

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 53.087.92

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ РЕГИСТРАТОР ADC12500

© 2012 г. Е. А. Пурыга*, **, А. Д. Хильченко*, **, А. Н. Квашнин**, П. В. Зубарев**,
А. А. Иванова*, С. В. Иваненко**

*Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630092, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 08.06.2011 г.

Описан модуль широкополосного двухканального регистратора формы импульсных сигналов, построенный на основе 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей с максимальным значением частоты дискретизации 500 МГц. Цифровой блок регистратора реализован на элементах программируемой логической матрицы FPGA, что позволяет программно изменять функциональное назначение его базовых узлов. Прибор оснащен буферным запоминающим устройством объемом 3М отсчетов/канал и встроенным каналом связи Ethernet-10/100, поддерживающим процедуры командного и информационного обмена с сервером, а также процедуру удаленной загрузки конфигурационного файла в FPGA. Прибор ориентирован на использование в составе многоканальных измерительных систем, обеспечивающих синхронную регистрацию и предварительную обработку данных в режиме реального времени в нейтронных, спектроскопических, лазерных и иных диагностиках, применяемых при проведении исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Приведены примеры использования регистратора в подобных приложениях.

Исследования, проводимые в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, характеризуются непрерывным усложнением диагностических методик и, как следствие, требуют постоянного расширения функциональных возможностей и улучшения метрологических характеристик регистрирующей аппаратуры. За последнее десятилетие многие диагностические комплексы были оснащены многоканальными синхронными системами сбора данных на основе быстродействующих регистраторов с расширенным до 12–14 бит амплитудным динамическим диапазоном трактов аналого-цифрового преобразования. В состав аппаратуры регистрации ряда диагностик были включены специализированные цифровые узлы потоковой обработки данных.

Совокупность указанных решений позволила на этапе анализа экспериментальной информации исключить трудоемкие процедуры интерполяционной обработки и совмещения временных координат цифровых осциллограмм, а также предоставила возможность формирования результатов измерений параметров плазмы в режиме реального времени [1–5].

В последний период времени в связи с существенным ростом времени удержания плазмы в магнитных ловушках быстрым темпом растут объемы информационных массивов, накапливаемых регистраторами. Эти же приборы начинают

использоваться и в качестве источника информации о текущих параметрах плазмы в новых приложениях: например, в подсистемах управления разрядом, обеспечивающих стабилизацию положения плазменного шнура в магнитной ловушке, поддержание его формы и плотности, подавление магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей.

Для решения таких задач регистраторы должны не только фиксировать амплитудно-временные характеристики сигналов датчиков, но и формировать, а затем и передавать результаты измерений текущих параметров плазмы контроллерам управляющих подсистем в режиме реального времени.

Подход, упрощающий решение этих задач, предусматривает:

- прямое сопряжение регистрирующей и управляющей аппаратуры с помощью широкополосных каналов связи;
- перенос процедур по предварительной обработке первичного потока экспериментальных данных на уровень регистраторов, например в их вспомогательные цифровые узлы, построенные на основе программируемой логической матрицы FPGA.

В его рамках удастся:

– устранить нелинейную взаимосвязь между характеристиками сигналов датчиков различных диагностик и реальными параметрами плазмы;

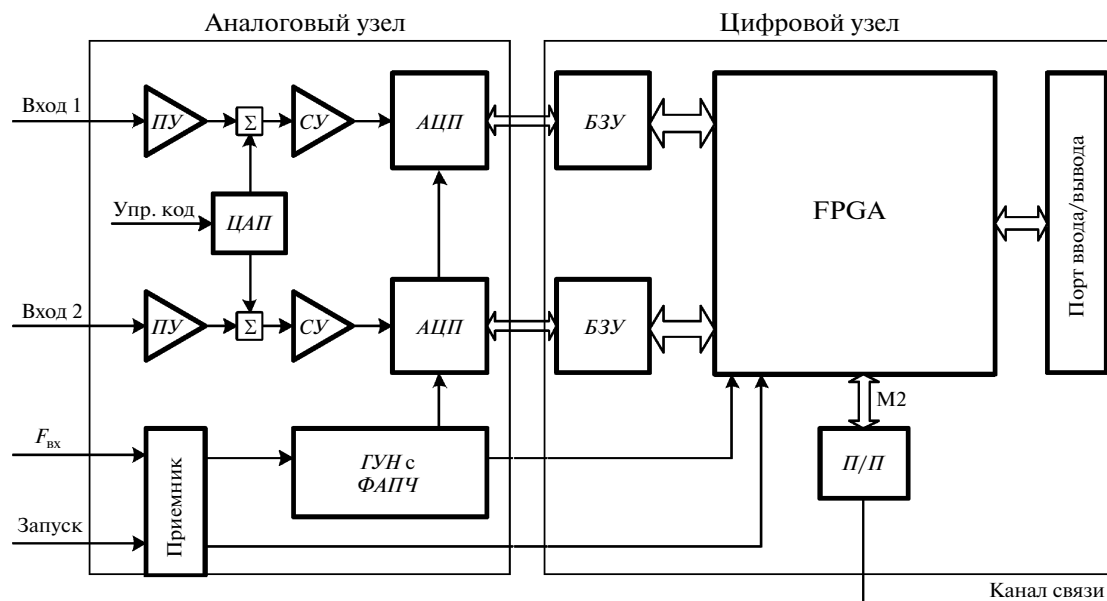


Рис. 1. Функциональная схема регистратора. ПУ – усилитель с программно изменяемым коэффициентом усиления; СУ – согласующий усилитель; Σ – сумматор; ГУН с ФАПЧ – генератор, управляемый напряжением, с петлей фазовой автоподстройки частоты; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; БЗУ – буферное запоминающее устройство; FPGA – программируемая логическая матрица; П/П – приемопередатчик.

