

УДК 681.5.08, 681.518.3, 681.518.5

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ УСКОРИТЕЛЕМ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА: СТРУКТУРА, АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА, РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

П. А. Бак, А. М. Батраков, Р. А. Кадыров, П. В. Логачёв,  
А. В. Павленко, А. Н. Панов, В. Я. Сазанский, Г. А. Фатькин

*Учреждение Российской академии наук  
Институт ядерной физики им. Г. И. Буджера Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11  
E-mail: G.A.Fatkin@inp.nsk.su*

Рассматривается структура, логика работы и аппаратные средства системы управления линейным индукционным ускорителем для рентгенографического комплекса. Описана разработанная в стандарте CompactPCI аппаратура для системы управления. Исследована возможность встраивания интеллектуального микроэлектронного оборудования в высоковольтные элементы установки.

*Ключевые слова:* система управления, индукционный ускоритель, CompactPCI, автоматизация, модуль PMC.

**Введение.** Последнее десятилетие активно развиваются установки для импульсной рентгеновской фотографии (Flash X-Ray Radiography), применяемой для исследования различных объектов при ударных воздействиях. Наиболее перспективными являются установки на основе линейных индукционных ускорителей (ЛИУ), которые позволяют получать рентгеновское излучение необходимой мощности, направляя на конвертер пучок электронов [1]. На настоящий момент в мире известны три рентгенографические установки на базе ЛИУ: DARHT (г. Лос-Аламос, США) [2], FXR (г. Ливермор, США) [3], AIRIX (г. Моронвилье, Франция) [4]. Из них наиболее современным как по физико-техническим решениям, так и с точки зрения системы управления является комплекс DARHT (Dual Axis Radiographic Hydrodynamic Test Facility). Индукционный ускоритель этого комплекса (DARHT-2) генерирует пучок с энергией 18 МэВ, током 2 кА и размером фокусного пятна на мишени 2 мм, позволяя получать до четырёх кадров с интервалом 200–400 нс между кадрами.

Специфика проводимых экспериментов и сложность подготовки объекта исследования требует высокой надёжности работы, поэтому без соответствующей системы управления функционирование установки невозможно. DAAAC (Data Acquisition, Archival, Analysis, and Instrument Control System) — распределённая система управления DARHT, базирующаяся на оборудовании, выполненном в стандарте CompactPCI, содержит 26 станций сбора данных и 14 станций обработки и анализа процессов [5]. Число осциллографических каналов превышает 1000, а число каналов синхронизации — более 200. Большое количество данных, характеризующих работу установки, приводит к сложностям при определении готовности установки к эксперименту и выявлении причин в случае её неработоспособности. Можно отметить оригинальный подход к решению этой проблемы с помощью нейронной сети, применяемый на установке AIRIX (Accélérateur à induction pour radiographie pour l'imagerie X) [6].

В 2010 г. в Институте ядерной физики (ИЯФ) Сибирского отделения РАН запущен линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2 для рентгенографического комплекса, представляющий собой мощную импульсную установку, генерирующую на конвертер пучок

электронов с энергией 2 МэВ, током 2 кА, длительностью около 300 нс. Ускоритель может генерировать два импульса с интервалом 4–10 мкс, позволяя сделать два снимка в ходе опыта, что является важным качеством. Такой большой интервал между импульсами невозможно обеспечить ни на одной из существующих установок, что ставит данный ускоритель в разряд уникальных. Второе важное качество ускорителя — образование на конвертере пятна размером около 2 мм при достаточно низкой энергии 2 МэВ, это позволяет получать чёткое рентгеновское изображение в широком классе экспериментов, проводимых на низкой энергии.

В процессе разработки к системе управления предъявлялся широкий набор требований. Прежде всего, она должна обеспечить надлежащее управление высоковольтными устройствами, определяющими необходимое качество пучка. Другое важное свойство — высокая надёжность и возможность защиты в аварийных ситуациях. Далее, объём регистрируемых и анализируемых данных должен предоставлять исчерпывающую информацию о функционировании элементов ускорителя и качестве пучка. В связи с тем что время жизни подобных установок достигает десятков лет, в системе управления следует использовать современные приборные стандарты. Также необходимо предусмотреть возможность расширения системы, так как планируется постепенное наращивание энергии ускорителя. И, наконец, чтобы сделать систему управления реализуемой по стоимости, обязательным является экономическая обоснованность технических решений.

