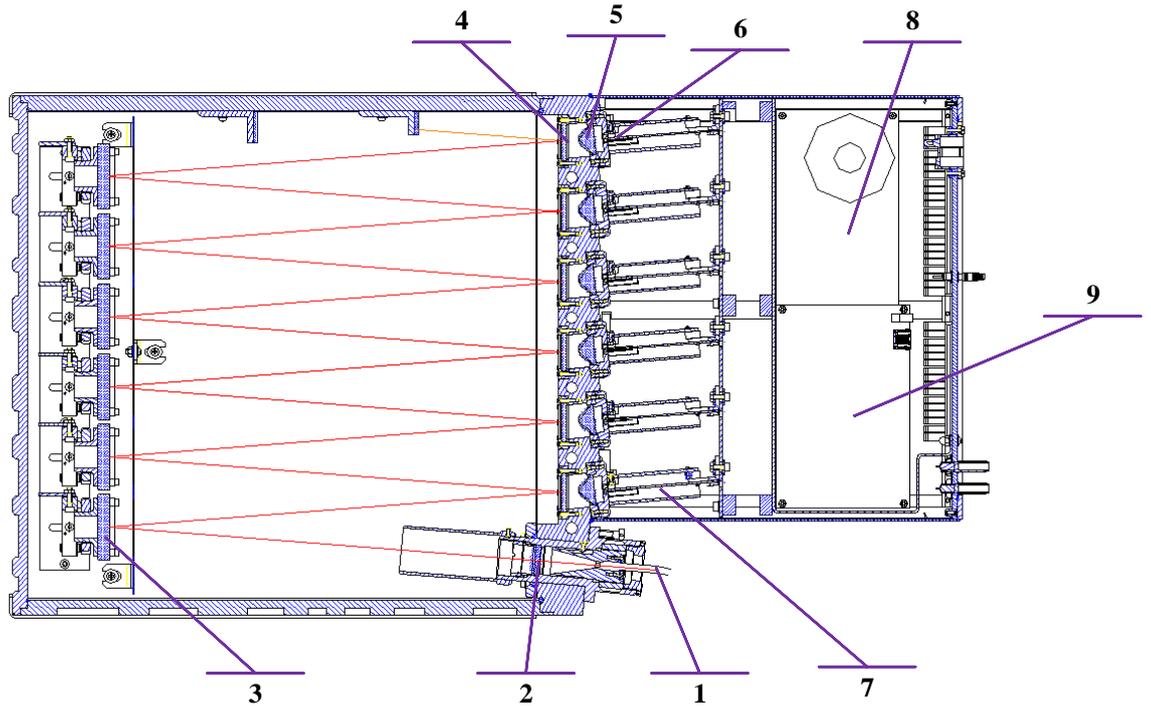


Рисунок 3.4. Конструкция спектрометра, совмещенного с измерительной системой: 1 – Световод, по которому вводится излучение; 2 – Ахроматический коллиматор; 3 – Вогнутое зеркало; 4 – Интерференционные фильтры; 5 – Асферическая линза; 6 – Лавинный фотодиод; 7 – Усилитель; 8 – Источник питания; 9 – Измерительная система.

Для усиления токового сигнала с выхода лавинного фотодиода удобно использовать широкополосный малошумящий трансимпедансный усилитель в интегральном исполнении. Подобные усилители с уникальными техническими характеристиками появились несколько лет назад у таких фирм-производителей, как Texas Instruments и Analog Devices (Таблица 3.1).

Оптимальными характеристиками из усилителей, указанных в таблице обладает ОРА857 фирмы Texas Instruments. Он и был выбран нами для усиления токового сигнала. Среднеквадратичное значение шумового тока, приведенное ко входу этого усилителя:

$$i_{\text{дет}} = \sqrt{i_{\text{лфд}}^2 + i_{\text{усил}}^2} = \sqrt{45^2 + 15^2} = 47.4 \text{ нА.}$$

Таблица 3.1. Сравнительная таблица трансимпедансных усилителей.

Усилитель	Полоса пропускания	Сопротивление обратной связи	Шумовой ток, $i_{усил}$
OPA857	105 МГц	20 кОм	15 нА
LTC6561	200 МГц	74 кОм	64 нА

Видно, что основной вклад в шумовые характеристики лавинного фотодиода, совмещенного с трансимпедансным усилителем, дает шумовая компонента тока  $i_{лфд}$ . Отношение амплитуды сигнальной компоненты к среднеквадратичному значению шумового тока составляет:

$$A = \frac{I_{сигн}}{i_{дет}} \approx 16.5.$$

Амплитуда выходного сигнала трансимпедансного усилителя при указанной в таблице 3.1 величине сопротивления обратной связи 20 кОм оценивается на уровне  $\sim 15$  мВ. Её явно недостаточно для надежной регистрации, что требует, как минимум, еще одного каскада усиления. Этот каскад построен на основе дифференциального усилителя ADA4938-1 фирмы Analog Devices (Рисунок 3.5).

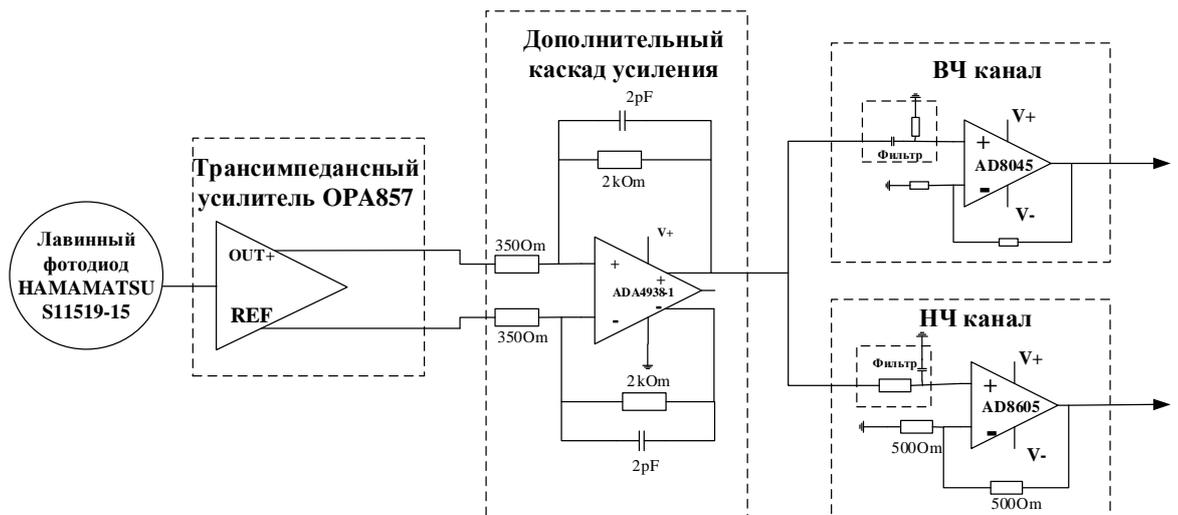


Рисунок 3.5. Функциональная схема усилителя для фотоприемников.

Спектр сигнала рассеяния при длительности импульса зондирующего излучения  $\sim 10$  нсек ограничен сверху частотой  $\sim 50$  МГц. При этом трансимпедансный усилитель имеет полосу пропускания 105 МГц, превышающую необходимую более чем в два раза. В избыточной полосе пропускания от 50 до 105 МГц усиливается только шумовой ток, который в итоге накладывается на сигнал и существенно уменьшает значение соотношения сигнал/шум. Для того, чтобы исключить этот эффект, в состав второго усилительного каскада включены емкости, образующие с сопротивлениями обратной связи интегрирующие звенья, ограничивающие полосу пропускания сигнального тракта.

Как и в детекторах предыдущего поколения (Глава 2, §2.2) сигнал рассеяния на выходе усилителя разделяется с помощью RC-фильтров на высокочастотную (ВЧ) и низкочастотную (НЧ) компоненты. ВЧ тракт формирует сигнал, поступающий на вход быстродействующих узлов оцифровки. НЧ тракт формирует сигнал для оцифровки медленными АЦП фоновой компоненты, связанной с собственным свечением плазмы.

Спектрометр, шесть лавинных фотодиодов, совмещенных с усилителями, и тракты регистрации сигналов рассеяния расположены внутри единого экранирующего корпуса (Рисунок 3.4). Одна такая сборка обеспечивает фиксацию сигналов рассеяния в 6 спектральных окнах в одной локальной точке. При этом, сборка должна включать в себя помимо основных трактов регистрации, как минимум, еще один дополнительный тракт. Он необходим для фиксации энергии импульса лазерного излучения.

Тракты регистрации сигналов рассеяния можно построить, как и регистраторы предыдущего поколения (Глава 2, §2.4) на основе быстродействующих АЦП. Однако, такие регистраторы обладают высоким токопотреблением, что накладывает ограничение на количество каналов, размещенных в одной сборке. Негативным фактором является так же их высокая стоимость (Таблица 1.1).

Указанные недостатки стимулировали поиски альтернативных способов построения средств регистрации, основанных на использовании ПЗС структур и матриц емкостных накопителей (Глава 1, §1.3). ПЗС структуры в основном ориентированы на фиксацию изображений. Как правило, они обладают большим временем экспозиции и малыми временами считывания информации. В нашем случае, ситуация обратная. В диагностике ТР на установке ГДЛ необходимо фиксировать текущие амплитудные значения сигналов рассеяния в режиме реального времени, при этом скорость их оцифровки и считывания незначительна, так как частота повторения импульсов зондирующего излучения не превышает 10 Гц.

Матрицы емкостных накопителей, при регистровой организации элементов фиксации сигналов, удовлетворяют требованиям диагностики ТР. Они работают с высокой эффективной частотой дискретизации (единицы и десятки Гигагерц) с амплитудным динамическим диапазоном на уровне 10 двоичных разрядов. Матрицы могут включать в себя десятки тысяч запоминающих ячеек, что позволяет строить на их основе многоканальные регистраторы. К их недостаткам можно отнести тот факт, что входные и выходные каскады каждого емкостного накопителя имеют характерные только для них напряжения сдвига нуля и коэффициенты передачи сигналов по амплитуде. Однако, указанные недостатки можно исключить с помощью специальных калибровочных процедур.

Производством и разработкой матриц емкостных накопителей занимаются несколько научно-исследовательских институтов, работающих в сфере детекторной электроники [78 - 80]. В Таблица 3.2 приведены параметры выпускаемых ими кристаллов.

Таблица 3.2. Сравнительная таблица некоторых кристаллов матриц емкостных накопителей

Разработчик	Название кристалла	Частота дискретизации	Время считывания одного емкостного накопителя	Количество ячеек
Гавайский Университет, США	LAB4D	3.2 ГГц	100 нсек	4096
	TARGET2	0.2-1.8 ГГц	33,3 нсек	16384
Исследовательский институт IRFU, Франция	SAM	0.7-2 ГГц	100 нсек	512
	NECTAr0	0.5-3.2 ГГц	125 нсек	1024
	MATACQ	0.05-2 ГГц	64,4 нсек	10080
Университет Чикаго, США	PSEC4	4-15 ГГц	20 мкс	1536
Исследовательский Институт PSI, Швейцария	DRS4	0.7-5.5 ГГц	30,3 нсек	9216

### 3.2. Высокоскоростной регистратор на основе матрицы емкостных накопителей

В регистраторе на основе матриц емкостных накопителей можно выделить следующие элементы (Рисунок 3.6):

1. Входные приемные тракты ВЧ компонент сигналов рассеяния;
2. Матрица емкостных накопителей, обеспечивающая фиксацию сигналов рассеяния с частотой несколько гигагерц и дальнейшее их считывание в более медленном темпе;
3. Узел, формирующий сигналы для проведения амплитудной и временной калибровки элементарных ячеек матрицы емкостных накопителей;

4. АЦП мегагерцового диапазона, осуществляющий преобразование текущего значения амплитуды выходных сигналов матрицы емкостных накопителей в цифровой код;
5. Цифровой узел, решающий задачи приема и предварительной обработки поступающих от АЦП данных, калибровки измерительных трактов, коррекции результатов измерений, формирования результирующих информационных массивов, а также их передачи диагностическому серверу.

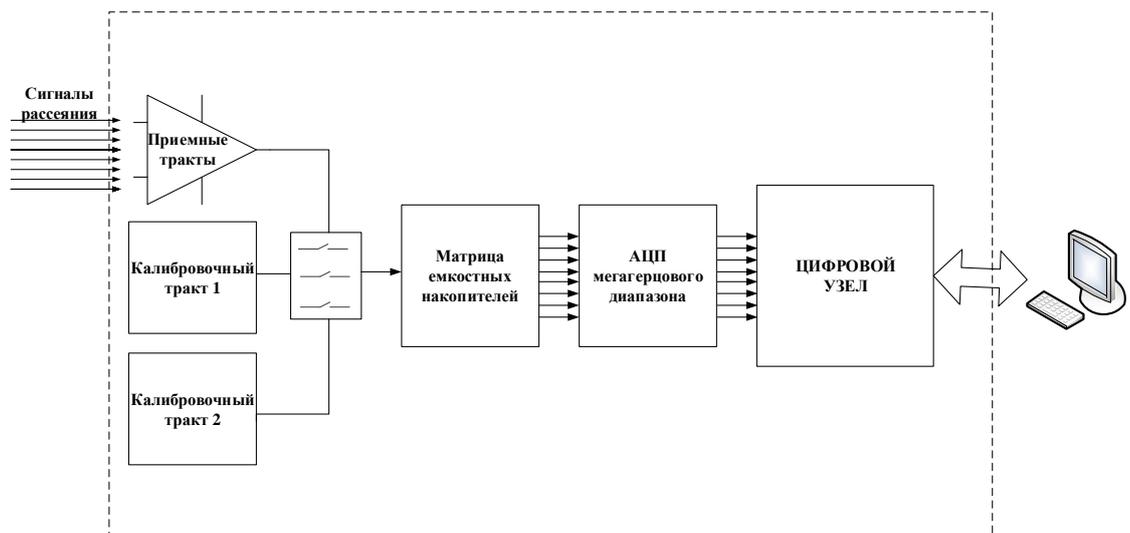


Рисунок 3.6. Базовая структурная схема регистратора на основе матриц емкостных накопителей.

### 3.2.1. Аналоговый тракт регистратора

Ключевым элементом регистратора является кристалл DRS4 разработки PSI (Paul Sherrer Institute, Швейцария). Упрощенная функциональная схема этого кристалла приведена на рисунке 3.7 [89, 90]. В его состав входят следующие элементы:

- Девять линеек емкостных накопителей, содержащих по 1024 конденсатора, включенных параллельно по отношению к входному сигналу (Канал 0-8);
- Узел управления режимом фиксации текущих амплитудных значений сигнала в емкостные накопители, построенный на основе генератора с задержанной обратной связью и контура ФАПЧ;

- Узел управления процессом считывания амплитудных значений сигналов с емкостных накопителей (мультиплексор, сдвиговый регистр).