– обеспечить фильтрацию паразитных шумовых компонент исходных сигналов;

– провести нормирование результатов измерений и эффективную компрессию объема выходного потока данных многих диагностических трактов.

Предпочтительным вариантом для построения цифровых узлов быстродействующих регистраторов с гибким функциональным потенциалом является применение FPGA. Это обусловлено высокой логической емкостью и быстродействием программируемых матриц, простотой построения на их основе функционирующих в режиме реального времени узлов цифровой потоковой обработки данных с высокой степенью распараллеливания элементарных операций. Значимым при выборе этого варианта является и то, что реализация в регистраторах нового поколения процедур удаленной загрузки конфигурационного файла FPGA дает возможность простыми средствами адаптировать параметры узлов обработки данных к особенностям конкретных диагностик.

Примером приборов с подобным функциональным потенциалом могут служить регистраторы таких фирм, как National Instruments и Agilent Technology [6, 7]. Регистратор PXI-5124 (National Instruments) обеспечивает фиксацию сигналов с 12-разрядным разрешением и частотой дискретизации 200 МГц. Для широкополосных диагностик, таких, например, как лазерное рассеяние и скоростная гамма-спектроскопия, быстродействия этого прибора явно недостаточно. Agilent Technology выпускает одноканальный регистратор M9202A на

основе 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой дискретизации 1 ГГц. Однако построение на основе этого прибора многоканальных синхронных измерительных систем, характерных для плазменного эксперимента, сопряжено с необходимостью разработки достаточно сложной подсистемы синхронизации. Те же проблемы характерны и для регистраторов фирмы SP Devices [8], обладающих аналогичными метрологическими и техническими характеристиками.

Рассматриваемый ниже регистратор ADC12500, имея близкие к указанным выше приборам метрологические характеристики, исходно ориентирован на построение многоканальных синхронных измерительных систем и предварительную обработку данных в режиме реального времени. Он включает в свой состав два 12-разрядных тракта аналого-цифрового преобразования, работающих с частотой дискретизации 500 МГц (рис. 1). Каждый из этих трактов содержит широкополосные входные усилители с программно изменяемым коэффициентом передачи (ПУ), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) смещения нулевой линии входного сигнала, согласующие усилители с дифференциальным выходом (СУ) и АЦП ADS5463. Цифровой узел, ответственный за управление элементами измерительного тракта, за прием данных от АЦП с заданным темпом и их запись в буферное запоминающее устройство (БЗУ, интегральная схема (и.с.) A67P0636AE), построен на основе FPGA (и.с. EP3C16F484C6). Вспомогательные функции выполняют:

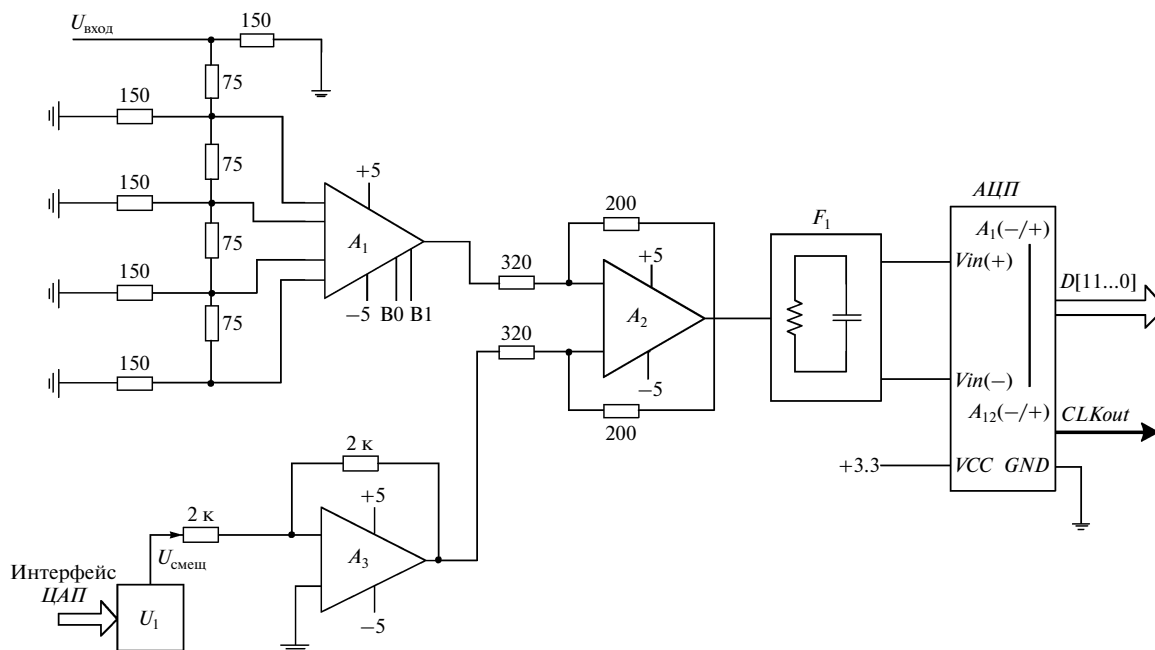


Рис. 2. Измерительный тракт регистратора ADC12500. A_1 – AD8174AR (B0, B1 – выходы управления коэффициентом передачи), A_2 – ADA4937-1, A_3 – AD8055; F_1 – пассивный согласующий фильтр; U_1 – AD5624; АЦП – ADS5463 ($D[11..0]$ – шина данных; $CLKout$ – выходной синхроимпульс).