При создании системы управления выполнялись следующие задачи:

- 1) формирование и оптимизация структуры;
- 2) изучение возможностей встраивания сложных, многофункциональных, интеллектуальных элементов управления непосредственно в мощные высоковольтные импульсные устройства;
- 3) самостоятельная разработка и производство ряда электронных устройств, что сделало бы построение системы управления реальным с коммерческой точки зрения.

**1. Структура установки** состоит из цепочки ускоряющих ячеек (индукторов), диода с диспенсерным катодом и фокусирующих линз (рис. 1). Индуктор представляет собой сердечник с объёмным витком, образующим первичную обмотку импульсного трансформатора, вторичную обмотку которого формирует электронный пучок. Энергия, приобретаемая частицами пучка, соответствует сумме напряжений на первичных обмотках индукторов. Таким образом, увеличение энергии ускорителя достигается наращиванием числа уско-

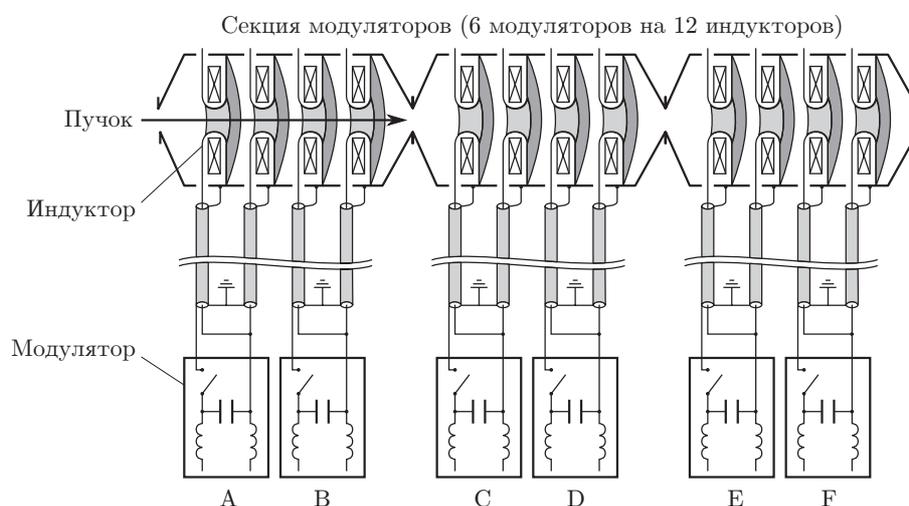


Рис. 1. Принцип работы ускорителя

ряющих ячеек. Для получения полного ускоряющего напряжения 2 МВ задействовано 96 индукторов, на каждый из которых подаётся импульс напряжением около 23 кВ.

Напряжение на индукторах создают 48 импульсных источников (модуляторов). Один модулятор обеспечивает работу двух параллельно включённых индукторов (см. рис. 1) в режиме с двумя последовательными импульсами. Он содержит генератор тока размагничивания, две формирующие линии, два водородных тиратрона с полым катодом и управляющую электронику. Напряжение на формирующих линиях составляет 45 кВ и создаётся общим зарядным устройством, к которому параллельно подключены все модуляторы. Территориально модуляторы размещены в восьми стойках-секциях (по шесть в каждой), установленных вдоль ускорителя, имеющего длину около 6 м.

**2. Система управления.** В рабочем цикле установки (рис. 2) можно выделить две фазы: медленную и быструю. Медленная фаза длится около 40 мс и начинается с импульса «Поджиг», инициирующего подготовку водородных тиратронов. Далее в течение медленной фазы заряжаются формирующие линии модуляторов, устанавливаются и измеряются токи накала и дуги тиратронов, отключается на 2 мс накал катода, готовятся источники импульсных магнитных фокусирующих линз.

Быстрая фаза длится около 200 мкс, начинаясь с импульса размагничивания индукторов и заканчиваясь генерацией пучка (или двух пучков, разнесённых по времени). На этом этапе требуется жёсткая синхронизация: разброс времени срабатывания не должен превышать 10 мкс для медленных устройств (линзы, генераторы размагничивания) и 10 нс для всех 96 тиратронов. Вследствие этого управление установкой в быстрой фазе выполняется с помощью синхроимпульсов, запускающих подготовленные в предыдущей фазе мощные элементы.

Подготовка аппаратуры к рабочему циклу и контроль медленно изменяющихся параметров производится по шине CAN с помощью исполнительных устройств, расположенных в модуляторах, источниках питания катода, линз и корректоров.