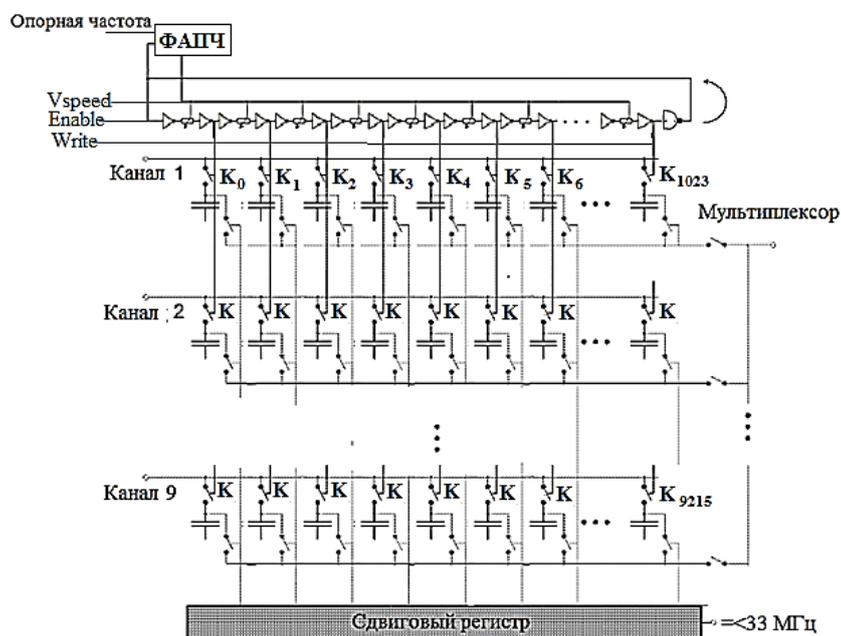


Рисунок 3.7. Функциональная схема кристалла DRS4.

Входные сигналы поступают одновременно на все девять линеек емкостных накопителей через ключи. Заряд, накапливаемый на емкостях, пропорционален мгновенным уровням напряжения на входной шине. Управление процессом фиксации текущих амплитудных значений сигналов осуществляется с помощью генератора с задержанной обратной связью и контура ФАПЧ, на вход которого поступает внешний синхросигнал. Генератор представляет собой цепочку из 1024 инверторных пар с включенными между ними переменными сопротивлениями. На рисунке 3.8 показана упрощенная схема звеньев генератора. Сигнал *Vspeed* управляет величиной переменных сопротивлений. Каждое из них образует с паразитной входной емкостью последующего инвертора RC-фильтр, что позволяет сформировать переменную задержку. Сигнал *Enable* управляет волной нулей и единиц, которая проходит по цепочке инверторных пар и формирует сигнал управления ключами  $K_0 - K_{9215}$  (Рисунок 3.7) всех линеек емкостных накопителей. Линейка инверторных пар замыкается в кольцо, по которому

волна бежит до тех пор, пока она не будет остановлена низким уровнем сигнала *Enable* или, пока не дойдет до 1023 пары в случае, если выбран другой режим работы. Высокий уровень сигнала *Write* разрешает прохождение сигналов управления входными ключами  $K_0 - K_{9215}$  конденсаторных ячеек. После снятия сигнала *Write* на линейках емкостных накопителей фиксируется форма входных сигналов.

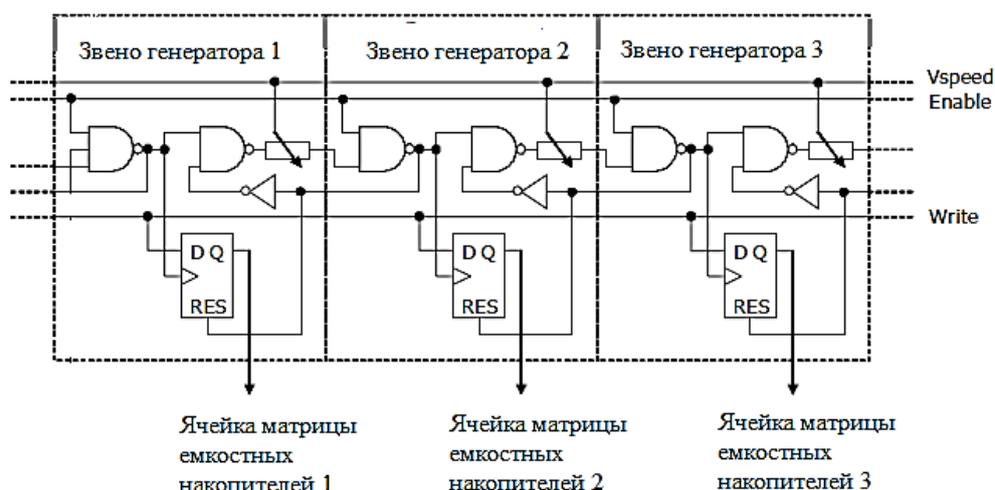


Рисунок 3.8. Упрощенная схема трех звеньев генератора с задержанной обратной связью.

Суммарная задержка линейки инверторных пар задает общую длительность интервала регистрации данных. Она соответствует длительности полупериода опорного синхросигнала, поступающего на контур ФАПЧ (Рисунок 3.9). Эквивалентная частота дискретизации линейки емкостных накопителей определяется, как:

$$f_{\text{дискрет}} = 2 \times F_{\text{опорная}} \times n_{\text{пар}}, \quad (3.1)$$

где  $n_{\text{пар}}$  – количество инверторных пар;  $F_{\text{опорная}}$  – частота опорного синхросигнала. Её диапазон изменения для кристалла DRS4 составляет 0.7 - 5 ГГц.

Каждый емкостной накопитель состоит из конденсатора  $\sim 0.15$  пФ, подключенного к линиям передач входных сигналов в дифференциальной форме (IN+ и IN-) через транзисторные ключи K1 и K2 (Рисунок 3.10). Передача зафиксированного конденсатором текущего значения входного

сигнала на узел оцифровки осуществляется с помощью ключей К3 и К4. Буферный каскад емкостного накопителя построен на основе истокового повторителя. Разброс напряжений затвор-исток на выходе транзисторов приводит к появлению разброса напряжений сдвига нуля сигналов емкостных накопителей. Помимо этого, различие в крутизне транзисторов, а значит и разная величина выходных сопротивлений, приводит к разбросу их коэффициентов передачи. Исключить влияние указанных факторов можно после оцифровки сигналов с помощью проведения соответствующих калибровочных процедур. Реализуются они следующим образом.

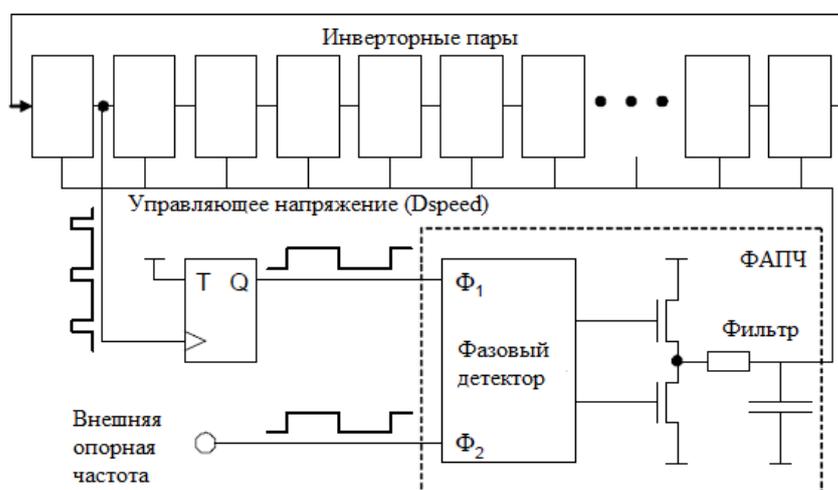


Рисунок 3.9. Упрощенная схема работы линии задержки с ФАПЧ.

В процессе измерений напряжений сдвига нуля емкостных накопителей на входы образованных ими линеек подается сигнал с нулевым уровнем. Он фиксируется, считывается и оцифровывается. Отклонение выходного сигнала каждого емкостного накопителя от нуля фиксируется в таблице корректирующих констант.

При калибровке коэффициентов передачи емкостных накопителей, они последовательно фиксируют сигналы двух уровней, – близкого к максимальной и минимальной амплитуде входного сигнала. Уровни этих сигналов фиксируются, считываются и оцифровываются. После чего вычисляется разность этих сигналов. Она нормируется на максимальный

перепад сигнала ( $max - min$ ) и заносится во вторую таблицу калибровочных коэффициентов.

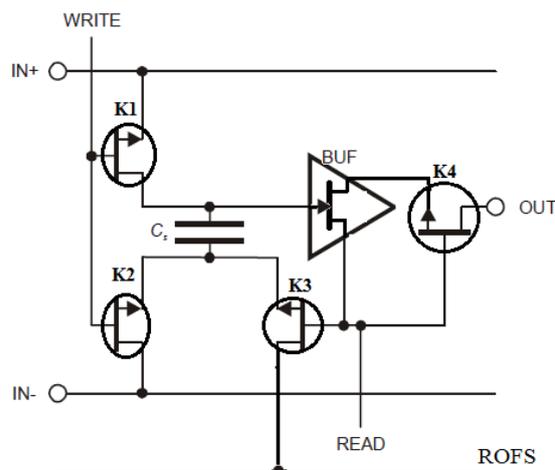


Рисунок 3.10. Упрощенная схема одного емкостного накопителя.

В последующем, при проведении реальных измерений, из отсчета, соответствующего напряжению на конкретном конденсаторе, вычитается первая корректирующая константа. А затем отклонение сигнала от нулевой линии (середины шкалы матрицы емкостных накопителей) умножается на корректирующий коэффициент из второй таблицы. С учетом того, что напряжение сдвига нуля и коэффициенты передачи буферных повторителей температурно зависимы, описанные процедуры калибровки необходимо выполнять периодически.

Временные задержки каждой инверторной пары в генераторе с задержанной обратной связью существенно отличаются друг от друга (Рисунок 3.8). При этом сумма всех задержек соответствует величине общей длительности интервала регистрации, равной полупериоду опорного синхросигнала. Как следствие, при использовании временной шкалы с равномерным шагом, равным периоду эквивалентной частоты дискретизации, на осциллограммах, отображающих результаты измерений, проявляются себя, так называемые, “динамические” ошибки (Рисунок 3.11 а). Они исчезают, если при отображении данных используется нелинейная временная шкала, строящаяся с учетом реальных задержек распространения сигналов во всех

инверторных парах (Рисунок 3.11 б). Для этого, в регистраторе необходимо сформировать двумерный массив результатов измерений в координатах амплитуда-время.

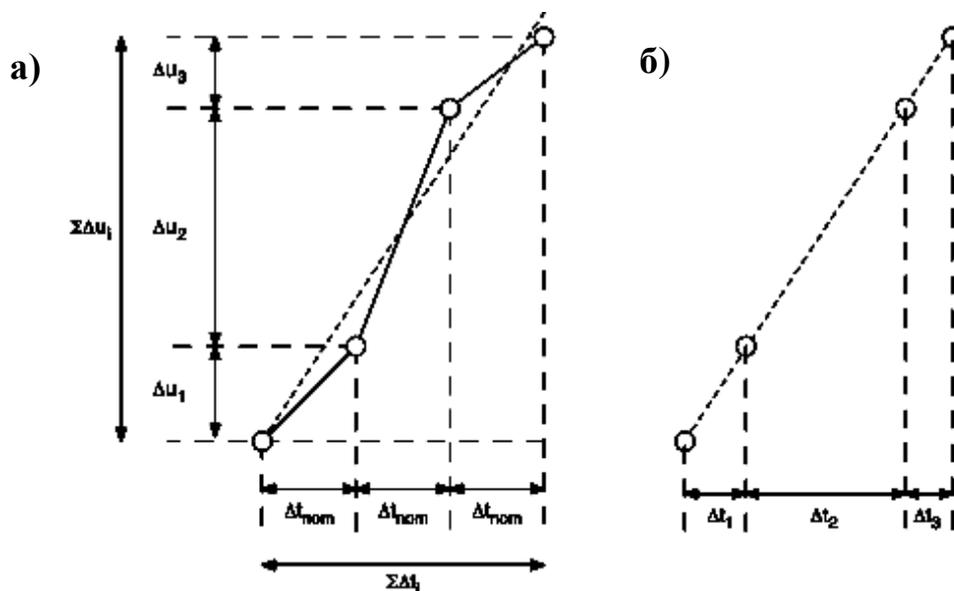


Рисунок 3.11. Представление результатов измерений с помощью линейной (а) и нелинейной (б) временных шкал.

Реальная временная шкала линейки накопителей формируется с помощью динамической калибровки, направленной на измерение среднестатистических значений задержки распространения сигналов в каждой инверторной паре. Для этого на входы линеек емкостных накопителей кристалла DRS4 подается сигнал синусоидальной формы с частотой  $\sim 120$  МГц. Отсчеты которые используются для проведения динамической калибровки, находятся в диапазоне изменения амплитуды тестового сигнала от  $-1/2$  до  $+1/2$ , в котором функция  $\sin(x)$  линейна с приемлемой точностью. Задержки инверторных пар  $t_0 - t_{1023}$  вычисляются как:

$$\begin{aligned} t_0 &= 0; t_1 = k \times \Delta y_0; \\ t_2 &= k \times \Delta y_1 + k \times \Delta y_0; \\ t_{1023} &= k \times \sum_{n=0}^{1023} \Delta y_{n-1}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\Delta y_n$  – приращение амплитуды между двумя соседними отсчетами,  $k$  – коэффициент, определяемый как:

$$k = \frac{\sum \Delta y_n}{T}, \quad (3.3)$$

где  $T$  - полная длительность времени регистрации.

Процедура суммирования задержек инверторных пар, используемых для формирования временной шкалы, приводит к появлению статистических ошибок. Уменьшить влияние этого эффекта можно при помощи дополнительной корректировки рассчитанных временных координат. Для этого рассчитывается поправочный коэффициент  $\delta$ , который равен отношению количества точек, зарегистрированных в одном периоде тестового синусоидального сигнала к количеству точек, которые должны содержаться в этом сигнале исходя из его частоты дискретизации. Этот коэффициент домножается на полученные ранее временные координаты.

После чего из полученного массива двумерных данных строится график в координатах амплитуда-время.