- тракты “очистки” внешних опорных синхроимпульсов от избыточного фазового шума (ГУН с ФАПЧ);

- контроллер канала связи Ethernet-10/100, решающий задачу сопряжения регистратора с сервером;

- программно модифицируемый контроллер вспомогательного порта ввода/вывода, применяемого для сопряжения регистратора с элементами контроля температуры сцинтилляторов, формирования напряжений питания фотодиодного умножителя и лавинных фотодиодов в спектроскопических и лазерных диагностиках и используемого для управления коммутатором входных цепей регистратора с элементами фотодиодных матриц в трактах фиксации пространственной и временной динамики инфракрасного, видимого или рентгеновского излучения плазмы, а также для передачи данных о текущих значениях параметров плазмы контроллерам технологических подсистем плазменных установок.

С метрологической точки зрения наиболее ответственным элементом регистратора ADC12500 является его аналоговый узел. Он, реализуя принцип программной адаптации параметров входных каскадов (коэффициент передачи, положение нулевой линии) к параметрам сигналов, обеспечивает адекватные частоте дискретизации и разрядности АЦП полосу пропускания, переходную характеристику и уровень шума измерительных

трактов. Упрощенная схема одного из них приведена на рис. 2.

Ключевыми элементами этого тракта являются:

- усилитель с программно модифицируемым по входам B0, B1 коэффициентом передачи (A_1), построенный на основе широкополосного операционного усилителя (о.у.) с коммутируемыми входами AD8174AR и низкоомного резистивного ($R-2R$) делителя;

- усилитель ADA4937-1 (A_2), преобразующий выходной сигнал первого каскада в дифференциальный с одновременным сдвигом нулевой линии последнего в центр шкалы преобразования АЦП по амплитуде;

- 12-разрядный ЦАП AD5624 с выходным буферным каскадом на основе о.у. AD8055 (A_3), формирующий в соответствии с загружаемым в него управляющим кодом опорное напряжение, смещающее положение нулевой линии сигнала на входе АЦП в произвольную точку его шкалы преобразования;

- пассивный согласующий фильтр (F_1), ограничивающий полосу пропускания измерительного тракта и устраняющий влияние на его переходную характеристику паразитных бросков тока, появляющихся на входе АЦП в момент переключения его входных каскадов между режимами хранения и выборки.

Измерительный тракт с данной схемой построения обладает полосой пропускания 0–150 МГц, имеет время установления на точность, соответ-

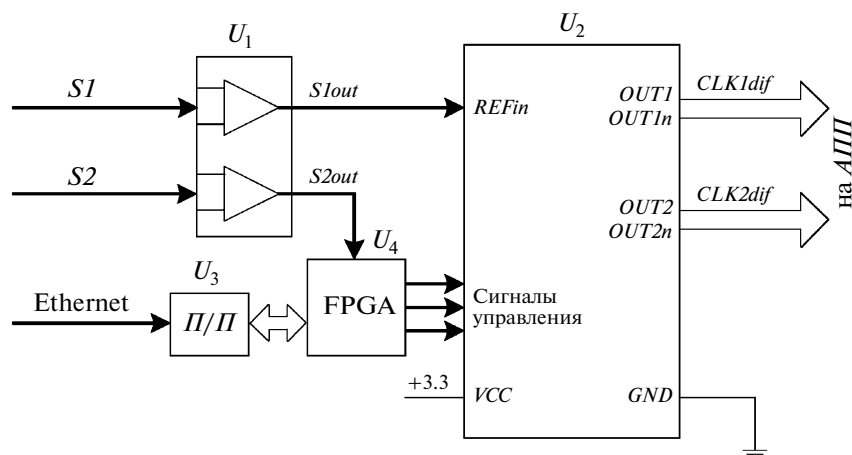


Рис. 3. Узел синхронизации регистратора ADC12500. U_1 – ADCLK907, U_2 – AD9518-3, U_3 – LXT972A, U_4 – EP3C16-F484; $S1$ – синхроимпульсы с частотой 50 МГц, $S2$ – импульсы запуска; $CLK1dif$ – синхроимпульсы 500 МГц для АЦП канала 1, $CLK2dif$ – канала 2.

ствующую разрядности АЦП, ~8 нс, приведенное к входу АЦП напряжение шума (среднеквадратичное) ~150 мкВ.

С формальной точки зрения разрешающая способность измерительного тракта любого регистратора характеризуется соотношением сигнал/шум

$$SNR = -20 \log \left[(2\pi Ft_A)^2 + \frac{2(1+\varepsilon)^2}{3 \cdot 2^{2N}} + \frac{(2\sqrt{2}V_n)^2}{2^{2N}} \right]^{-1/2},$$

которое, помимо теплового шума каскадов предварительного усиления V_n , зависит от величины дифференциальной нелинейности характеристики преобразования ε , шума квантования и разрядности N АЦП, а также от величины апертурной неопределенности t_A моментов выборки и частоты наиболее высокочастотной гармоники в спектре входного сигнала F .

В широкополосных трактах на основе быстродействующих АЦП, дифференциальная нелинейность характеристик преобразования и шум квантования которых соответствует их разрядности, динамическая погрешность, обусловленная апертурной неопределенностью моментов выборки, является доминирующей. Используя хорошо известное соотношение $t_A \leq \frac{1}{2\pi F 2^N}$ для оценки ее максимально допустимой величины применительно к измерительному тракту регистратора ADC12500, получаем $t_A \leq 0.5$ пс.