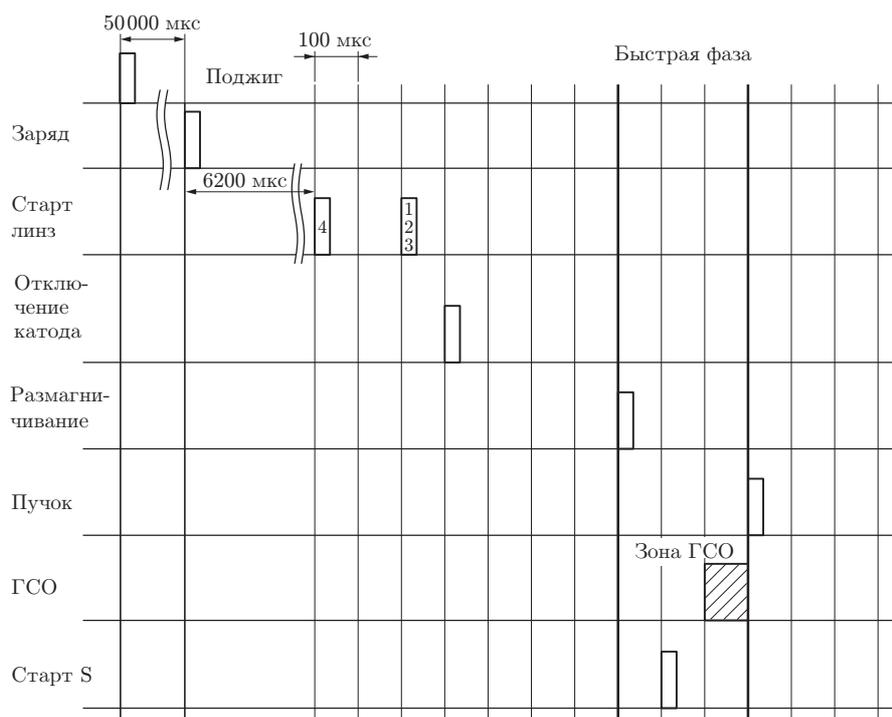


Рис. 2. Временная диаграмма рабочего цикла

Особенности применения ЛИУ-2 требуют высокой надёжности его работы, обеспечить которую непросто, так как рабочие напряжения и токи силовых элементов достигают 50 кВ и 8 кА при длительности основных процессов в диапазоне 50–500 нс. Один из путей решения задачи — прогнозирование возможных проблем на основе детального анализа информации о текущем состоянии и эволюции параметров установки. Наиболее эффективный способ — регистрация в каждом выстреле ускорителя нескольких сотен осциллограмм, отражающих процессы в принципиальных элементах его структуры. Осциллограммы накапливаются в базе данных, обрабатываются и используются для оценки надёжности и выдачи разрешения на старт в предстоящем рабочем цикле.

Несмотря на тщательный анализ допустимости очередного рабочего цикла, существует вероятность возникновения аварийных процессов, так как ускоритель включает в себя много импульсных высоковольтных элементов. Система управления должна содержать средства, запрещающие продолжение рабочего цикла при возникновении нештатной ситуации. Особенно это касается импульса генератора старта опыта (ГСО).

Таким образом, перечисленные выше задачи по управлению установкой позволяют определить следующие подсистемы управляющей структуры:

- 1) контроля и управления подготовительными операциями;
- 2) синхронизации и блокировок;
- 3) регистрации осциллограмм.

Детальное рассмотрение структуры системы контроля и управления начнём с оценок количества управляющих и измерительных каналов. Прежде всего, каждый модулятор должен быть подключён к шине CAN для организации взаимодействия с устройствами внутри модулятора. Далее, функционирование модулятора в быстрой фазе требует подачи шести запускающих импульсов, следовательно, необходимо обеспечить поступление синхроимпульсов на 288 входов ( $6 \times 6 \times 8$ ). Количество осциллографических каналов также велико: 96 каналов для регистрации формы токов и напряжений и столько же для регистрации «технологических» сигналов модулятора.

Таким образом, на один метр установки, имеющей линейную структуру, приходится большое количество управляющих и измерительных устройств, которые не могут быть разнесены на значительное расстояние. В этом случае удачным решением для системы управления и контроля является разделение её на отдельные функционально законченные узлы, их распределение вдоль установки и встраивание в мощные высоковольтные секции модуляторов в непосредственной близости от оконечных исполнительных устройств.

Такая «линейная» распределённая структура системы управления и контроля представляется вполне логичной ещё и потому, что предоставляет возможность поэтапного запуска и тестирования оборудования, а в дальнейшем — наращивания установки и её энергии.

Структурная схема системы управления изображена на рис. 3. Вся система включает восемь идентичных периферийных узлов, размещённых в модуляторных секциях, и центральный узел, расположенный вне зоны ускорителя.