Функциональная схема построения приемных трактов сигналов ГР приведена на рисунке 3.12. ВЧ компоненты сигналов детекторов  $Dif\_sig1_{\pm} - Dif\_sig8_{\pm}$  поступают по дифференциальным линиям связи на кристалл ADG936, где они коммутируются с сигналами динамической калибровки  $Sin1_{\pm} - Sin8_{\pm}$ . Кристалл ADG936 включает в себя два широкополосных аналоговых ключа. Управление кристаллом ADG936 осуществляется сигналом  $CAL\_TIME$ , который формируется цифровым узлом регистратора. Сигналы с выхода ключей поступают на положительные входы дифференциальных усилителей  $V1-V4$ , а на их инверсные входы поступают сигналы фиксированного уровня  $ЦАП1_{\pm} - ЦАП8_{\pm}$ . Сигналы  $ЦАП1_{\pm} - ЦАП8_{\pm}$  во время регистрации сигналов рассеяния задают их нулевой уровень, а во время проведения амплитудной калибровки и калибровки сдвига нуля задают максимальный, минимальный и средний уровень амплитудной шкалы кристалла DRS4. При нулевом уровне сигнала  $CAL\_TIME$ , на входы дифференциальных усилителей  $V1-V4$  проходят сигналы  $Sin1_{\pm} - Sin8_{\pm}$  и  $ЦАП1_{\pm} - ЦАП8_{\pm}$ . При выполнении процедуры динамической калибровки,

$Sin1\pm - Sin8\pm$  – сигналы синусоидальной формы,  $\text{ЦАП}1 - \text{ЦАП}8\pm$  – сигналы, соответствующие середине амплитудной шкалы DRS4. При проведении процедур амплитудной калибровки и калибровки сдвига нуля, на входы  $Sin1\pm - Sin8\pm$  подаются сигналы с уровнем нуля, а на входы  $\text{ЦАП}1 - \text{ЦАП}8\pm$  сигналы равные середине, минимуму и максимуму амплитудной шкалы DRS4.

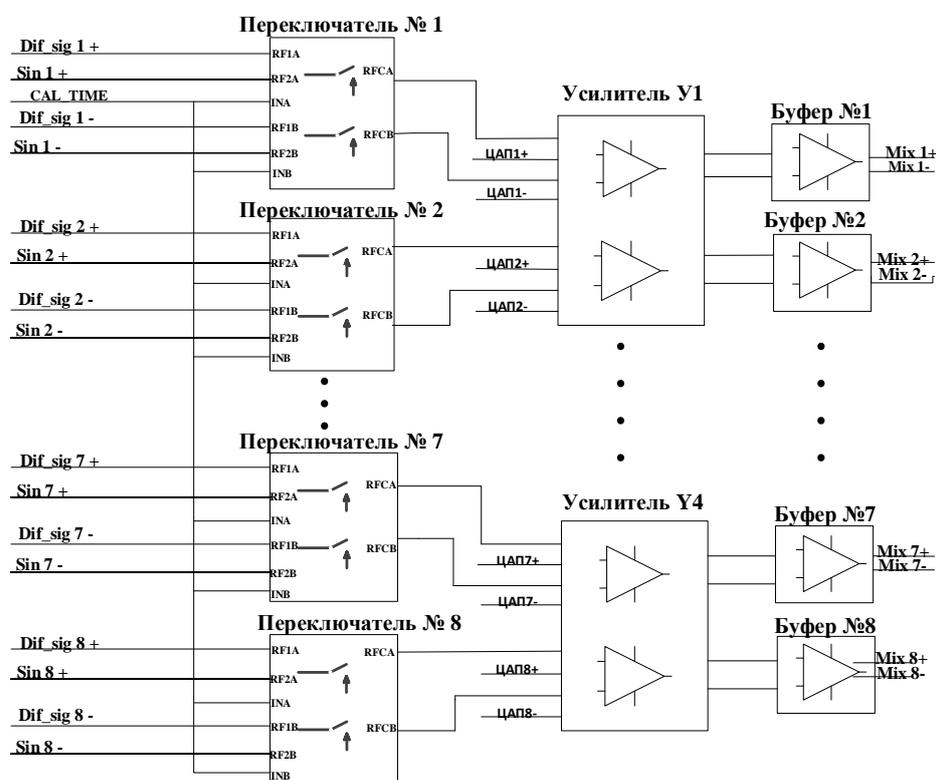


Рисунок 3.12. Структурная схема входного приемного узла регистратора.

При подаче сигнала единичного уровня на  $CAL\_TIME$  на входы усилителей  $У1-У4$  поступают ВЧ компоненты сигналов с детекторов  $Dif\_sig1\pm - Dif\_sig8\pm$ . При этом на входы  $\text{ЦАП}1\pm - \text{ЦАП}8\pm$  подаются сигналы близкие к минимальному уровню амплитудной шкалы DRS4. Буферные усилители LTC6416, ограничивают размах выходного сигнала от 0.25 В до 2.23 В.

Сигналы постоянного уровня ( $\text{ЦАП}1 - \text{ЦАП}8\pm$ ) формируются восьмиканальным ЦАП – LTC2656, со встроенным источником опорного напряжения и интерфейсом SPI (Рисунок 3.13). Указанный интерфейс используется для загрузки в ЦАП опорных констант, в соответствии со

значением которых на его выходах формируется напряжение, равное середине, минимуму или максимуму амплитудной шкалы DRS4. С помощью буферных усилителей AD4940-2, источника опорного напряжения  $Ref$  и резистивных цепей производится масштабирование и смещение уровней сигналов, формируемых ЦАП. С выходов этих усилителей сигналы постоянного уровня поступают на дифференциальные усилители  $U1-U4$  (Рисунок 3.12).

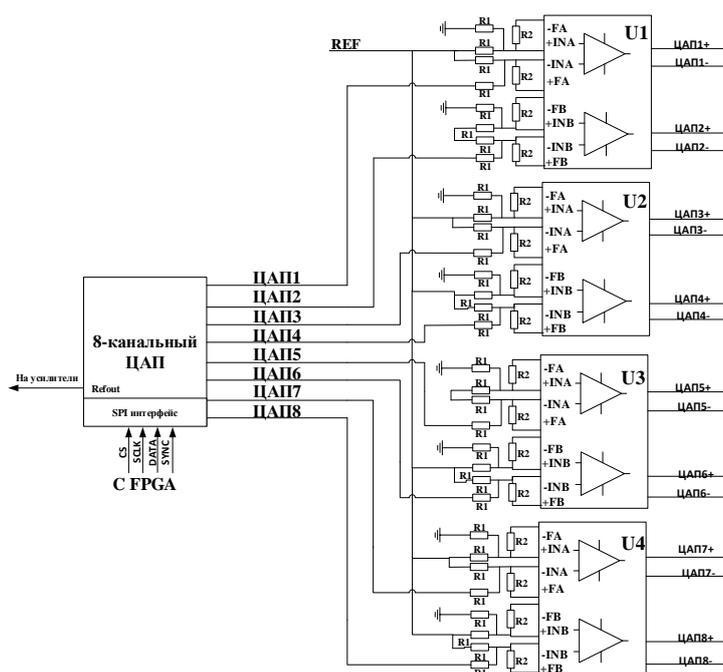


Рисунок 3.13. Формирование сигналов постоянного уровня для проведения калибровочных процедур.

Для проведения динамической калибровки используется синусоидальный сигнал с частотой  $\sim 120$  МГц. Такая частота калибровочного сигнала для диагностики ТР избыточна. При ее уменьшении в несколько раз, например, до  $\sim 25$  МГц, погрешность формирования временной шкалы не превысит допустимого значения  $\sim 5$  псек. Уменьшение частоты калибровочного сигнала позволяет сузить полосу усилительного тракта и пропорционально улучшить соотношение сигнал/шум. При разработке регистратора на основе матриц емкостных накопителей, учитывался баланс требований для обеспечения максимальной области применения прибора в различных широкополосных диагностиках, помимо томсоновского рассеяния.

Источником сигнала динамической калибровки является цифровой узел, формирующий опорный синхросигнал частотой 120 МГц в уровнях LVDS. Далее этот синхросигнал поступает на формирователь, включающий в себя многокаскадный LC-фильтр, преобразующий его форму в синусоидальную, и на двухкаскадный размножитель синусоидальных сигналов, построенный на основе усилителей AD4950-2 (Рисунок 3.14).

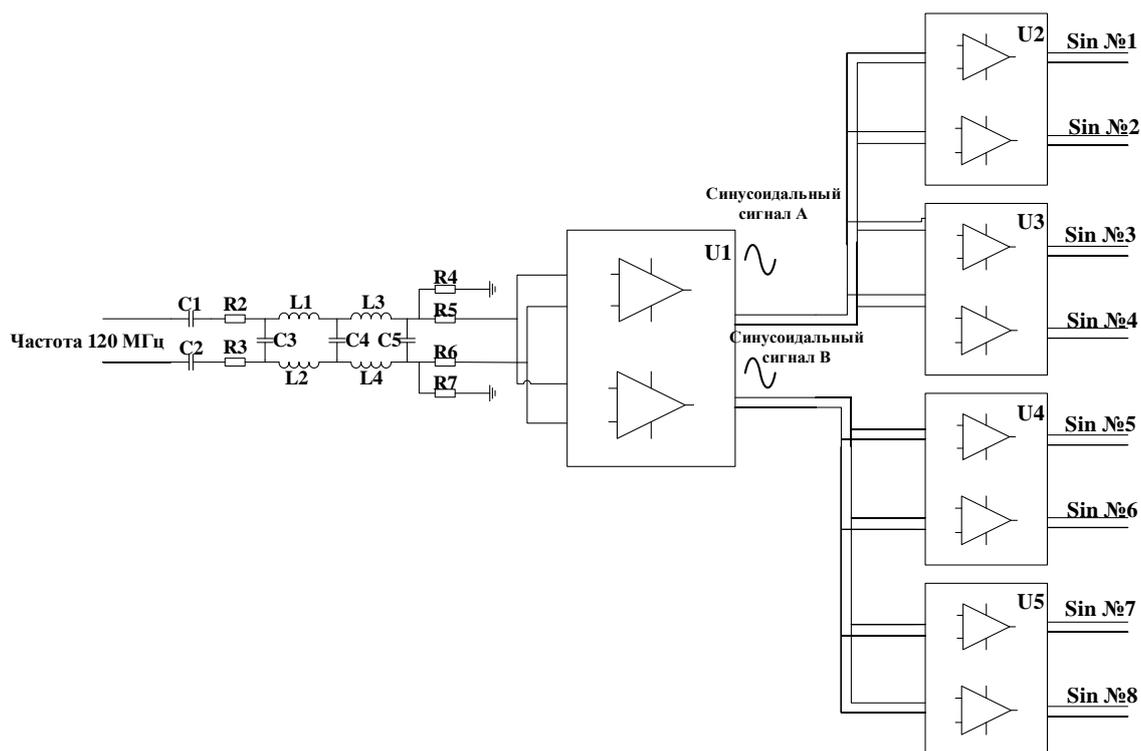


Рисунок 3.14. Структурная схема формирования опорных синхросигналов.

Для оцифровки выходных значений сигналов с линеек емкостных накопителей используется 14-разрядный восьмиканальный АЦП ADS5294, работающий с частотой дискретизации 30 МГц. Результаты оцифровки напряжений на емкостных накопителях в последовательном виде в уровнях LVDS передаются цифровому узлу. Функции элемента согласования диапазона изменения сигналов на выходах линеек емкостных накопителей с шкалой преобразования АЦП по амплитуде выполняют усилители AD4940-2 (Рисунок 3.15).

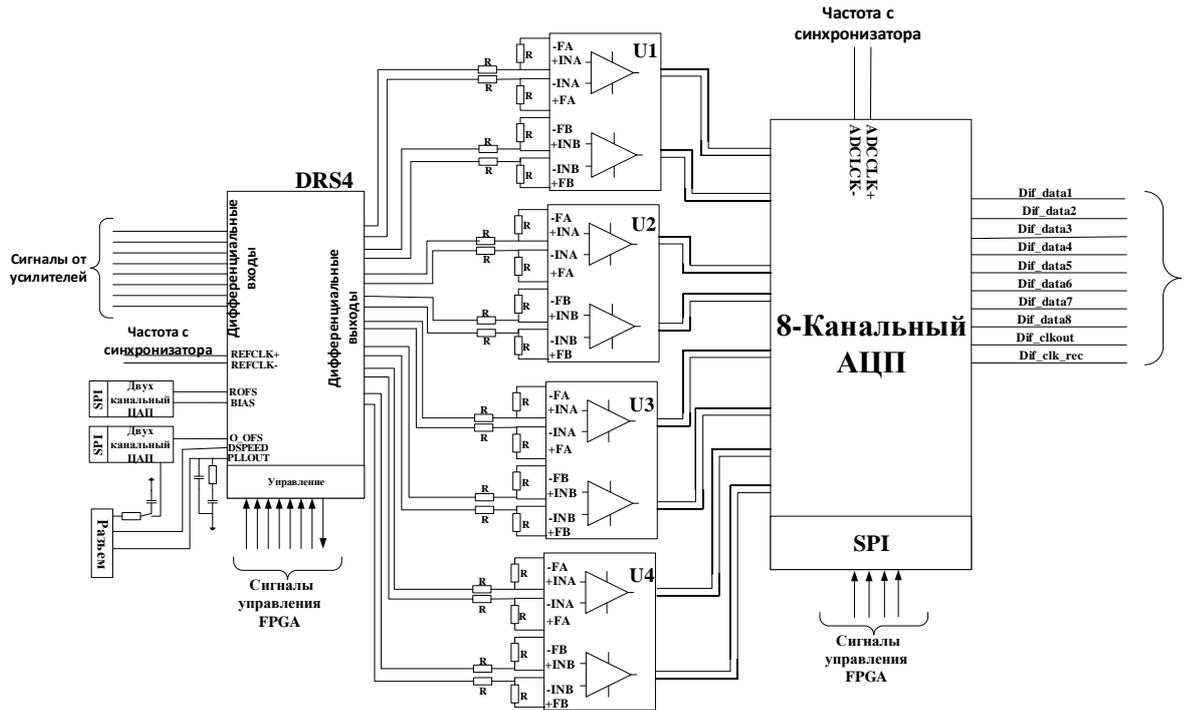


Рисунок 3.15. Структурная схема построения узла DRS4-АЦП.

### 3.2.2. Цифровой тракт регистратора

В состав цифрового узла регистратора входят следующие базовые элементы:

- Узел формирования опорных синхросигналов для всех элементов как аналогового, так и цифрового тракта;
- ПЛИС со встроенным процессором, обеспечивающая прием данных от АЦП, их обработку и дальнейшую передачу серверу диагностики по каналу Ethernet 10/100/1000;
- Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), поддерживающее работу процессорного узла ПЛИС. Данное ОЗУ также используется для накопления отсчетов от АЦП;
- Твердотельный накопитель (Secure Digital Memory Card), содержащий дистрибутив операционной системы Linux и специализированный код, задающий логику работы ПЛИС и процессора.