Столь низкое значение этого параметра однозначно требует применения в узлах формирования и передачи синхроимпульсов, задающих частоту дискретизации АЦП, специальных схемотехнических решений. В ADC12500 это решение основано на “очистке” от избыточного фазового шума с помощью вспомогательного управляемо-

го напряжением генератора с петлей фазовой автоподстройки частоты (ГУН с петлей ФАПЧ) опорных синхроимпульсов, формируемых внешним по отношению к регистратору устройством [9]. Функции такого устройства выполняет общий для измерительной системы модуль синхронизации. Благодаря этому приведенную к синхронизирующим входам АЦП апертурную неопределенность опорных синхросигналов удается снизить до требуемого уровня и, что очень важно, при сохранении возможности построения на основе отдельных модулей регистрации многоканальных синхронных измерительных систем.

Упрощенная схема узла синхронизации регистратора ADC12500 приведена на рис. 3. Этот узел включает в свой состав и.с. приемника следующих с частотой 50 МГц внешних синхроимпульсов и специализированную и.с. AD9518-3, решающую задачи умножения частоты этих синхроимпульсов на 10, “очистки” результирующего синхросигнала от избыточных фазовых шумов, его размножения и передачи по согласованным дифференциальным полосковым линиям связи на соответствующие входы АЦП. Импульсы запуска, поступающие извне на тот же приемник, передаются на FPGA цифрового узла регистратора, где они используются для инициализации рабочих циклов.

Схема цифрового узла регистратора ADC12500 при построении на его основе типового двухканального цифрового осциллографа, фиксирующего в синхронном режиме форму входных импульсных сигналов, приведена на рис. 4. Поскольку оба канала регистрации в рассматриваемом приложении идентичны, на схеме показан фрагмент цифрового узла, соответствующий одному из них.

Источником данных и сопровождающих их синхроимпульсов с частотой следования 250 МГц, поступающих в уровнях LVDS на размещенный в FPGA приемный узел, является АЦП ADS5463.

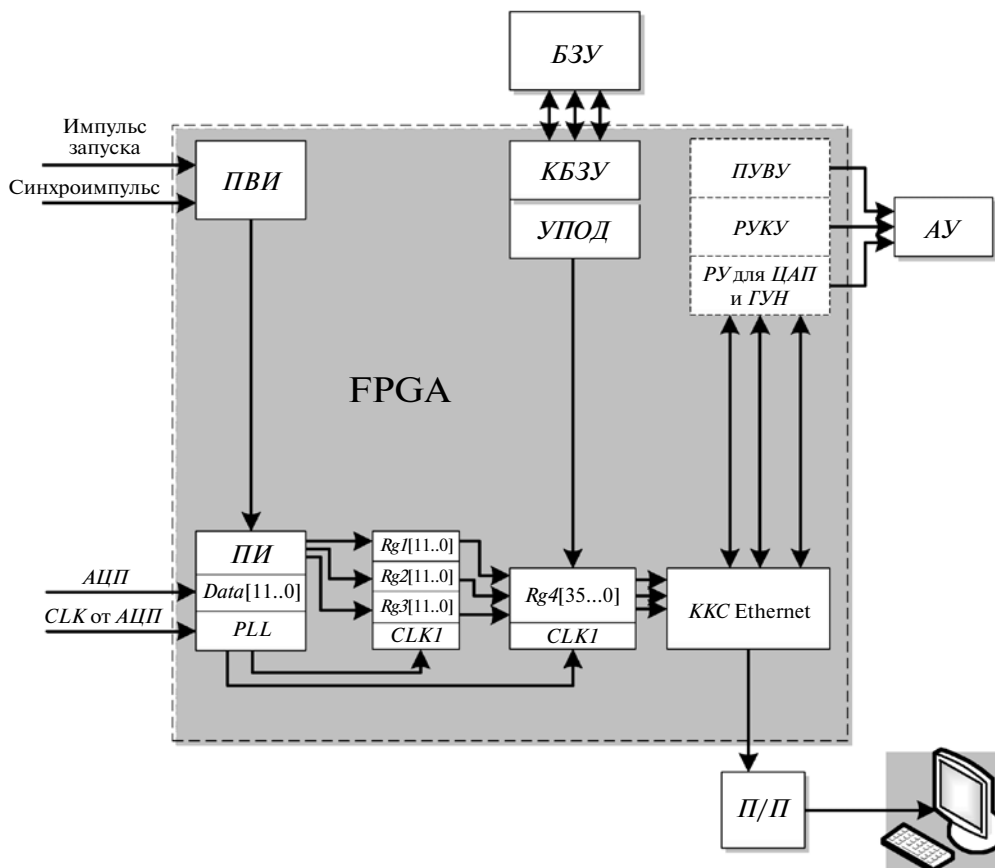


Рис. 4. Цифровой узел регистратора ADC12500. *ПВИ* – приемник внешних импульсов запуска и синхронизации; *ПИ* – приемник данных *АЦП*; *Rg1[11..0]*, *Rg2[11..0]*, *Rg3[11..0]* – вспомогательные регистры; *Rg4[35..0]* – выходной регистр данных; *КБЗУ* – контроллер буферных запоминающих устройств; *УПОД* – узел предварительной обработки данных; *ПУВУ* – порт управления вспомогательными устройствами; *РУКУ* – регистр управления коэффициентом усиления; *РУ* – регистр управления *ЦАП* и *ГУН*; *ККС* – контроллер канала связи Ethernet; *П/П* – приемопередающий узел; *АУ* – аналоговый узел; *PLL* (Phase Locked Loop) – умножитель/делитель частоты.