Периферийный узел, будем называть его контроллером секции, содержит: модуль процессора; CAN-мастер для организации взаимодействия с CAN-устройствами шести модуляторов секции; «быструю» программируемую линию задержки и формирователь импульсов запуска, с помощью которых выполняется синхронизация работы модуляторов секции и в случае необходимости блокировка запусков; комплект цифровых регистраторов формы сигналов (24 канала).

Центральный контроллер обеспечивает управление зарядными устройствами, питанием катода, импульсными корректорами и взаимодействует с ЭВМ оператора и контроллерами секций. Состав центрального контроллера идентичен составу контроллера секции.

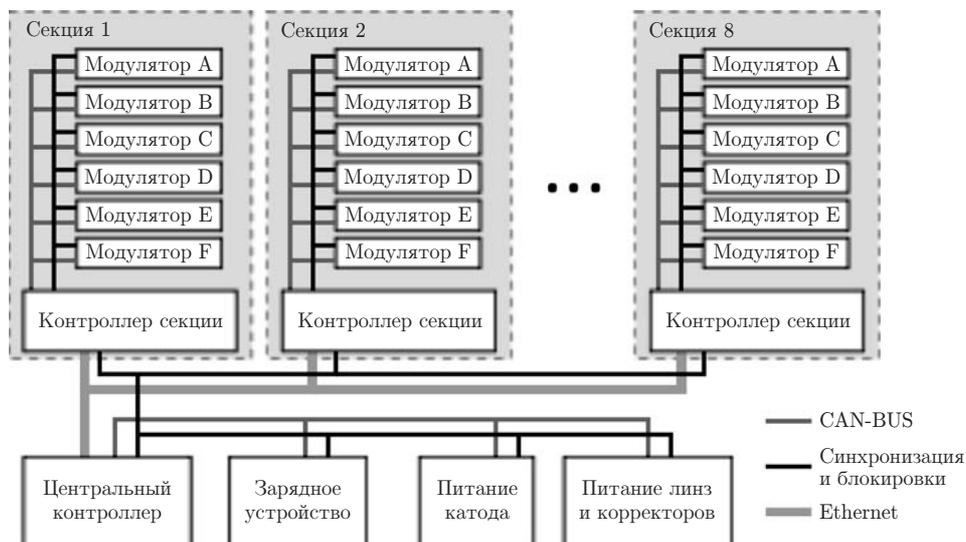


Рис. 3. Структура системы управления

Контроллеры секций обмениваются данными с центральным контроллером посредством сети Ethernet. На начальном этапе запуска ускорителя авторы применили обычные экранированные линии связи категории 5Е. В то же время в конструкции контроллера секции предусмотрена возможность установки медиаконвертера и использование оптического кабеля для передачи данных.

Во время быстрой фазы работы управление установкой осуществляется аппаратным образом и для взаимодействия между центральным контроллером и контроллерами секций используются сигналы синхронизации и блокировок.

В связи с экспериментальным характером установки следовало предусмотреть возможность переконфигурирования системы. Поэтому аппаратно система управления базируется на современном широко распространённом магистрально-модульном стандарте CompactPCI. Периферийные контроллеры встраиваются в стойку с мощными высоковольтными устройствами (рис. 4). Решение широко использовать мезонинные платы в стандарте PMC (PCI Mezzanine Card), устанавливаемые в CompactPCI-носители, позволяет минимизировать габариты крейта с модулями, что может при необходимости облегчить их размещение в экранированных боксах.

Рассматривая различные возможности оснащения системы автоматизации ЛИУ аппаратными средствами, авторы посчитали самостоятельную разработку носителей мезонинных плат, цифровых регистраторов сигналов, программируемых линий задержки, вспомогательных модулей наиболее целесообразным способом решения задачи. Для этого были приобретены модули процессора и мезонинные платы CAN-адаптеров. Такой подход обладает следующими преимуществами:

1. Экономической целесообразностью: стоимость близких по параметрам моделей, например Agilent Technologies Acqiris U1066A-002c<sup>1</sup>, находится в диапазоне 8000–12000 долларов. Учитывая, что необходимо более 100 подобных модулей, самостоятельная разработка не представляется слишком дорогой.