Одним из основных элементов регистратора является блок формирования опорных синхросигналов. Он построен на основе многоканального генератора LMK04906. Его первый выход используется для формирования синусоидального сигнала динамической калибровки в уровнях LVDS с частотой 120 МГц.

Второй выход кристалла LMK04906 служит источником опорного синхросигнала для генератора с задержанной обратной связью и контуром ФАПЧ кристалла DRS4. Частота этого синхросигнала составляет 2.4 МГц. При такой частоте и количестве инверторных пар 1024, средняя задержка одной из них имеет величину  $\sim 203.45$  пс, что соответствует эквивалентной частоте дискретизации входных сигналов линейками емкостных накопителей  $\sim 4.91$  ГГц.

Третий и четвертый выходы кристалла LMK04906 отвечают за формирование синхросигналов для АЦП, оцифровывающего выходные сигналы с линеек DRS4 и для цифрового узла, построенного на элементах ПЛИС. Эти синхросигналы сфазированы между собой. С привязкой к синхросигналу, поступающему на ПЛИС, формируются все сигналы управления (*Srclk*, *Srin*, *Rsrload*, *Dwrite*, *Denable*) работой матрицы емкостных накопителей DRS4. Выходной мультиплексор кристалла DRS4 подключает каждую линейку емкостных накопителей к своему выходу  $OUT0_{\pm}-OUT7_{\pm}$  и работает под управлением синхросигнала *Srclk*. Сигналы на этих выходах появляются со сдвигом по времени относительно положительного фронта *Srclk* (Рисунок 3.16). Этот сдвиг компенсируется с помощью узла задержки выходных синхросигналов, встроенного в канал формирования синхроимпульса АЦП, имеющего дискретность перестройки  $\sim 208.3$  пс. Частота синхросигналов, поступающих на ПЛИС и АЦП составляет 30 МГц.

Пятый канал LMK04906 формирует синхросигнал для вспомогательного АЦП, обеспечивающего регистрацию НЧ компоненты сигнала рассеяния с частотой дискретизации 25 МГц. Этот узел будет рассмотрен позже.

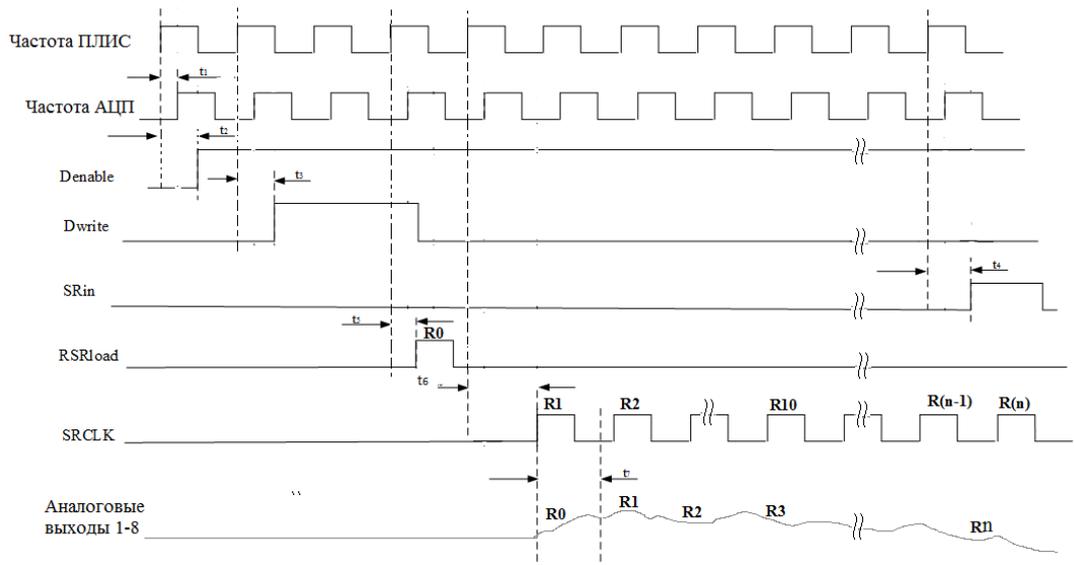


Рисунок 3.16. Временная диаграмма формирования управляющих сигналов для кристалла DRS4.

Основой цифрового узла является ПЛИС производства Altera серии Cyclone V со встроенным процессорным узлом [91]. Эта ПЛИС (Рисунок 3.17):

1. Обеспечивает управление генератором с ФАПЧ, ЦАП, АЦП и матрицей емкостных накопителей DRS4 посредством загрузки необходимой последовательности управляющих констант в их регистры контроля и управления;
2. Формирует сигнал *CAL\_TIME*, отвечающий за выбор режима работы регистратора (калибровка или регистрация рабочего сигнала);
3. Обеспечивает прием данных от основного и вспомогательного АЦП, предназначенного для регистрации НЧ компоненты сигнала рассеяния;
4. Выполняет амплитудную калибровку, калибровку сдвига нуля и временную калибровку и формирует таблицу калибровочных констант, которая используется узлом обработки данных при фиксации сигнала рассеяния;
5. Накапливает во внешнем запоминающем устройстве отсчёты, формируемые АЦП;
6. Передает результаты измерений по высокоскоростному интерфейсу связи Ethernet 10/100/1000 серверу диагностики.

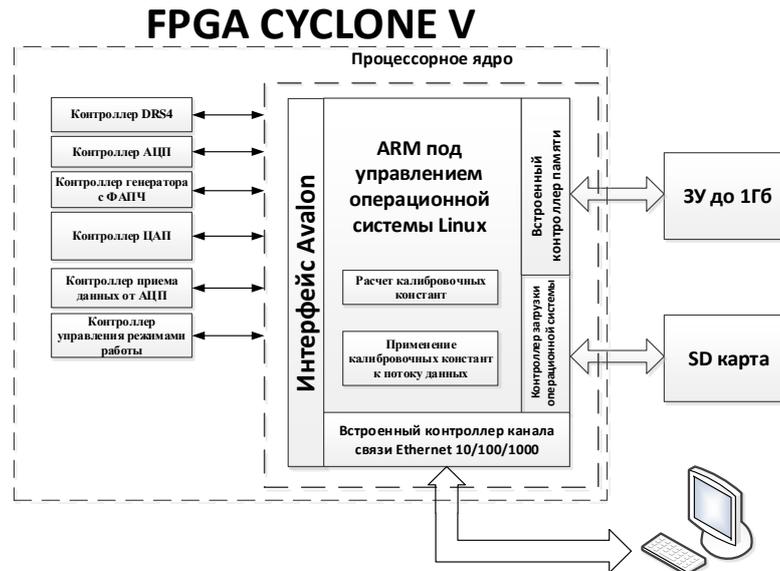


Рисунок 3.17 Структурная схема ПЛИС Cyclone V.

ПЛИС Cyclone V, помимо набора базовых логических элементов, интегрирует в своем составе двухъядерный процессорный модуль ARM, работающий под управлением операционной системы Linux, встроенный контроллер внешней памяти LPDDR2/DDR2/DDR3, интерфейсный узел с технологией AXI/Avalon. Последний поддерживает взаимодействие процессорных ядер с контроллерами периферии, построенными на логических элементах ПЛИС, а также с интегрированным в ее состав контроллером канала связи Ethernet – 10/100/1000, предназначенным для сопряжения регистратора с сервером диагностики. Все операции, выполняемые Cyclone V можно разделить на два типа:

1. Операции, выполняемые узлами, реализованными на логических элементах ПЛИС;
2. Операции, выполняемые встроенным процессорным модулем.

На элементах ПЛИС реализованы контроллеры устройств, обеспечивающие выполнение процедур: приема данных от АЦП (основного и дополнительного), управление этими АЦП, управление генератором с петлей ФАПЧ и матрицей емкостных накопителей DRS4, управление ЦАП, задающими уровни сигналов, необходимые для проведения калибровок и для

обеспечения корректной работы входных и выходных трактов DRS4, управление режимами работы аналогового тракта.

Процессорный модуль отвечает за формирование таблиц калибровочных констант и таблицы, содержащей временные координаты, вычисленные в результате проведения динамической калибровки, а также передачу результатов измерений по каналу связи Ethernet 10/100/1000 консольному компьютеру.

После включения питания в ПЛИС и процессорный модуль загружаются файлы, описывающие логику работы регистратора, а также операционная система Linux с набором драйверов. Процедура загрузки ПЛИС подробно описана в [91]. Перегрузка файлов прошивки может быть выполнена по каналу связи Ethernet 10/100/1000. Реализация указанной процедуры позволяет изменять алгоритмы работы регистратора, менять количество каналов регистрации, увеличивать объем используемой памяти, изменять частоту дискретизации измерительных трактов. В основном эта процедура используется на этапе отладки и проверки регистратора и его элементов.

После загрузки файлов прошивки выполняется процедура инициализации регистратора. Она включает в себя следующие операции:

1. Инициализации генератора с петлей ФАПЧ. Суть этой операции заключается в записи в регистры генератора LMK04906 управляющих констант, обеспечивающих генерацию следующих сигналов:
  - 1.1. опорного синхросигнала для генератора с задержанной обратной связью и контуром ФАПЧ кристалла DRS4;
  - 1.2. синхросигналов для основного и дополнительного АЦП, определяющих их частоты дискретизации;
  - 1.3. синхросигнала для ПЛИС, обеспечивающего формирование управляющих сигналов для кристалла DRS4;
2. Инициализации ЦАП. Она выполняется при загрузке в регистры ЦАП управляющих констант, позволяющих сформировать на его выходах сигналы постоянного уровня (OFS и ROFS), необходимые для

корректной работы DRS4. ROFS – напряжение смещения выходных каскадов матрицы емкостных накопителей (Рисунок 3.10), OFS – напряжение сдвига нуля для этих каскадов;

3. Инициализации матрицы емкостных накопителей DRS4. Операция выполняется путем загрузки регистров управления кристалла DRS4, задающих режим работы инверторных пар его линии задержки (разовый/циклический) и режим работы внутреннего генератора (PLL) с петлей ФАПЧ, а также определяющих назначение вспомогательного вывода (WSROUT) кристалла DRS4, количество емкостных накопителей в каждом тракте регистрации и количество этих трактов.

На следующем этапе выполняются процедуры калибровки измерительных трактов: калибровки нуля, амплитудной и динамической калибровки. При их выполнении источником сигналов являются входы *Sin 1-8* (Рисунок 3.12), которые в случае проведения калибровки нуля и амплитудной калибровки имеют постоянный нулевой уровень. В рамках выполнения первой из них:

1. Формируется сигнал CAL\_TIME, выбирающий в качестве источника сигналы *Sin 1-8*;
2. Загружаются регистры управления восьмиканального ЦАП, обеспечивающие формирование сигналов с уровнем, соответствующем среднему уровню амплитудной шкалы всех измерительных трактов. Этот ЦАП задает нулевой уровень сигналов и позволяет работать с разнополярными сигналами во всем динамическом диапазоне;
3. Формируются сигналы управления для кристалла DRS4 (*Enable*, *Write*), инициирующие запись текущих входных сигналов в линейки емкостных накопителей (§3.2.1);
4. Формируются сигналы управления (*SRCLK*, *SRIN*, *RSRLOAD*), необходимые для считывания информации с линеек емкостных

накопителей и считывается информация с регистра, содержащего информацию о начальном номере емкостного накопителя;

5. ПЛИС принимаются и записываются во внешнюю память отсчеты АЦП, отражающие текущие значения амплитуд входных сигналов каждой ячейки емкостных накопителей;
6. Вычисляются и фиксируются в промежуточной таблице корректирующих констант отклонения амплитуды выходного сигнала от нуля для каждой ячейки матрицы емкостных накопителей измерительных трактов;
7. Путем повторения процедур, описанных в пунктах 3-6, набирается необходимый объем статистики. Количество повторений задается программно, исходя из условия уменьшения дисперсии относительно заданного уровня. По результатам измерений рассчитываются средние значения отклонений выходного сигнала от нуля для каждой емкостной ячейки во всех измерительных трактах. Они фиксируются в таблице корректирующих констант «zero».

Процедура амплитудной калибровки аналогична описанной выше со следующим отличием. Восьмиканальным ЦАП вначале формируются сигналы, с уровнем близким к минимальному уровню амплитудной шкалы кристалла DRS4, а затем, - близким к максимальному. По результатам измерений вычисляется разность этих отсчетов для каждой ячейки матрицы емкостных накопителей и нормируется на максимальный перепад сигнала ( $max - min$ ). Результат заносится в таблицу корректирующих констант «scale».

При выполнении динамической калибровки изначально производится процедура загрузки в регистры генератора LMK04906 управляющих констант, которые позволяют сформировать калибровочный сигнал прямоугольной формы с частотой 120 МГц. Далее этот сигнал преобразуется в синусоидальный сглаживающим LC-фильтром второго порядка. На следующем этапе выполняется последовательность действий, описанная в

пунктах 1-5: выбор в качестве источника сигнала с фильтра, загрузка в ЦАП управляющих констант, переводящих положение нуля в середину шкалы, запись и оцифровка калибровочного сигнала. Путем многократного повторения этих процедур, производится набор статистики. На заключительном этапе вычисляются задержки для всех инверторных пар кристалла DRS4, формирующих временную шкалу измерительных трактов (Подробный расчет рассмотрен в §3.2.1). Результаты фиксируются в третьей таблице «time».

После завершения всех калибровочных процедур регистратор переводится в состояние, в котором разрешена работа петли ФАПЧ матрицы емкостных накопителей (Enable – «1»), а запись текущих значений входного сигнала в емкостные накопители запрещена (Write – «0»).

В регистраторе реализованы: разовый режим фиксации данных с привязкой к внешнему синхросигналу и циклический режим фиксации данных с привязкой к внешнему синхросигналу. Первый используется в одноимпульсном режиме работы лазера диагностики ТР, второй, в многоимпульсном режиме его работы.

В разовом режиме фиксации данных (Рисунок 3.18) регистрация текущих амплитудных значений входных сигналов в емкостные накопители разрешается либо программно, либо по внешнему сигналу разрешения запуска *Start*, переводом сигнала *Write* в единичное состояние. Запись текущих амплитудных значений входных сигналов в линейки емкостных накопителей по этому сигналу начинается с произвольной ячейки и продолжается до тех пор, пока сигнал *Write* не будет сброшен в ноль. Происходит это при поступлении на вход регистратора внешнего синхроимпульса *Stop*, привязанного к сигналу рассеяния. После его появления, с программно-регулируемой задержкой сигнал *Write* переводится в ноль, что останавливает процесс записи в линейки емкостных накопителей. Задержка выбирается такой, чтобы сигнал рассеяния попал в окно регистрации. Она задается

оператором с дискретностью 6.67 нсек и может иметь значение, лежащее в диапазоне изменения от 6.67 нсек до 1.7 мкс.



Рисунок 3.18. Формирование сигнала записи в режиме с привязкой к внешнему запуску.