DDR (double data rate) приемник фиксирует последовательность отсчетов *АЦП* по обоим фронтам синхроимпульсов (нарастающему и спадающему). Он в соответствии с содержимым управляющих регистров, входящих в состав интерфейсного узла, формирует заданную пользователем степень “прореживания” исходного потока данных, следующего с частотой 500 МГц. Процедура “прореживания” определяет результирующую частоту следования отсчетов *АЦП* на выходе приемника. Она позволяет программным образом сформировать реально необходимую частоту оцифровки входных сигналов регистратора (500, 250, 166, 125 МГц и т.д.) при фиксированном значении частоты дискретизации *АЦП* (500 МГц). Последнее важно с метрологической точки зрения, поскольку лишь в рамках такого решения появляется возможность формирования опорных синхроимпульсов, задающих частоту дискретизации *АЦП*, с минимальной величиной апертурной неопределенности моментов выборки.

Выходной регистровый узел приемника изменяет формат представления данных. Он “упаковывает” каждую тройку последовательно следующих друг за другом с максимальным темпом или “прореженных” 12-разрядных отсчетов *АЦП* в 36-разрядные слова, уменьшая тем самым в соответствующее число раз темп поступления данных на узел их предварительной обработки.

Функциональные возможности этого узла зависят от приложения, в котором используется регистратор. Они определяются содержимым конфигурационного файла FPGA. В осциллографических трактах узел обработки данных обычно выполняет функции цифрового фильтра (селектирующего, заградительного, высоких или низких частот), интерполятора, интегратора, исполняет классические для цифровых методов обработки данных процедуры.

Поток данных с узла обработки поступает далее на контроллер буферных ЗУ, который обеспечивает запись последовательности отсчетов в ячейки и.с. А67P0636AE в непрерывном, странич-

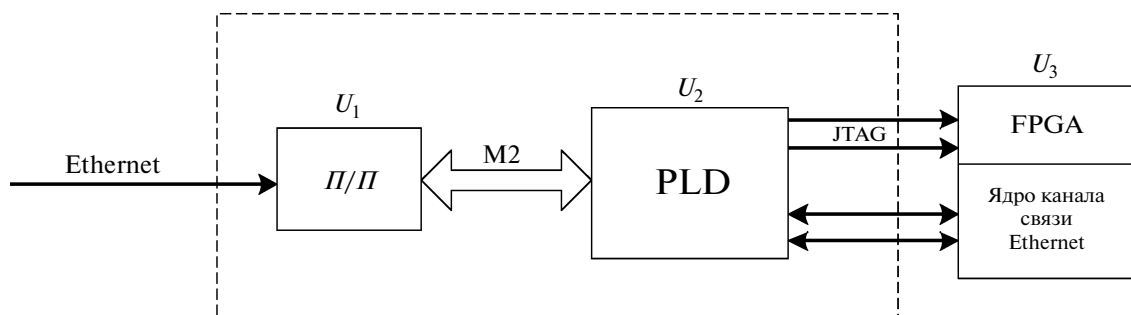


Рис. 5. Функциональная схема приемопередающего узла контроллера канала связи. U_1 – приемопередатчик LXT972A, U_2 – MAX II EPM3256ATC144 (тип матрицы – PLD), U_3 – CYCLONE III EP3C16-F484.

ном, непрерывном с предысторией или страничном с предысторией режимах с привязкой, если это необходимо, циклов записи к внешним импульсам запуска. Помимо режима работы, программно модифицируемыми параметрами контроллера буферных ЗУ являются: глубина памяти, используемой для накопления данных, размер и количество страниц, используемых в страничных режимах, режим запуска цикла регистрации (по внешнему синхроимпульсу или входному сигналу любого из измерительных трактов) и указатель номера источника внешних синхроимпульсов.

Контроллер канала связи Ethernet-10/100, встроенный в интерфейсный узел, поддерживает операции загрузки и контроля состояния управляющих регистров прибора, записи/чтения ячеек буферных ЗУ, а также процедуру загрузки по сети конфигурационного файла в FPGA. Показанный на схеме рис. 4 набор управляющих регистров обеспечивает программную адаптацию измерительных трактов регистратора к параметрам входных сигналов (выбором необходимых масштабов преобразования по амплитуде и положения нулевой линии в каждом канале, текущего значения эквивалентной частоты дискретизации, полосы пропускания вспомогательного цифрового фильтра и т.д.).

Для поддержки процедур командного и информационного обмена с сервером, а также удаленной загрузки конфигурационных файлов в FPGA приемопередающий узел контроллера канала связи, функциональная схема построения которого приведена на рис. 5, оснащен двумя вспомогательными интерфейсами: шиной M2 и JTAG. С помощью шины M2 приемопередатчик LXT972A через вспомогательную программируемую матрицу с электрической перезаписью информации MAX II EPM3256ATC144 (U_2) сопрягается с элементами FPGA, ответственными за решение задач канального и протокольного уровней в рамках информационного и командного обмена с сервером “сырыми” пакетами формата IEEE 802.3 в режиме “запрос–ответ” по каналам связи Ethernet-10/100.

Для поддержки этих операций прикладным программным обеспечением сервера используются процедуры библиотеки WinPcap (Windows Packet Capture – захват пакетов), дополняющие стандартные функции операционных систем семейства Win32 возможностью принимать и передавать данные при непосредственном взаимодействии прикладного программного обеспечения с сетевой картой. Вызов этих операций, а также процедур формирования массивов управляющих констант, задающих текущие рабочие параметры регистратора, процедур сортировки поступающих от него данных, их отображения в удобном для восприятия виде, записи принятых информационных массивов на жесткий диск, производится на уровне сервера задачей, строящейся на основе унифицированного пакета прикладных подпрограмм.