2. Возможностью усовершенствования разработанной аппаратуры в целях повышения живучести. Электронные устройства, о которых идёт речь, имеют непосредственную связь с мощными высоковольтными элементами, поэтому вероятность повреждений при

<sup>1</sup> <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-35502.733410.00&lc=rus&cc=RU>

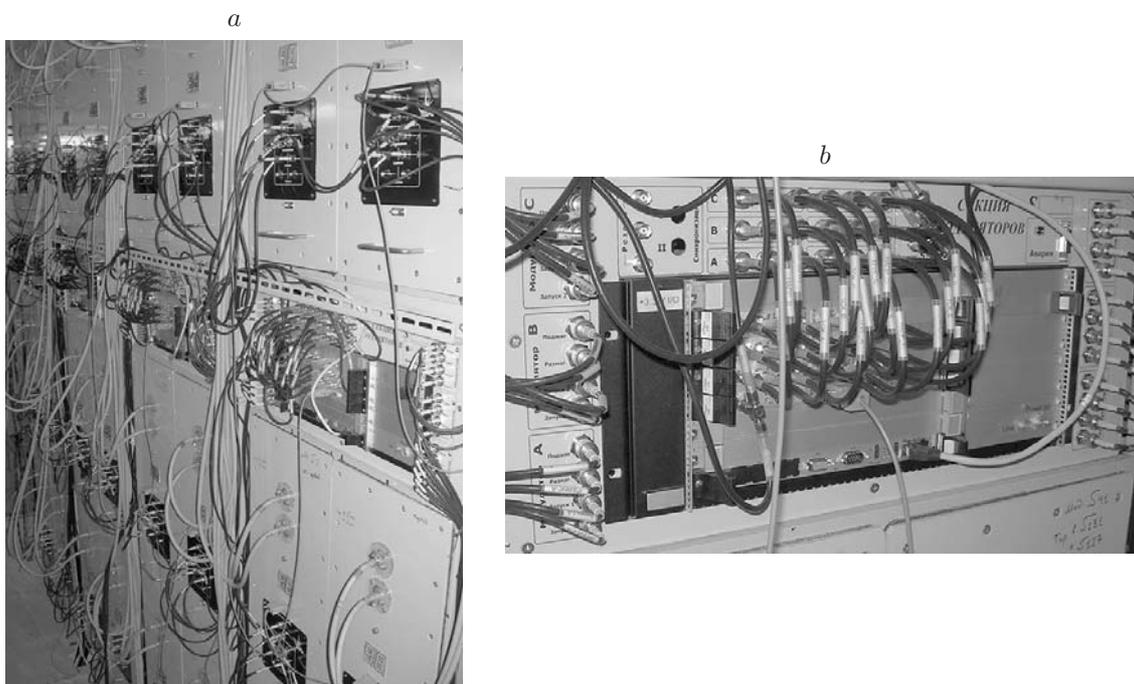


Рис. 4. Общий вид аппаратуры: секции модуляторов (а) и контроллер секции (б)

высоковольтных пробоях, особенно на этапе наладки ускорителя, достаточно высока. Самостоятельная разработка позволяет вводить в схемы необходимые изменения и довести стойкость устройств до нужных показателей.

3. Созданное оборудование, основанное на современных стандартах, можно применять при построении и модернизации систем управления в ИЯФ СО РАН. Кроме того, молодым сотрудникам предоставляется возможность пройти школу создания сложных современных электронных устройств и систем.

Далее опишем как отдельные подсистемы, так и входящие в их состав устройства.

2.1. *Процессоры и периферийные устройства.* К процессорному модулю не предъявляется особых требований по быстродействию и объёму памяти, поэтому основными критериями выбора являлись стоимость и надёжность. Во всех крейтах используется процессорный модуль Kontron CP-6000 с процессором Pentium M 2.16, 512 Мбайт ОЗУ, двумя Ethernet- и двумя USB-портами. На CompactFlash-памяти объёмом 4 Гбайта, сконфигурированной в режиме «только чтение» (read-only), находятся операционная система и управляющее программное обеспечение. В качестве носителей мезонинов РМС используется модуль, разработанный в ИЯФ СО РАН. CAN-мастером служит плата TEWS TPMC810-10 с двумя независимыми гальванически изолированными CAN-портами.

Носитель мезонинов представляет собой 6U-модуль и может нести до 2 РМС-плат. Логика работы устройства реализует микросхема PCI2050 (фирмы "Texas Instruments", США) — прозрачный мост, образующий свой сегмент шины PCI для двух РМС-плат. Устройство поддерживает только 32-битовое исполнение шины PCI на частоте 33 МГц. Контакты РМС-разъёмов выведены на RIO (Rear Input/Output) CompactPCI в соответствии со спецификацией.