Процедура считывания текущих амплитудных значений из линеек емкостных накопителей кристалла DRS4 в рассматриваемом режиме может осуществляться двумя способами. Первый основан на считывании полного массива данных из ячеек емкостных накопителей. В нем требуется проведения дополнительной процедуры инициализации узла вывода информации, направленной на восстановление начального адреса первого конденсатора линейки емкостных накопителей (Рисунок 3.19). После инициализации этого узла информация со всех линеек емкостных накопителей может быть считана одновременно. Процедура инициализации занимает по времени столько же, сколько процедура считывания из линеек емкостных накопителей. В связи с этим полная длительность цикла считывания накопленной информации удваивается.

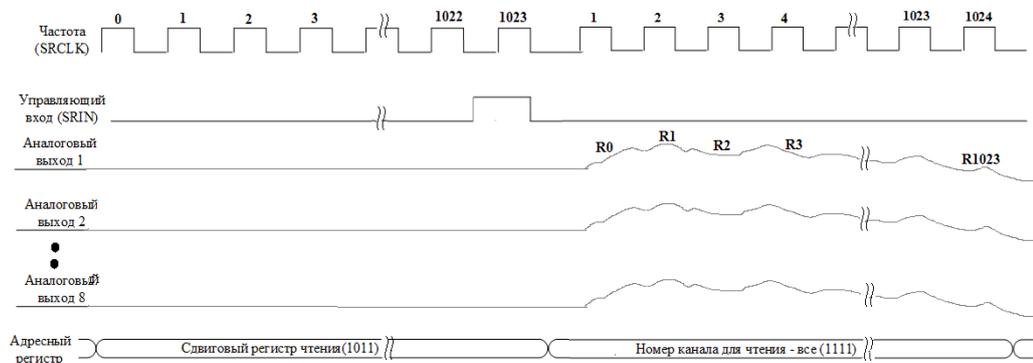


Рисунок 3.19. Считывание полного массива данных.

Второй основан на считывании «фиксированной» области массива данных из ячеек емкостных накопителей (Рисунок 3.20). В его рамках опрос линеек емкостных накопителей можно начинать с номера конденсатора, следующего за тем, на котором была завершена процедура фиксации текущих амплитудных значений входного сигнала. Этот номер фиксируется в соответствующем регистре кристалла DRS4 в момент перехода сигнал *Write* в ноль. Содержимое данного регистра в последовательном виде выводится на дополнительный вывод (SROUT) кристалла DRS4 при считывании информации с первых десяти ячеек емкостных накопителей.

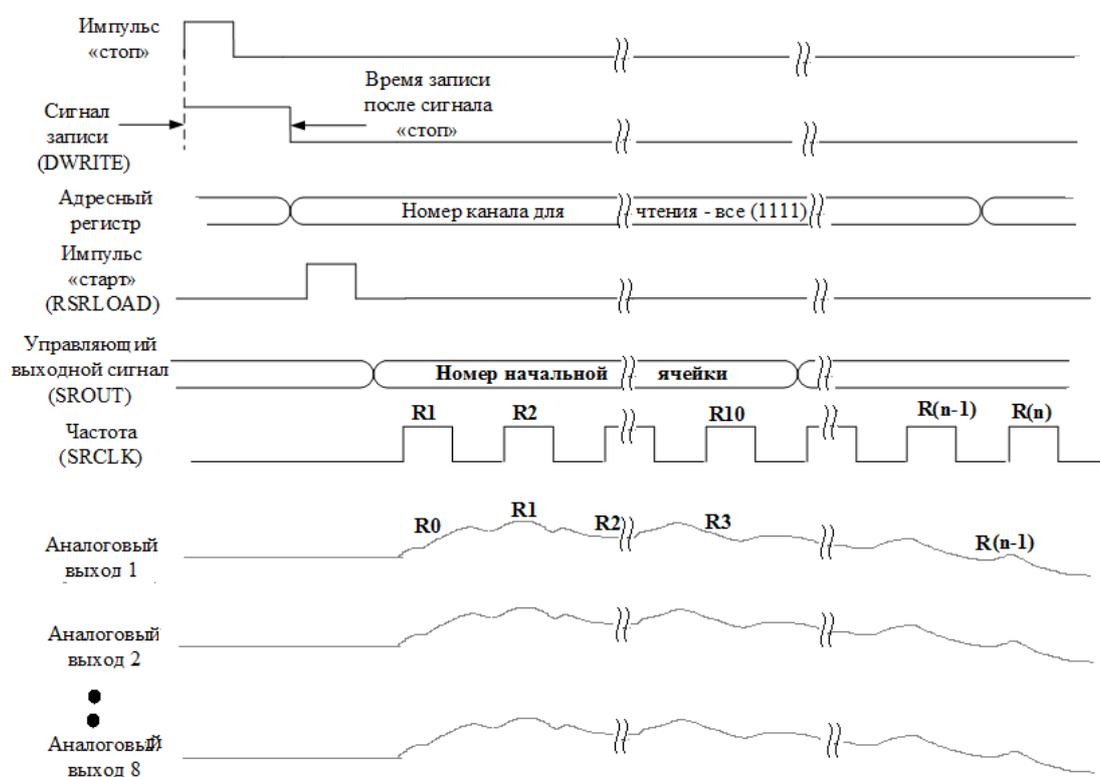


Рисунок 3.20. Считывание «фиксированной» области массива данных.

Несмотря на то, что для диагностики ТР на установке ГДЛ длительность цикла опроса не существенна (частота повторения импульсов зондирующего излучения составляет 10 Гц) режим «фиксированной» области чтения является предпочтительным, поскольку в будущем предполагается использование лазера, работающего с частотой до 40 кГц (режим работы лазера «pulse-burst»). Кроме того, в этом режиме возможно считывание

фрагмента сигнала, содержащегося в выделенном фрагменте каждой линейки емкостных накопителей (в меньшем объеме, чем полный), что позволяет уменьшить длительность цикла опроса еще в несколько раз (Рисунок 3.21). По этим причинам в регистраторе был реализован только способ, основанный на считывании «фиксированной» области массива данных.

В ПЛИС из отсчетов АЦП, формируемых в процессе опроса линеек емкостных накопителей, генерируется 14-разрядный поток данных по восьми каналам, следующий с частотой 30 МГц. Он поступает на вход

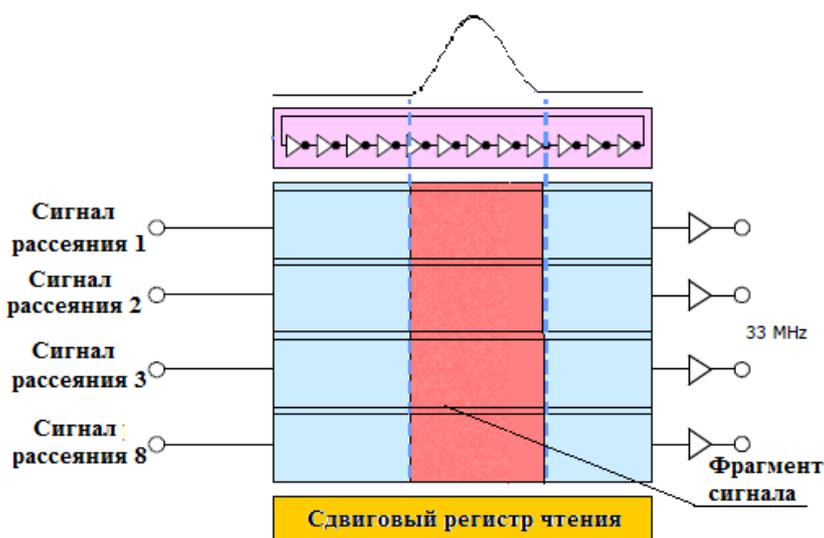


Рисунок 3.21. Считывание фрагмента сигнала в режиме «фиксированной» области чтения.

промежуточной двухпортовой памяти, которая позволяет согласовать скорость приема потока данных от АЦП (~30 МГц) со скоростью их перезаписи во внешнюю память (~125 МГц). Завершается процедура перезаписи данных формированием прерывания для процессора. Процессор считывает результаты измерений, корректирует их с помощью полученных ранее калибровочных таблиц, привязывает каждый отсчет к его истинной временной координате и пересылает результирующий массив данных по каналу связи Ethernet 10/100/1000 консольному компьютеру.

В циклическом режиме фиксации данных с привязкой к внешнему синхросигналу, после записи в емкостные накопители первого сигнала рассеяния, контроллер DRS4 ожидает подтверждения окончания процедуры перезаписи потока отсчетов АЦП во внешнее ЗУ (Рисунок 3.22). Во время ожидания подтверждения запрещены любые операции, способные нарушить процесс фиксации данных. После прихода сигнала, подтверждающего окончание процедуры перезаписи, контроллер переходит в режим ожидания сигналов разрешения запуска и импульсов *Stop*. Рабочий цикл регистратора повторяется до тех пор, пока не придет последний импульс *Stop*. Количество циклов регистрации задается оператором. В текущей версии регистратора максимальное число таких циклов не может превышать 1024.

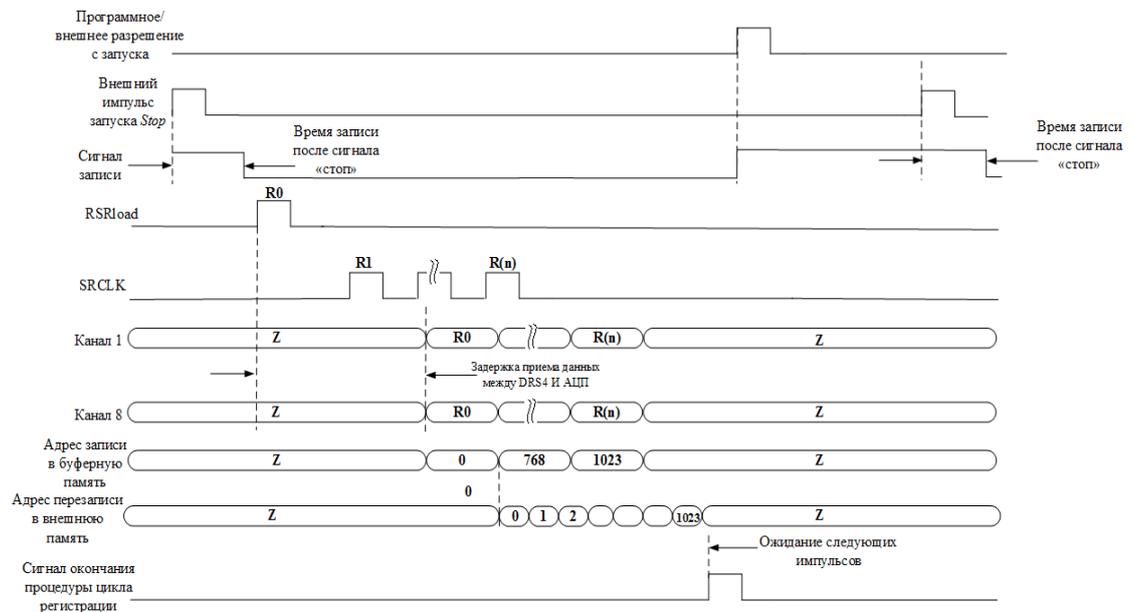


Рисунок 3.22. Циклический режим фиксации данных по внешнему запуску.

### 3.2.3. Дополнительные элементы регистратора

В качестве дополнительных элементов в регистратор включены:

- Приемники импульсов *Start* и *Stop*, обеспечивающие фиксацию данных в разовом и в циклическом режимах с привязкой к внешнему синхросигналу;

- Элементы управления высоковольтными источниками питания, формирующими напряжения смещения для детекторов (ЛФД) диагностики ТР;
- Вспомогательный модуль регистрации, используемый для фиксации текущих значений амплитуд НЧ-компонент сигналов рассеяния. Упрощенная схема построения этого модуля показана на рисунке 3.23. Данный модуль подключается к ПЛИС основной платы регистратора через разъем. В состав модуля входят следующие элементы:
  - Входные согласующие усилители с дифференциальным входом и выходом;
  - 14-разрядный восьмиканальный АЦП, работающий с частотой дискретизации 25 МГц;
  - Стабилизаторы, обеспечивающие необходимые напряжения питания для усилителей и АЦП;
  - Разъём, через который осуществляется сопряжение с основной платой регистратора.

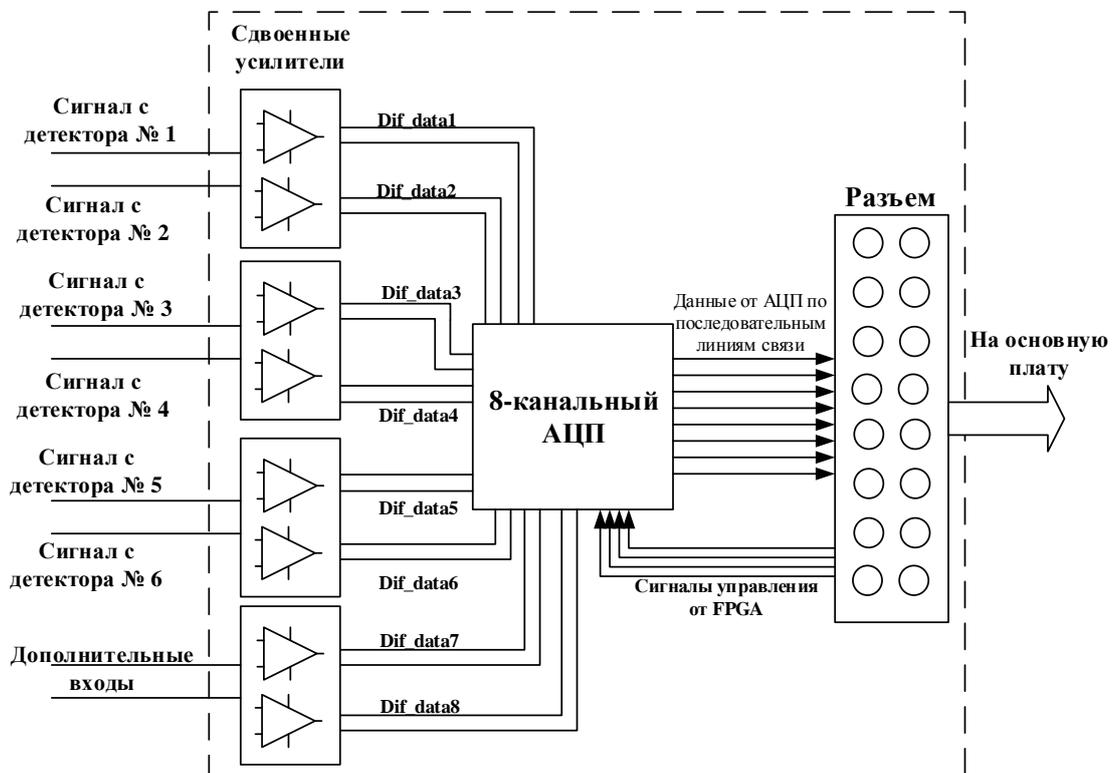


Рисунок 3.23. Структурная схема вспомогательного модуля регистрации.