Загрузка конфигурационного файла в FPGA регистратора выполняется с помощью указанной ранее вспомогательной матрицы. Она выделяет из потока сообщений в канале связи сообщения, адресованные к ней, фиксирует поступающие данные, преобразует их формат, дополняет данные необходимыми синхросигналами и передает их через JTAG-интерфейс на соответствующие выходы FPGA.

Процедура удаленной загрузки в FPGA конфигурационного файла, создаваемого в рамках среды проектирования Quartus, принципиально важна для рассматриваемого прибора. Она ориентирована не только на оперативное изменение функционального потенциала его блока обработки данных и вспомогательного порта ввода/вывода, но и на модификацию схемотехники и логики работы цифрового узла регистратора в целом. Эта возможность, качественно новая по отношению к аналогичным измерительным средствам предыдущего поколения, позволяет адаптировать регистратор ADC12500 программными методами к широкому спектру приложений.

В частности, в ИЯФ СО РАН этот прибор стал основой для построения:

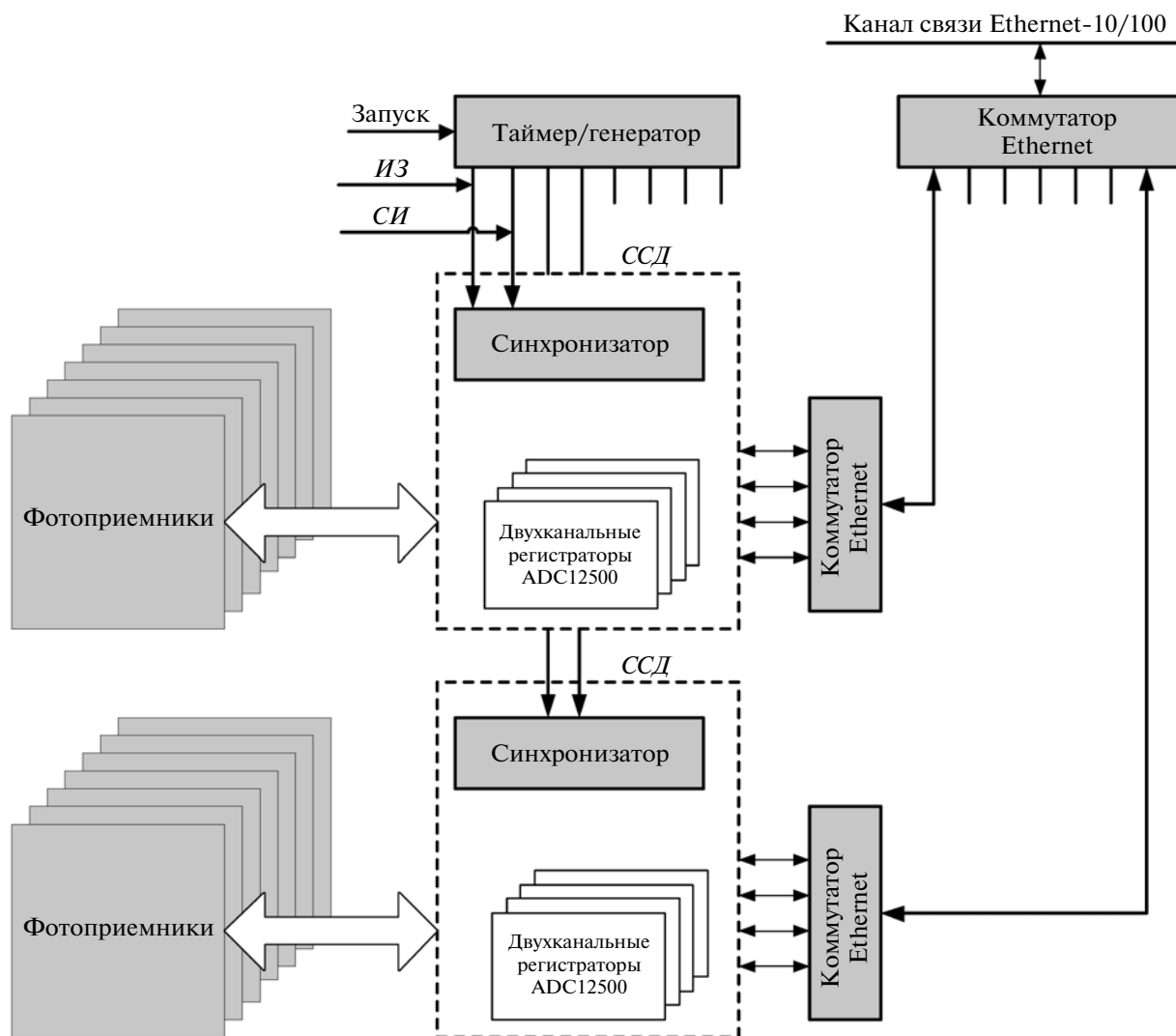


Рис. 6. Структура построения измерительного кластера для диагностики томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3. ССД – 8-канальная система сбора данных на базе регистратора ADC12500; ИЗ – запускающий импульс, СИ – синхронимпульс.

– измерительных кластеров и синхронных систем сбора и обработки данных, ориентированных на многоканальную фиксацию с высоким амплитудным и временным разрешением характера поведения сигналов в широкополосных многоканальных диагностиках плазмы;

– адаптивного к типу детектора быстродействующего анализатора энергетического спектра интенсивных потоков γ -квантов;

– регистратора интенсивности потока термоядерных нейтронов, работающего совместно со сцинтилляционным детектором на основе стильбена.