2.2. *Управление модуляторами.* Кроме высоковольтных элементов каждый модулятор содержит микроэлектронные управляющие блоки (рис. 5): два блока запуска, управляющие тиратронами, блок размагничивания и устройство блокировок и сигнализации (УБС). Все управляющие блоки связаны с помощью внутренней шины CAN, УБС является веду-

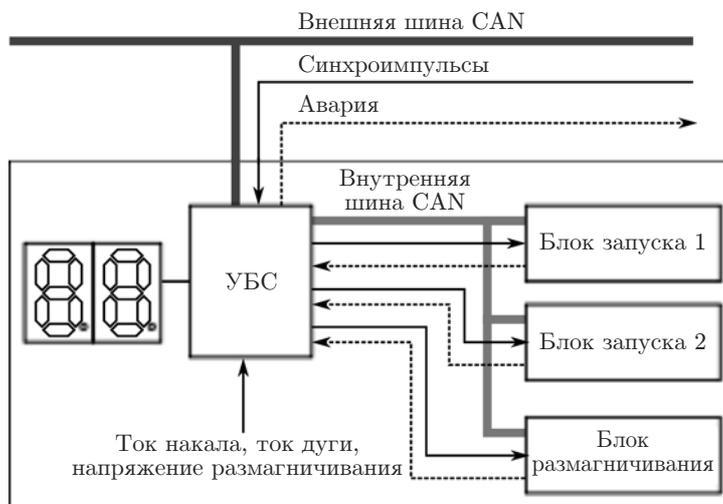


Рис. 5. Управление модуляторами

щим устройством. Для передачи синхроимпульсов и блокировок используется отдельный набор линий.

Встроенные в модуляторы микроэлектронные блоки наиболее подвержены влиянию наводок и воздействию пробоев, так как расположены вблизи силовых элементов. Для устранения влияния негативных внешних воздействий принят комплекс мер по конструктивному исполнению и экранированию устройств. Однако даже после принятия этих мер происходят сбои в работе процессоров управляющих блоков. Поэтому настройки всех управляющих блоков хранятся в перепрограммируемых ПЗУ и считываются оттуда при перезагрузке процессора по сторожевому (watchdog) таймеру.

УВС проводит измерение следующих параметров: тока накала генератора водорода тиратрона, тока дуги разряда тиратрона и напряжения размагничивания. Кроме того, оно собирает и обрабатывает блокировки и сигнализирует о внутреннем состоянии модулятора по внешней шине CAN и аппаратно посредством сигнала «Авария». Вывод данных о режиме функционирования на два семисегментных индикатора позволяет контролировать состояние модулятора даже при отключённой шине CAN и диагностировать возможные неисправности.

УВС осуществляет сбор и обработку блокировок двух типов. Первый из них — блокировки, необходимые в подготовительной фазе, информация о которых поступает по шине CAN. Допустимое время реакции на появление блокировки такого типа составляет 50 мс. Они обрабатываются микроконтроллером ARM7 под управлением операционной системы реального времени Keil RTX.

Второй тип — блокировки, которые могут появиться в рабочей фазе, время реакции на них должно составлять менее 1 мкс. Блокировки собираются по отдельным сигнальным линиям от компараторов в блоках управления. Для их обработки используется ПЛИС.

2.3. *Синхронизация и блокировки.* Система синхронизации имеет двухступенчатую структуру. Первую ступень образует медленная линия задержки и кабельные трассы синхронизации, проходящие через все модуляторные стойки, как показано на рис. 6. Назначение этой ступени — раздать общие сигналы синхронизации секциям модуляторов, зарядному устройству, импульсным корректорам, инициатору опыта ГСО, регистрирующей аппаратуре и детекторам. Линия задержки расположена в центральном крейте и перестраивается с дискретностью 80 нс.