### 3.3. Основные результаты Главы 3

1. Разработаны детекторы на основе лавинных фотодиодов и малошумящих трансимпедансных усилителей, имеющие рабочую полосу частот 0-50 МГц. Основной вклад в шумовые характеристики детекторов вносит шумовая компонента тока лавинного фотодиода  $i_{\text{лфд}}$ . Отношение сигнал/шум составляет  $SNR \approx 40$  Дб, что предопределяет соответствующие требования к цифровому разрешению системы регистрации.
2. На основе матрицы емкостных накопителей DRS4 разработаны восьмиканальные высокоскоростные регистраторы, обеспечивающие фиксацию сигналов рассеяния с эквивалентной частотой дискретизации до 5 ГГц. Полоса рабочих частот сигнальных трактов регистратора 0-120 МГц. Её верхняя граница соответствует частоте сигнала динамической калибровки.
3. Реализованы программно исполняемые алгоритмы, обеспечивающие выравнивание нулевой линии и уменьшение среднеквадратичного разброса. На рисунке 3.24 приведены осциллограммы сигнала одного из каналов до (а) и после (б) проведения калибровки напряжения сдвига нуля при нулевом сигнале на входе. В полосе пропускания регистратора соотношение сигнал/шум (SNR) составило  $\sim 57$  Дб, что соответствует 9.5 двоичным разрядов трактов аналого-цифрового преобразования (ENOB). С целью тестирования матрицы емкостных накопителей были построены шумовые распределения всех ячеек. Для некоторых из них (№18, №540 и №977) всех шести регистраторов, эти распределения приведены на рисунке 3.25. Набор статистики производился по 1000 измерений. Видно, что практически во всех ячейках распределение имеет форму гауссовой кривой с полушириной  $\sim 20-30$  отсчетов 14-разрядного АЦП, что соответствует  $\sim 9$  двоичным разрядам. Это значение совпадает с численной оценкой отношения сигнал/шум измерительных трактов. В некоторых ячейках (№18 ячейке, а также

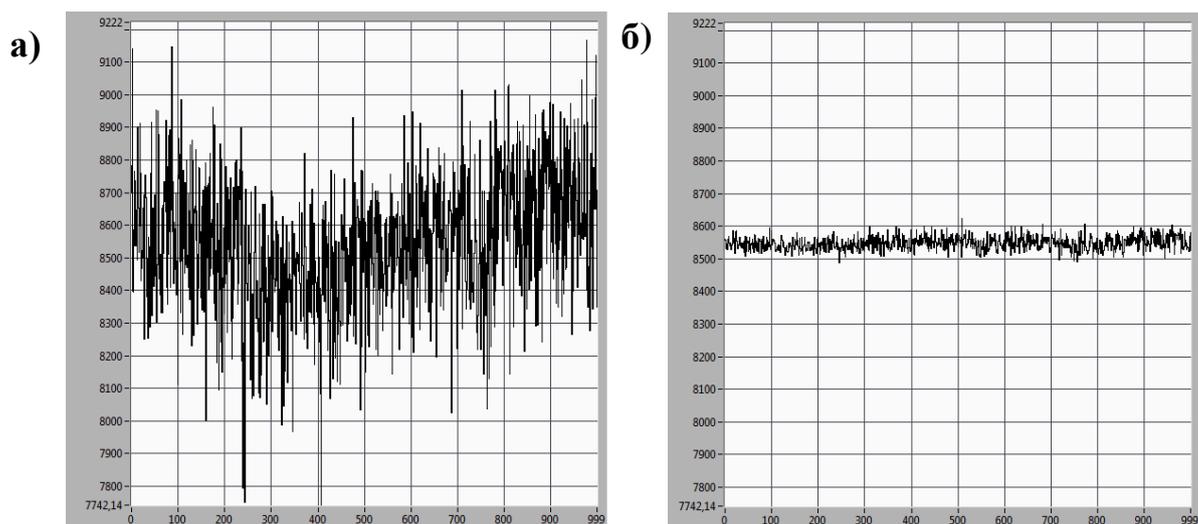


Рисунок 3.24. а) Нулевой сигнал, зарегистрированный с помощью регистратора; б) нулевой сигнал после проведения калибровочных процедур. По оси y отложены отчёты АЦП, где один отсчёт соответствует 60 мкВ, по оси x — время, один отсчёт соответствует 0,2 нс.

близлежащих к ней) наблюдается эффект уширения шумового распределения и появление двух отчётливо выделяемых пика. Мы предполагаем, что это связано с влиянием заряда, накапливаемого в одной из ячеек на величину заряда в другой, и является не выявленной производителем ошибкой, влияющей на результирующую точность

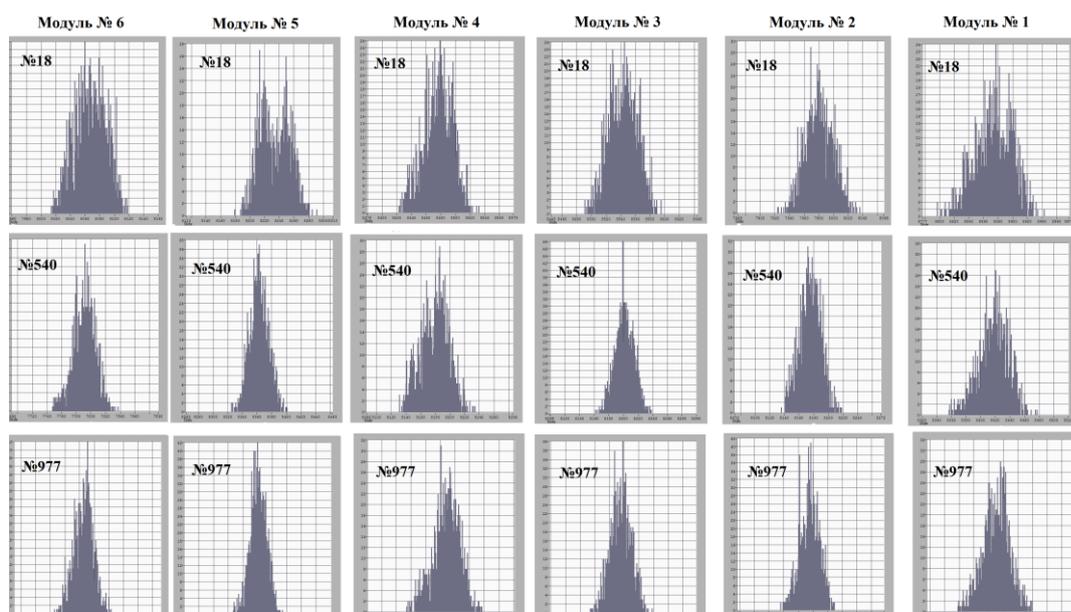


Рисунок 3.25. Статистика по 1000 измерений для ячеек №18, 540 и 977 в каждом из шести регистраторов.

измерений. Исключить влияние этого эффекта можно лишь выполнив дополнительную выбраковку кристаллов DRS4. В регистраторе, уменьшить величину шумовой компоненты можно экранировав наиболее чувствительные элементы (матрицу емкостных накопителей DRS4, ГУН с петлей ФАПЧ LMK04906, АЦП), что позволит исключить влияние внешних факторов. Дальнейшее уменьшение соотношения сигнал/шум регистратора можно произвести за счёт замены элементов аналогового тракта (ключей, усилителей, буферных ограничителей) на кристаллы с меньшим уровнем собственного шума. В приложениях требующих меньшую полосу пропускания, в том числе в диагностике ТР, можно сузить полосу пропускания регистратора, например, до 50 МГц. В этом случае соотношение сигнал/шум улучшится приблизительно в  $\sqrt{\frac{120 \text{ МГц}}{50 \text{ МГц}}} = 1.55$  раз, где 120 МГц – текущая полоса рабочих частот сигнальных трактов регистратора. При этом погрешность динамической калибровки, позволяющей сформировать корректную нелинейную временную шкалу измерительных трактов, из-за уменьшения скорости нарастания калибровочного сигнала пропорционально возрастет.

4. Реализованы программно исполняемые алгоритмы, обеспечивающие амплитудную калибровку измерительных трактов матрицы емкостных накопителей. На рисунке 3.26 приведены осциллограммы сигнала одного из каналов до (а) и после (б) проведения амплитудной калибровки сигнала максимальной амплитуды.
5. Реализованы программно исполняемые алгоритмы, обеспечивающие выполнение динамической калибровки. На рисунке 3.27 приведены осциллограммы синусоидальных сигналов с частотой 100 МГц, зафиксированные одним из каналов регистратора, при использовании линейной и нелинейной временных шкалах. Вторая осциллограмма фактически не содержит “динамических” ошибок, обусловленных

разбросом временных задержек в цепочке инверторных пар, задающих координаты точек отсчетов матрицы емкостных накопителей DRS4.

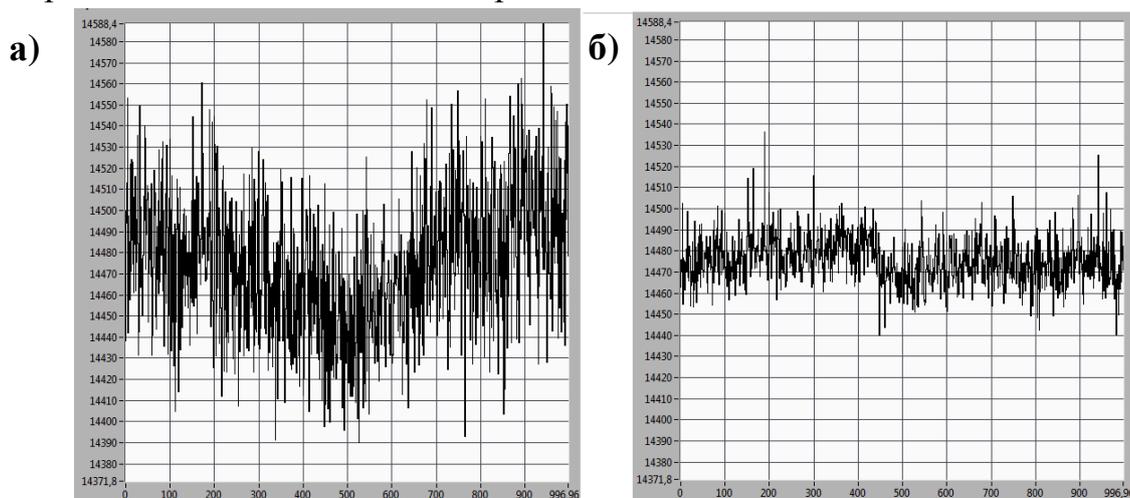


Рисунок 3.26. Максимальный сигнал, зарегистрированный с помощью регистратора; а) сигнал до проведения амплитудной калибровки; б) сигнал после проведения амплитудной калибровки. По оси у отложены отсчёты АЦП, где один отсчёт соответствует 60 мкВ, по оси x — время, один отсчёт соответствует 0,2 нс.

- б. Разработаны вспомогательные модули регистрации, обеспечивающие фиксацию НЧ-компонент сигналов рассеяния с частотой дискретизации 25 МГц в полосе частот до 1 МГц.

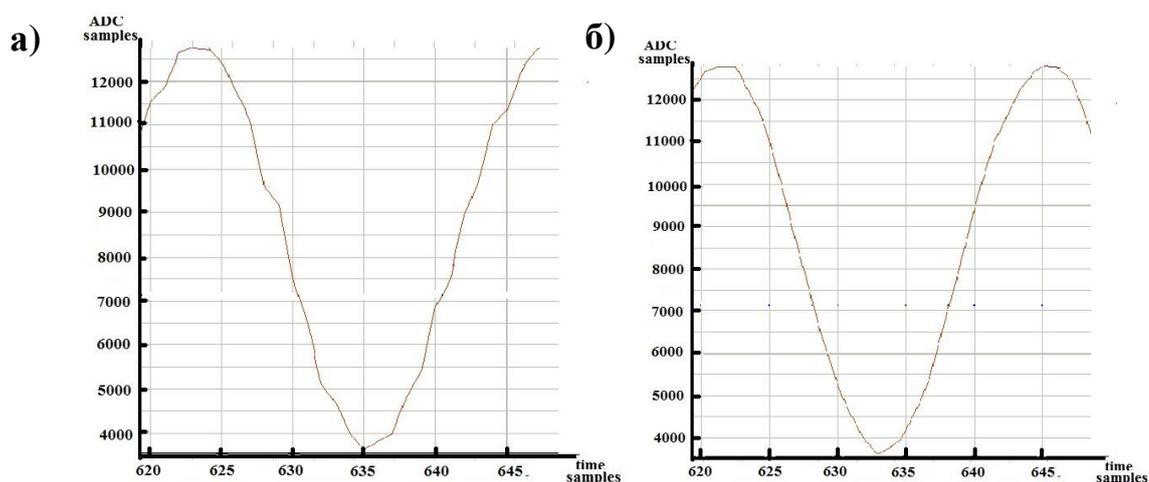


Рисунок 3.27. Синусоидальный сигнал, зарегистрированный с помощью регистратора; а) - сигнал в линейной шкале; б) сигнал в нелинейной шкале. По оси у отложены отсчёты АЦП, где один отсчёт соответствует 60 мкВ, по оси x — время, один отсчёт соответствует 0,2 нс.

7. Работа системы регистрации была апробирована на диагностическом комплексе ТР установки ГДЛ, где в качестве источника излучения использовался неодимовый лазер с длиной волны 1054 нм, формирующий импульс длительностью  $\sim 50$  нс с энергией 15 Дж. В плазменном эксперименте на ГДЛ использовался один из полихроматоров с интегрированной системой регистрации, которая описана в Главе 3. Полосы пропускания спектральных каналов были рассчитаны на длину волны лазера 1064 нм. Вследствие этого, паразитное рассеянное излучение лазера на 1054 нм приводило к засветке первых двух каналов, которые не показаны на рисунке 3.28. Сигналы томсоновского рассеяния в оставшихся 4 каналах представлены на рисунке 3.28. По результатам их обработки температура электронной компоненты плазмы оценивается на уровне  $\sim 165$  эВ.