Измерительные кластеры и многоканальные системы сбора и обработки данных применяются на установке ГОЛ-3 ИЯФ СО РАН для регистрации сигналов диагностики температуры и плотности электронной компоненты плазмы методом лазерного рассеяния [10], а также в трактах фик-

сации интенсивности и спектров излучения турбулентной плазмы в области двойной плазменной частоты. Структурная схема построения таких систем приведена на рис. 6.

В измерительном комплексе диагностики температуры и плотности плазмы измеряется уширение спектральной линии рассеянного плазмой излучения в нескольких пространственных точках, лежащих на линии прохождения зондирующего луча неодимового лазера через плазменный шнур. Импульсы лазера имеют длительность около 15 нс и могут следовать с частотой повторения до 1 кГц.

Рассеянное в каждой пространственной точке излучение после спектрометра попадает на восемь фотоприемников, преобразующих его интенсивность в соседних спектральных окнах в электрические сигналы. Далее эти сигналы регистрируются модулями ADC12500 в страничном

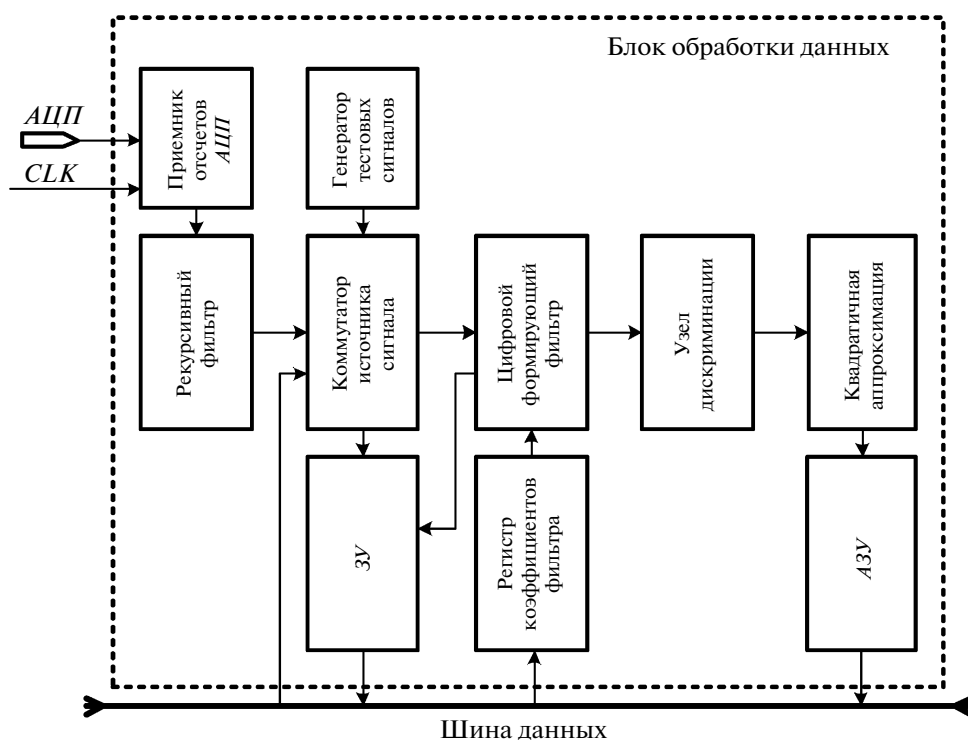


Рис. 7. Функциональная схема блока обработки данных цифрового узла анализатора энергетического спектра γ -квантов. ЗУ – внутреннее запоминающее устройство размером 256×32 ; АЗУ – автоинкрементное ЗУ.

режиме, характеризующемся тем, что в его рамках отсчеты АЦП, соответствующие каждому импульсу рассеянного излучения лазера, фиксируются в отдельной странице буферного ЗУ с емкостью, намного меньшей его полного объема. Таким образом данные, накопленные в последовательности страниц буферного ЗУ регистраторов во время рабочего импульса установки, позволяют судить о временной динамике температуры и плотности электронной компоненты плазмы в магнитной ловушке.

В связи с малой длительностью сигналов, формируемых фотоприемниками (15–20 нс), в состав цифрового узла всех регистраторов, между буферным ЗУ и контроллером канала связи, включен специализированный блок обработки данных – интерполятор. Он, используя полином вида

$$y(t) = \sum_{n=0}^M y(n\Delta t) \frac{\sin(2\pi F(x - n\Delta t))}{2\pi F(x - n\Delta t)},$$

“вставляет” между каждой парой реальных отсчетов АЦП четыре промежуточных, увеличивая тем самым эквивалентную частоту оцифровки сигналов фотоприемников в 5 раз. Процедура интерполяции ориентирована на подавление высокочастотной шумовой компоненты сигналов рассеянного излучения и улучшение их визуального восприятия [11, 12].

Анализатор энергетического спектра интенсивных потоков γ -квантов используется для

идентификации состава веществ в прикладных исследованиях, проводящихся на установке БНЗТ (комплекс для боронейтронозахватной терапии рака) ИЯФ СО РАН. В плазменных приложениях с его помощью изучаются процессы переноса и миграции примесей. При разработке этого анализатора в цифровом узле ADC12500 был создан достаточно сложный блок обработки данных, включающий в свой состав входной фильтр, узел разделения наложенных событий, дискриминатор пороговых уровней, отбраковывающий ложные и фоновые события, узел выделения максимума сигналов детектора и блок автоинкрементного ЗУ (рис. 7). Блок автоинкрементного ЗУ имеет двухпортовую организацию и используется на интервале набора статистики для накопления данных в координатах “амплитуда – количество событий”, а при взаимодействии анализатора с сервером – для периодической передачи ему накопленных информационных массивов.