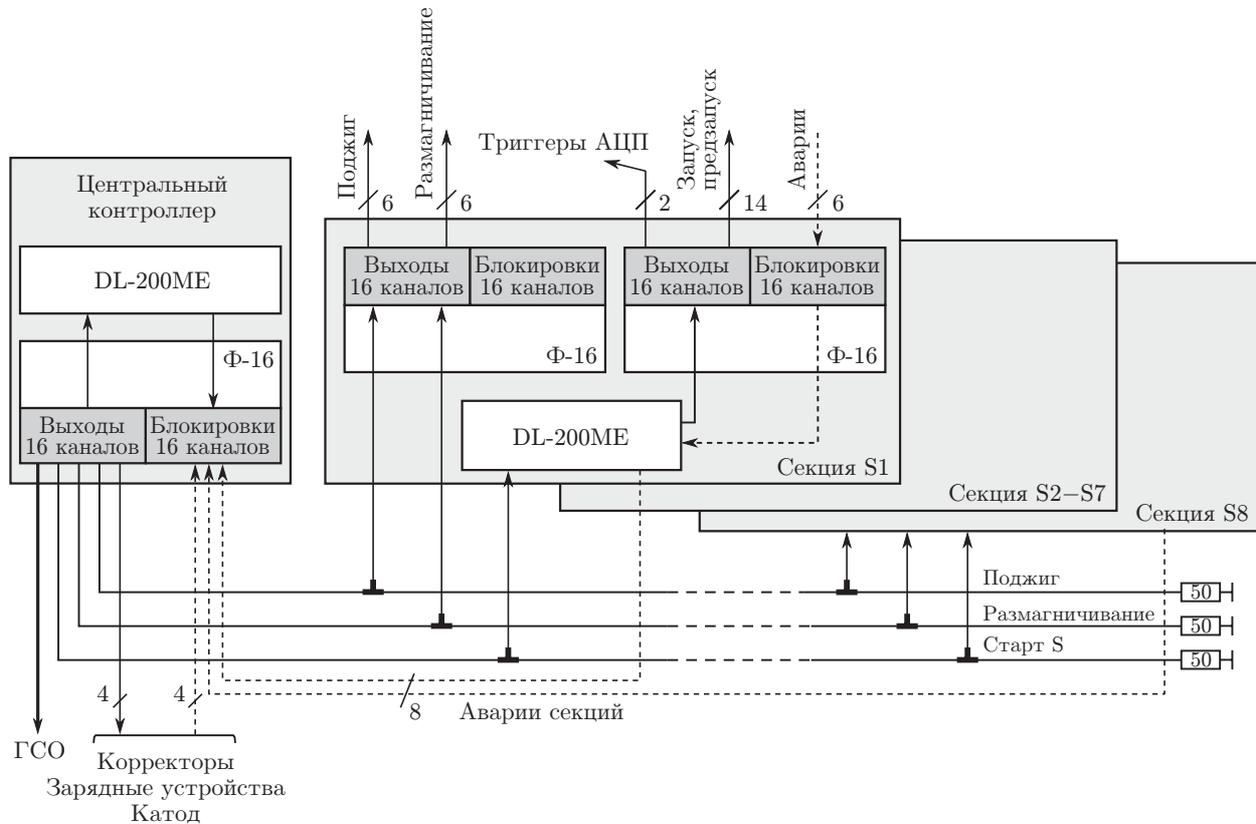


Рис. 6. Схема синхронизации

Входы синхронизации в контроллерах секций имеют большое сопротивление и не нагружают кабельную линию, вследствие чего отражения от ответвлений незначительны. Кабели синхронизации согласуются на дальнем от источника конце.

Сигналы синхронизации выдаются в виде импульсов тока с амплитудой 200 мА, длительностью 1 мкс и передним фронтом 10 нс. Предполагалось, что такой мощный импульс (10 В на сопротивлении 50 Ом) сделает работу системы синхронизации надёжной и позволит отказаться от оптических линий запуска территориально рассредоточенных секций.

Вторая ступень системы синхронизации — это быстрые линии задержки, имеющие квант перестройки 5 нс и размещённые в каждой модуляторной секции. Работа второй ступени инициируется сигналом «Старт секций», генерируемым центральным контроллером примерно за 1 мкс до пучка и поступающим на запускающие входы быстрых линий задержки. Назначение этой ступени — точная подстройка моментов срабатывания тиратронов в секции.

Для системы синхронизации и блокировок разработано два модуля: цифровая линия задержки со встроенной логикой блокировок DL-200ME (две модификации) и формирователь/размножитель синхроимпульсов Ф-16, выполненный в формате CompactPCI RIO module. Основные характеристики модификаций линий задержки DL-200ME приведены в табл. 1.

Синхросигналы с платы DL-200ME усиливаются в формирователе Ф-16. Выходы этого модуля представляют собой гальванически изолированные генераторы тока с амплитудой 200 мА. Формирователь Ф-16 может работать и без DL-200ME, усиливая сигналы, поданные на соответствующие входы, и размножая их по 16 направлениям. Такой режим его работы применяется для раздачи синхросигналов, не требующих регулировки задержек.