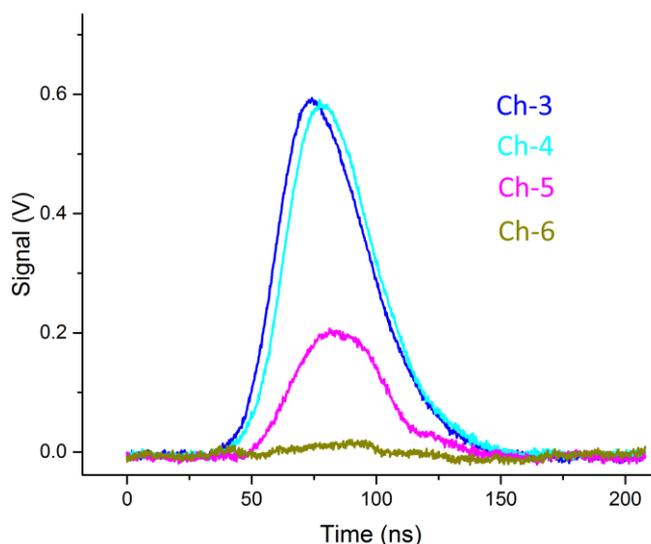


Рисунок 3.28. Сигналы рассеяния, зарегистрированные новой измерительной системой на диагностическом комплексе ТР прошлого поколения установки ГДЛ.

8. Для диагностики ТР установки ГДЛ изготовлено 6 измерительных систем, содержащих: спектрометр, на основе узкополосных интерференционных фильтров, шесть детекторов, на основе лавинных

фотодиодов, восьмиканальный регистратор, на основе матриц емкостных накопителей DRS4 и набор соответствующих источников питания. Ввод в эксплуатацию комплекса на установке ГДЛ, содержащего указанные измерительные системы предполагается в 1 квартале 2020 года.

Фотографии базовых элементов измерительного комплекса диагностики ТР, описанной в данной главе, на установке ГДЛ представлены на рисунке 3.29.

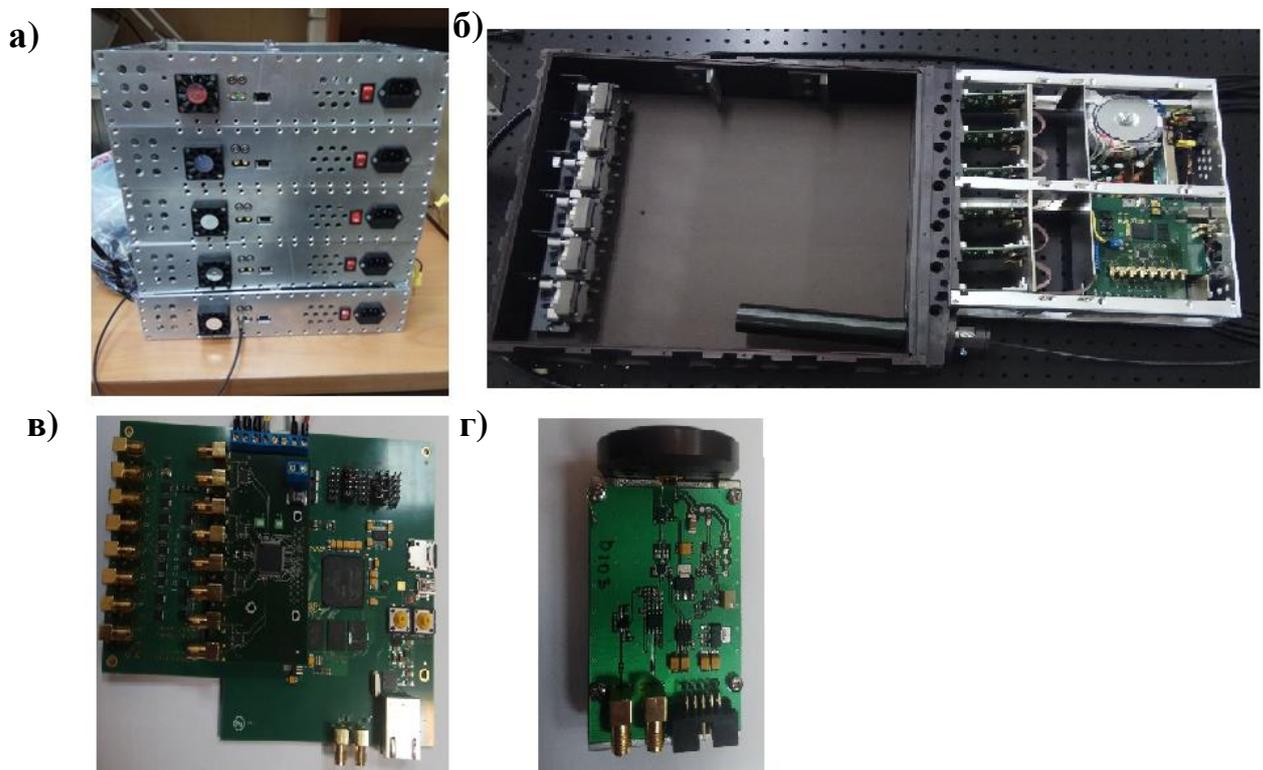


Рисунок 3.29. а) Комплект электроники для пяти полихроматоров диагностики ТР; б) Спектрометр-полихроматор модернизированной диагностики ТР установки ГДЛ с электронной системой регистрации; в) Основная плата системы регистрации и плата вспомогательного АЦП; г) Детектор сигналов ТР, совмещенный с трансимпедансным усилителем.

## Заключение

- 1) Создана система регистрации диагностики ТР установок ГОЛ-3 и ГДЛ, построенная на основе восьмиканальных измерительных модулей АЦП прямого преобразования с амплитудным динамическим диапазоном 12 бит и частотой дискретизации до 500 МГц. В процессе ее создания были:
  - ✓ разработаны структура и базовые элементы модулей фотоприемников на основе лавинных фотодиодов со встроенным трансимпедансным усилителем. А также разработан модуль адаптера, сопрягающий модули фотоприемников с каналом связи Ethernet, используемым на установках ГОЛ-3 и ГДЛ в качестве приборного интерфейса;
  - ✓ разработаны двухканальные регистраторы формы импульсов ADC12500 с программной конфигурацией алгоритма обработки данных, построенные на основе метода прямого преобразования, базирующегося на «оцифровке» текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП. Эти регистраторы фиксируют текущие значения амплитуды сигналов с частотой дискретизации 500 МГц в 12-разрядном амплитудном динамическом диапазоне. Переконфигурируемый цифровой узел регистраторов ADC12500 дает возможность его применения в других диагностических комплексах физических установок;
  - ✓ разработана система синхронизации, обеспечивающая формирование единой временной шкалы для регистраторов всех подсистем диагностик ТР на установках ГОЛ-3 и ГДЛ.
- 2) Создана система регистрации модернизированной диагностики томсоновского рассеяния ГДЛ, состоящая из шести восьмиканальных измерительных модулей АЦП с масштабнo-временным преобразованием с амплитудным динамическим диапазоном 10 бит и частотой дискретизации до 5 ГГц. В рамках его создания были:

- ✓ разработаны структура и базовые элементы детекторов на основе лавинных фотодиодов и малошумящих трансимпедансных усилителей. При этом удалось достичь эффекта при котором основной вклад в шумовые характеристики детектора вносит шумовая компонента тока  $i_{лфд}$ ;
- ✓ на основе матрицы емкостных накопителей разработаны высокоскоростные регистраторы, обеспечивающие фиксацию сигналов рассеяния с частотой до 5 ГГц и дальнейшее их считывание в более медленном темпе;
- ✓ разработаны исполняемые программно алгоритмы, обеспечивающие выполнение калибровки нуля, амплитудной и динамической калибровок элементарных ячеек матрицы емкостных накопителей;
- ✓ разработаны дополнительные модули регистрации, предназначенные для фиксации НЧ-компоненты сигнала рассеяния с детекторов;
- ✓ протестирован на диагностическом комплексе ТР прошлого поколения.

В заключении автор выражает глубокую признательность всем тем, кто помогал в выполнении данной работы.

В первую очередь хочется поблагодарить научного руководителя А.Д. Хильченко за ценные указания, руководство и помощь в написании диссертационной работы.

Неоценимую помощь в работе над проектами и в реализации прикладного программного обеспечения оказали П.В. Зубарев и А.Н. Квашнин.

Отдельные слова благодарности хочется сказать П. А. Багрянскому и С. В. Иваненко за ценные советы и помощь в работе при подготовке диссертационной работы.

Автор благодарит А. А. Лизунова за ряд критически важных замечаний, внесённых в ходе работы над диссертацией и вошедшими в её состав статьями, позволившими существенно повысить корректность интерпретации полученных результатов. Также хочется поблагодарить Г.И. Вьюгова, Д.В. Моисеева и П. В. Першина за неоценимую помощь в настройке экспериментальных стендов.

## Список сокращений и условных обозначений

- АЗУ – аналоговое запоминающее устройство.  
АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.  
ВЧ – высокочастотная компонента сигнала.  
ГДЛ – газодинамическая ловушка.  
ГОЛ-3 - гофрированная ловушка.  
ГУН – генератор, управляемый напряжением.  
ИК – инфракрасное излучение.  
ЛФД – лавинный фотодиод.  
НЧ – низкочастотная компонента сигнала.  
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство.  
ПК – персональный компьютер.  
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема.  
ПЗС – прибор с зарядовой связью.  
ПО – программное обеспечение.  
САПР – система автоматизированного проектирования.  
СВЧ – сверхвысокочастотное излучение.  
ТР – томсоновское рассеяние.  
УТС – управляемый термоядерный синтез.  
ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты.  
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель.  
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.  
ЦОС – цифровая обработка сигналов.  
DC-DC преобразователь – импульсный стабилизатор напряжения.  
DSP – digital signal processor.  
ENOB – effective number of bits.  
GBP – gain bandwidth product.  
PLL – phase locked loop.  
SCA – switch capacitor array.  
SNR – signal-to-noise ratio.  
SPI – serial peripheral interface.

## Список литературы

1. С.Ю. Лукьянов, Н.Г. Ковальский // Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. – М.: МИФИ, 1999.
2. Дж. Шеффилд // Рассеяние электромагнитного излучения в плазме – Москва, Атомиздат, 1978.
3. Лохте-Хольтгрёвен В. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды//М.: Мир, 1971.
4. M. Maslov, M.N.A. Beurskens, M. Kempenaars and J. Flanagan // Status of the JET LIDAR Thomson scattering diagnostic, - Published By Iop Publishing For Sissa Medialab, 2013
5. D. M. Ponce-Marquez, B. D. Bray, T. M. Deterly, C. Liu, and D. Eldon // Thomson scattering diagnostic upgrade on DIII-D, - Review Of Scientific Instruments 81, 2010
6. В.А.Бауков и др. Диагностический комплекс лазерного рассеяния для исследования эволюции профилей электронной температуры о плотности плазмы в токамаке Т-10. Физика плазмы,(1992) т.18, вып.2,с.190
7. С. Ю. Толстяков, В. К. Гусев, М. М. Кочергин, Г.С. Курскиев, Е. Е. Мухин, Ю. В. Петров, Г. Т. Раздобарин, В. В. Семенов, Ю. Э. Камач, Е. Н. Козловский, Ю. Б. Пирожков, Л. Л. Шапиро, Разработка диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М, Журнал технической физики, 2006, том 26, вып. 7
8. S.A. Bozhenkov, M. Beurskens, A. Dal Molin, G. Fuchert, E. Pasch, M.R. Stoneking, M. Hirsch, U. Höfel, J. Knauer, a J. Svensson, H. Trimino Mora, R.C. Wolfa and W7-X team // The Thomson scattering diagnostic at Wendelstein 7-X and its performance in the first operation phase, - Published by IOP Publishing for Sissa Medialab, October 2017
9. Narihara K. et al. Design and performance of the Thomson scattering diagnostic on LHD. — Rev. Sci. Instrum., 2001, vol. 72, № 1, p. 1122—1125.

10. Mukhinet E.E. et al. The ITER divertor Thomson scattering system: engineering and advanced hardware solutions. — *J. of Instrumentation*, 2012, vol. 7(02), p. C02063.
11. Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ.— 3-е перераб. и доп. изд. — М.: Мир, 1990. — 560 с.
12. N.J. Peacock, D.C. Robinson, M.J. Forrest, P.D. Wilcock and V.V. Sannikov in "Measurement of the Electron Temperature by Thomson Scattering in Tokamak T3", *Nature* Vol. 224, November 1, 1969
13. *Journal of Physics: Conference Series* 717 (2016) 012089
14. Сайдов Г.В., Свердлова О.В., Практическое руководство по абсорбционной молекулярной спектроскопии, 1973
15. Пейсахсон И. В., Оптика спектральных приборов, Л., 1970.
16. С. В. Полосаткин, А. В. Бурдаков, М. В. Иванцовский, В. С. Койдан, В. К. Овчар, А. Ф. Ровенских, В. В. Семионов\*, М. Г. Федотов // Многоканальная система томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3 - ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2006, том 32, № 2, с. 128-133.
17. Kiran Patel and Ajai Kumara // Fast integrator based data acquisition system for the SST-1 Thomson scattering system – Review of scientific instruments 81, 043501 (2010).
18. ZANG Qing, ZHAO Junyu, YUN Gaoqian, SHI Lingwei, XU Yajie // Multipulse Nd:YAG Laser Thomson Scattering Diagnostics on HT-7 Tokamak – *Plasma Science and Technology*, Vol.10, No.1, Feb. 2008, pp. 13-17.
19. Г.С. Курскиев, С.Ю. Толстяков, А.А. Березуцкий, В.К. Гусев, М.М. Кочергин, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, В.В. Семёнов, П.В. Чернаков // Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2, с. 81—88.