В узле обработки данных регистратора интенсивности потока термоядерных нейтронов, построенного также на основе ADC12500, реализована простая и эффективная процедура разделения событий, инициируемых нейтронами и паразитными γ -квантами, попадающими в апертуру сцинтилляционного детектора на основе стильбена [13]. Она основана на анализе формы отклика сцинтиллятора на каждое из этих событий.

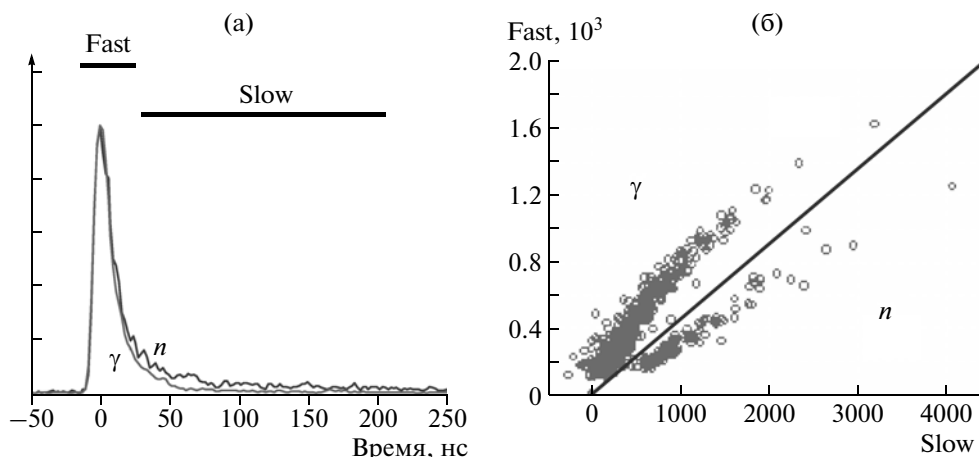


Рис. 8. Осциллограмма выходных сигналов детектора (а) и диаграмма событий (б).

Суть процедуры поясняет рис. 8а, на котором приведены в одном масштабе времени характерные осциллограммы выходных сигналов детектора при поглощении им нейтрона (n) и γ -кванта (γ). Нетрудно заметить, что эти осциллограммы отличаются друг от друга лишь характерной постоянной времени “хвоста” спадающего фронта сигналов. При высоком амплитудном динамическом диапазоне тракта их оцифровки, характерном для ADC12500, эти сигналы можно идентифицировать, используя в качестве критерия отношение интегральных сумм, сформированных из последовательности отсчетов АЦП узлом их обработки на интервалах времени, обозначенных как Fast и Slow. На рис. 8б приведен результат выполнения этой процедуры, полученный в процессе тестовой проверки узла идентификации типа событий регистратора ADC12500.

Подводя итог, можно сделать следующее заключение: аппаратура регистрации экспериментальных данных, построенная на основе широкополосных трактов аналого-цифрового преобразования с высоким амплитудным разрешением и цифровых узлов с программно модифицируемой архитектурой, способных выполнять процедуры предварительной потоковой обработки результатов измерений, существенно расширяет потенциальные возможности диагностического комплекса современных плазменных установок. За счет эффективной компрессии исходных потоков данных она снимает существующие ограничения на пропускную способность каналов связи, используемых для сопряжения с вычислительной техникой, позволяет формировать в режиме реального времени сигналы обратной связи, необходимые для контуров управления разрядом.

Естественно, что для решения таких задач, помимо создания линейки приборов, подобных регистратору ADC12500, отличающихся друг от друга разрешением и полосой пропускания трактов

аналого-цифрового преобразования, а также типом сетевых интерфейсов, необходимо выполнить достаточно большой объем работ по разработке сопутствующего программного обеспечения, прежде всего — графической среды разработки приложений для FPGA, подобной LabVIEW FPGA [14], позволяющей оперативно создавать проекты на основе базовых библиотечных модулей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурко В.Ф., Зубарев П.В., Квашинин А.Н. и др. // ПТЭ. 2003. № 5. С. 32.
2. Гурко В.Ф., Зубарев П.В., Квашинин А.Н. и др. // ПТЭ. 2003. № 5. С. 38.
3. Бурдаков А.В., Квашинин А.Н., Койдан В.С. и др. // ПТЭ. 2004. № 2. С. 38.
4. Соломахин А.Л., Багрянский П.А., Воскобойников Р.В. и др. // ПТЭ. 2005. № 5. С. 96.
5. Гурко В.Ф., Зубарев П.В., Квашинин А.Н. Препринт ИЯФ СО РАН № 2003-10. Новосибирск, 2003.
6. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14231>
7. <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-35556.0.00&lc=rus&cc=RU>
8. <http://spdevices.com/index.php/adq412>
9. Reeder B., Green W., Shilito R. // Analog dialogue 42-02. February 2008. P. 1.
10. Полосаткин С.В., Бурдаков А.В., Иванцовский М.В. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 2. С. 128.
11. Иванова А.А., Хильченко А.Д. // Материалы 13-й Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы”. Троицк, 8–13 июня 2009. С. 85.
12. Иванова А.А., Алейник В.И., Иваненко С.В. и др. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 5.
13. Аржанников А.В., Батраков А.М., Бурдаков А.В. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 2. С. 113.
14. <http://sine.ni.com/np/app/flex/p/docid/nav-77/lang/en/fmid/94>