20. C.H. Liu, Y.Q. Wang, Z. Feng and Y. Huang // Improvement in data processing of Thomson scattering diagnostic on HL-2A tokamak – Published by IOP Publishing for Sissa Medialab, 2015, pp 1-9
21. M. Aftanas, P. Bilkova, P. Bohm, V. Weinzettl, J. Stockel, M. Hron, R. Panek, R. Scannell, M. Walsh // Data Acquisition System and Data Processing for the New Thomson Scattering System on the COMPASS Tokamak – WDS'10 Proceedings of Contributed Papers, Part II, 28–32, 2010
22. C.H. Liu, Y.Q. Wang, Z. Feng and Y. Huang // Improvement in data processing of Thomson scattering diagnostic on HL-2A tokamak – Published by IOP Publishing for Sissa Medialab, 2015, pp 1-9
23. K. Zhai, T. Schindler, J. Kinley, B. Deng, and M. C. Thompson // The upgrade of the Thomson scattering system for measurement on the C-2/C-2U devices – Review of scientific instruments 87, 11d602 (2016)
24. J-F. Glicenstein, J. Bolmont, P. Corona, E. Delagnes, F. Feinstein, D. Gascon, C-L. Naumann, P. Nayman, M. Ribo, A. Sanuy, X. Siero, J. P. Tavernet, F. Toussenel, P. Vincent And S. Vorobiov // The NECTAr project: a New Electronics design for Cherenkov Telescope Arrays, - in Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011), Beijing China, 11–18 Aug 2011
25. M. Francesconi, L. Galli, U. Hartmann, F. Morsani, D. Nicol`o, S. Ritt, E. Schmid // A new generation of integrated trigger and read out system for the MEG II experiment, - 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), 2016
26. Stefan Ritt // Design and Performance of the 6 GHz Waveform Digitizing Chip DRS4, - IEEE Nuclear Science Symposium 2008, Conference Record, pp. 1512-1515
27. G. Varner, B. Edralin, I. Mostafanezhad. // The TARGETX ASIC for the Belle II Muon Detector Scintillator Upgrade, - NSS- MIC, San Diego, Nov 2015

28. J-F.Glicenstein, J. Bolmont, P. Corona, E. Delagnes, F. Feinsein, D. Gascon, C-L.Naumann, P. Nayman, M. Ribo, A. Sanuy, X.Siero, J. P. Tavernet, F. Toussenel, P. Vincent And S. Vorobiov // The NECTAr project: a New Electronics design for Cherenkov Telescope Arrays, - in Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC2011), Beijing China, 11–18 Aug 2011
29. M. Francesconi, L. Galli, U. Hartmann, F. Morsani, D. Nicolò, S. Ritt, E. Schmid // A new generation of integrated trigger and read out system for the MEG II experiment, - 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), 2016
30. Е.А. Пурьга, А. Д. Хильченко, А. Н. Квашнин, П. В. Зубарев, А. А. Иванова, С. В. Иваненко // Многофункциональный быстродействующий регистратор ADC12500 - Приборы и техника эксперимента. №3 2012, Стр. 75-83
31. E.A. Puryga, Yu.S. Sulyaev, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, S.V. Polosatkin, A.F. Rovenskikh, A.V. Burdakov, E.S.Grishnyaev // Multi-Purpose Fast Neutron Spectrum Analyzer with Real-Time Signal Processing – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, V. 720, 2013, Pages 23–25.
32. Е. А. Пурьга, А. Д. Хильченко, А. Н. Квашнин, П. В. Зубарев, В.В. Приходько, С. В. Иваненко, Д. В. Моисеев, А. А. Касатов, В. В. Максимов, Л.Н. Вячеславов // Измерительный комплекс для диагностики Томсоновского рассеяния установок ГОЛ-3 и ГДЛ - Приборы и техника эксперимента. №6, 2018, Стр. 34-42
33. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.А. Лизунов, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев // Быстродействующий регистратор на основе технологий масштабного-временного преобразования для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ, - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, стр. 77-88

34. Иванова А.А., Зубарев П.В., Иваненко С.В., Квашнин А.Н., Котельников А.И., Моисеев Д.В., Пурыга Е.А., Хильченко А.Д., Хильченко В.А., Швырев В.Г. «Регистратор импульсных сигналов для диагностик высокотемпературной плазмы», Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 24-31.
35. E. A. Puryga, S. V. Ivanenko, A. D. Khilchenko, A. N. Kvashnin, P. V. Zubarev and D. V. Moiseev // Data acquisition system for thomson scattering diagnostics on GDT – IEEE Transactions on Plasma Science, 2019 Volume 47, Issue 6, Pages 2883-2889.
36. Lizunov A., Verbassova T., Khilchenko A., Maximov V., Puryga E., Zubarev P. // Integrated polychromator and data acquisition system for the Thomson scattering diagnostic (2019) Journal of Instrumentation, 14 (7), статья № C07010.
37. Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, С.В. Иваненко, А.А. Иванова, В.И. Алейник // Измерительный комплекс системы томсоновского рассеяния установки ГОЛ-3 Тезисы 13-й всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». – Троицк, 8-13 июня 2009г, стр. 123-125.
38. Е.А. Пурыга, С.В. Иваненко, А.Д. Хильченко, А.А. Иванова // Система регистрации данных диагностики параметров плазмы методом томсоновского рассеяния на установках ГОЛ-3 и ГДЛ – Материалы шестнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-16, 2010, стр. 673-674.
39. Л.Н. Вячеславов, М.В. Иванцовский, А.А. Касатов, С.С. Попов, Е.А. Пурыга, А.Д. Хильченко, // Система томсоновского рассеяния для измерения быстрой динамики плотности в экспериментах на установке ГОЛ-3, XXXIX международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Сборник тезисов докладов, 2012, стр. 33.

40. E.A. Puryga, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin, P.V. Zubarev, A.A. Ivanova, S.V. Ivanenko // Multifunction Fast Recorder ADC12500 for Plasma Diagnostics - IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record "2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, NSS/MIC 2012" pp. 1048-1051.
41. Л.Н. Вячеславов., М.В. Иванцовский, А.А. Касатов, С.С. Попов, Е.А. Пурьга, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко // Применение методики томсоновского рассеяния для изучения взаимодействия плазмы с электронным пучком в экспериментах по генерации СВЧ-излучения, - XLI международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, сборник тезисов докладов конференции. 2014, стр. 106.
42. E.A. Puryga, S.V. Ivanenko, A.N. Kvashnin, A.A. Ivanova, A.I. Kotelnikov, P.V. Zubarev, A.D. Khilchenko. // The data acquisition system for Thomson scattering diagnostic on the GOL-3 and GDT- Real Time Conference (RT), 2014 Conference Records, pp. 7097503.
43. E. A. Puryga, K. Martin, S. V. Ivanenko, A. A. Ivanova, A. I. Kotelnikov, P. V. Zubarev, A. N. Kvashnin, A. D. Khilchenko // Data Acquisition System with data reduction in real-time mode – Proceedings Of Science "Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, TIPP 2014", pp. 416.
44. Е.А. Пурьга, А.А. Иванова, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, А. И. Котельников, Д. В. Моисеев // Разработка быстродействующего регистратора на основе SCA технологии для широкополосных диагностик плазмы – Сборник тезисов 16-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-16, 2015, стр. 117-118.
45. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, Д. В. Моисеев «Быстродействующий регистратор для диагностики томсоновского рассеяния», Сборник тезисов 17-ой

- Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», 2017, Издательство: ООО "Тривант", стр. 171-172.
46. Puryga E.A., Ivanenko S.V., Kvashnin A.N, Khilchenko A.D, Zubarev P.V., Moiseev D.V. // High-speed recorder based on SCA technology for Thomson scattering diagnostic on ITER, - В сборнике: 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, NSS/MIC/RTSD 2016 2017. С. 8069664.
47. Puryga E.A., Ivanenko S.V., Kvashnin A.N, Khilchenko A.D, Zubarev P.V., Moiseev D.V. // The update of the recording system for the Thomson scattering diagnostic complex on GDT, - В сборнике: 2019 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop, NSS/MIC/RTSD 2018 2019.
48. Е.А. Пурьга, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко, П. В. Зубарев, Д. В. Моисеев // Модернизация измерительного комплекса для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГДЛ – Тезисы докладов «Диагностика высокотемпературной плазмы» ДВП-18, 2019, стр. 122-124
49. Кузнецов, Щеглов. Методы диагностики высокотемпературной плазмы. // Москва, Атомиздат, 1974
50. Е.Д. Вовченко, А.П. Кузнецов, А.С. Савелов. // Лазерные методы диагностики плазмы –МИФИ, Москва 2008
51. T. Hatae, A. Nagashima, H. Yoshida, O. Naito, S. Kitamura, O. Yamashita, D. Kazama, Y. Onose, T. Matoba // First operation results of YAG laser Thomson scattering system on JT-60U, - Fusion Engineering and Design
52. Kubala, S. Z.; Borchardt, M. T.; den Hartog, D. J.; Holly, D. J.; Jacobson, C. M.; Morton, L. A.; Young, W. C. // Upgrades to improve the usability, reliability, and spectral range of the MST Thomson scattering diagnostic, - November 2016 Review of Scientific Instruments 87(11):11E547

53. G J van Rooij, H J van der Meiden, M H J 't Hoen, W R Koppers, A E Shumack, W A J Vijvers, J Westerhout, G M Wright and J Rapp // Thomson scattering at Pilot-PSI and Magnum-PSI, - Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 124037 (8pp)
54. Загрубский А.А., Цыганенко Н.М., Чернова А.П. // Детекторы излучения, - учебное пособие, Санкт-Петербург, 2007
55. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. // Вакуумные фотоэлектронные приборы, - 2-е изд., испр. М.: Изд-во "Радио и связь", 1988 г. - 272 стр.
56. Hamamatsu // Photomultiplier tubes, - 2017
57. K. Zhai, T. Schindler, J. Kinley, B. Deng, and M. C. Thompson // The upgrade of the Thomson scattering system for measurement on the C-2/C-2U devices – Review of scientific instruments 87, 11d602 (2016)
58. М.А. Трищенко // Фотоприемные устройства и ПЗС, - обнаружение слабых оптических сигналов, - Радио и связь, Москва, 1992
59. А. Н. Пихтин // Оптическая и квантовая электроника: учебник для ВУЗов / — М.: Высшая школа, 2001
60. <http://www.hamamatsu.com/jp/en/S11519-10.html>
61. Н. Шимук // Использование полевых транзисторов в аналоговых схемах, - Электронные компоненты 5, 2018, стр. 22
62. [www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh6629.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmh6629.pdf)
63. Reusch JA1, Borchardt MT, Den Hartog DJ, Falkowski AF, Holly DJ, O'Connell R, Stephens HD. // Multipoint Thomson scattering diagnostic for the Madison Symmetric Torus reversed-field pinch // Rev Sci Instrum. 2008 Oct;79(10):10E733. doi: 10.1063/1.2956742.
64. Zang Qing et al 2010 Plasma Sci. Technol. 12 144
65. J.H. Lee, S.H. Lee, S.H. Son, W.H. Ko, D.C. Seo, I. Yamada, K.H. Her, J.S. Jeon and M.G. Bog Development of prototype polychromator system for KSTAR Thomson scattering diagnostic, - 2015 IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl doi:10.1088/1748-0221/10/12/C12012

66. Шерстнев Л. Г., Электронная оптика и электроннолучевые приборы, М., 1971
67. Хейес Р., Калтер Р.Г., Хокен К.В. Запоминающая трубка с кремниевой мишенью для исследования быстрых переходных процессов. // – Электроника, 1973, № 18, с. 34.
68. Аульченко В.М., Коршунов Ю.В, Кутовенко В.Д. Цифровой осциллограф «Магнолия». // – ПТЭ, 1978, № 5,с. 266.
69. Шейнгезихт А.А., Сазанский В.Я. Регистратор однократных импульсных сигналов АФИ-16.// – Новосибирск, 1979, - 10 с. (Препринт/ ИЯФ СО АН СССР, 79-37).
70. Шейнгезихт А.А., Сазанский В.Я. Регистратор однократных сигналов АФИ-39 // – Новосибирск, 1986, - 10 с. (Препринт/ ИЯФ СО АН СССР, 86-182).
71. J. Walker, S. Chae, S. Shapiro, and R. Larsen, “Microstore—The Stanford Analog Memory Unit,” IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-32, No. 1, pp. 616–621, Feb. 1985.
72. Thomas E. Linnenbrink, David A. Gradl, Daniel M. Ritt, Gordon J. DeWitte, J. David Hutton and Gregory A. Peterson // One gigasample per second transient recorder: a performance demonstration, - IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 1, February 1983
73. К-Секен, Томпсет М. Приборы с переносом заряда. —М.: Мир, 1978
74. Э.А. Купер, А.Е. Плотников, А.А Шейнгезкхт, Ю.П. Деркач, СВ. Коринец // Регистратор формы однократных наносекундных сигналов афи-1700 – Новосибирск, 1988, - 20 с. (Препринт/ ИЯФ СО АН СССР, 88-150).
75. R. Scannell, M. J. Walsh, P. G. Carolan, A. C. Darke, M. R. Dunstan, R. B. Huxford, G. McArdle, D. Morgan, G. Naylor, T. O’Gorman, S. Shibaev, N. Barratt, K. J. Gibson, G. J. Tallents, H. R. Wilson // Design of a new Nd:YAG Thomson scattering system for MAST – Review of scientific instruments 79, 10E730, 2008

76. B Kurzan, M Jakobi, H Murmann and ASDEX Upgrade Team // Signal processing of Thomson scattering data in a noisy environment in ASDEX Upgrade – Plasma physics and controlled fusion, vol. 46 (2004), pp. 299–317
77. W. S. Harris, D. J. Den Hartog, and N. C. Hurst, Rev. Sci. Instrum. 81, 10D505 (2010)
78. K. Bechtola, S. Funka, A. Okumuras, L. L. Ruckmanb, A. Simonsa, H. Tajimaa, J. Vandenbrouckea, G. S. Varnerb // TARGET: A multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes, - Astroparticle Physics 36 (2012), pp. 156-165
79. E. Delagnes, Y. Degerli, P. Goret, P. Nayman, F. Toussene1, P. Vincent // SAM: a new GHz sampling ASIC for the H.E.S.S.-II Front-End Electronics, - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, November 2006.
80. Eric Oberla, Jean-Francois Genat, Hervé Grabas, Henry Frisch, Kurtis Nishimura, Gary Varner // A 15GSa/s, 1.5GHz bandwidth waveform digitizing ASIC, - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 735(2014) pp. 452–461
81. А.А. Иванов, В.В. Приходько // Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы, - УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, Том 187. № 5, 2017, стр. 547-574
82. Пушкарева А. Н // Измерение температуры электронов на установке ГДЛ методом Томсоновского рассеяния, - Квалификационная работа на соискание степени бакалавра, 2010
83. [www.ti.com/lit/ds/slas515e/slas515e.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/slas515e/slas515e.pdf)
84. Б. Браннон, А. Барлоу // Апертурная неопределённость и рабочие характеристики АЦП – Элементная база электроники, Электроника, наука и технология, 4/2006, стр 26-29

85. <https://www.analog.com/en/products/ad9518-3.html>
86. ITER Catalog of I&C products — Fast Controllers (ITER\_D\_345X28) — <http://static.iter.org/codac/pcdh7/Folder%202/9->
87. S. V. Ivanenko, A. D. Khilchenko, E. A. Puryga, V. K. Ovchar, P. V. Zubarev, A. N. Kvashnin, A. A. Ivanova, A. I. Kotelnikov. Prototype of Data Acquisition Systems for ITER Divertor Thomson Scattering Diagnostic. // IEEE Transaction on Nuclear Science, 2015 V. 62, Issue 3, p. 1181-1186.
88. Carlstrom T.N., DeBoo J.C., Evanko R., Greenfield C.M., Hsieh C.-L., Snider R.T. Trost P. A compact, low cost, seven channel polychromator for Thomson scattering measurements. — Review of Scientific Instruments, 1990, vol. 61, p. 2858.
89. DRS4 – datasheet // Paul Sherrer Institute, Rev. 0.9 pp 1-16
90. S. Ritt // Development of high speed waveform sampling ASICs
91. Cyclone V Device Handbook, CV-5V2 22. 07.2014, [www.altera.com](http://www.altera.com)