Таблица 1

| Параметры                | DL-200ME (быстрая) | DL-200ME (медленная) |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Канал                    | 16                 | 16                   |
| Дискретность             | 5 нс               | 80 нс                |
| Диапазон регулировки     | 163,8 мкс (15 бит) | 671 мс (23 бита)     |
| Джиттер                  | < 0,5 нс           | < 2 нс               |
| Входы блокировок         | 16                 | 16                   |
| Выходы сигналов «Авария» | 2                  | 2                    |

Основной задачей системы блокировок является запрет подачи импульса ГСО в случае некорректной работы установки (преждевременный пробой тиратрона, отсутствие зарядного напряжения, отсутствие тока в корректорах, и т. д.). Для решения данной задачи каждое оконечное устройство выдаёт сигнал «Авария». Эти сигналы заводятся на оптически развязанные каналы блокировок в DL-200ME. Логика работы блокировок реализована с помощью ПЛИС, что позволяет при необходимости её изменять.

Сигналы об аварии с модуляторов собираются в секции DL-200ME, где по схеме «ИЛИ» формируется сигнал «Авария секции». Эти сигналы собираются на DL-200ME в центральном крейте, как и сигналы «Авария» с зарядных устройств, источников питания корректоров и катода. Авария на любом устройстве приводит к запрету выдачи всех последующих импульсов синхронизации.

2.4. *Подсистема регистрации осциллограмм.* Для анализа надёжности ускорителя необходимо зарегистрировать, обработать и сравнить с шаблонами около 200 осциллограмм. Все регистрируемые осциллограммы можно разделить на физические и технологические. К физическим, длительность которых составляет несколько сотен наносекунд, относятся токи и напряжения индукторов, а также сигналы с системы диагностики пучка. Эти осциллограммы характеризуют функционирование установки в целом (рис. 7).

Для получения качественного пучка нестабильность ускоряющего напряжения на трубке, складывающегося из напряжений на индукторах, должна быть на уровне 1 %, вследствие чего погрешность регистрации формы не должна превышать 0,1–0,2 %. Поэтому 12-разрядный преобразователь, обладающий эффективной разрядностью 10 бит в поло-

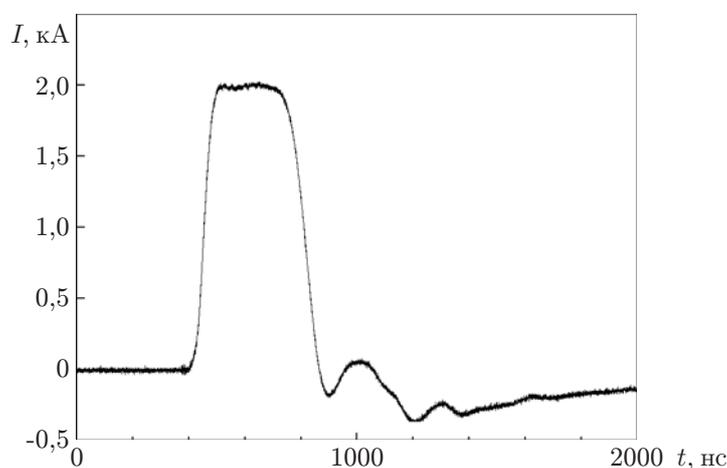


Рис. 7. Осциллограмма импульса тока на индукторе

Таблица 2

| Параметры             | ADC-200ME  | ADC-812ME  |
|-----------------------|------------|------------|
| Синхронные каналы     | 2          | 8          |
| Разрядность           | 12         | 12         |
| Частота дискретизации | 200 МГц    | 4 МГц      |
| Память (слов)         | 1 М × 2    | 125 К × 8  |
| Ошибка нуля           | < 1 мл. р. | < 1 мл. р. |
| Ошибка масштаба       | < 2 мл. р. | < 2 мл. р. |

*Примечание:* мл. р. — младший разряд.

се частот 30 МГц и производительностью 200 MSPS (Mega Sample per Second), вполне адекватен задаче. Для осциллографии быстрых сигналов был разработан и изготовлен регистратор ADC-200ME в стандарте PMC. Характеристики устройства приведены в табл. 2, а общий вид показан на рис. 8.

К технологическим относятся сигналы токов размагничивания, напряжения на формирующих линиях и зарядном устройстве. Эти сигналы используются для контроля корректности работы модуляторов. Медленные осциллограммы записываются посредством 8-канального цифрового регистратора ADC-812ME (см. табл. 2 и рис. 8). Для ADC-812ME разработан RИО-модуль, с помощью которого удобно собирать все сигналы с модуляторов на заднюю панель крейта.

Как в ADC-200ME, так и в ADC-812ME встроены узлы, позволяющие измерять и программно корректировать ошибку нуля и масштаба преобразования. Такое решение обеспечивает статические погрешности устройств на уровне  $\pm 0,05\%$ , оказывающие влияние

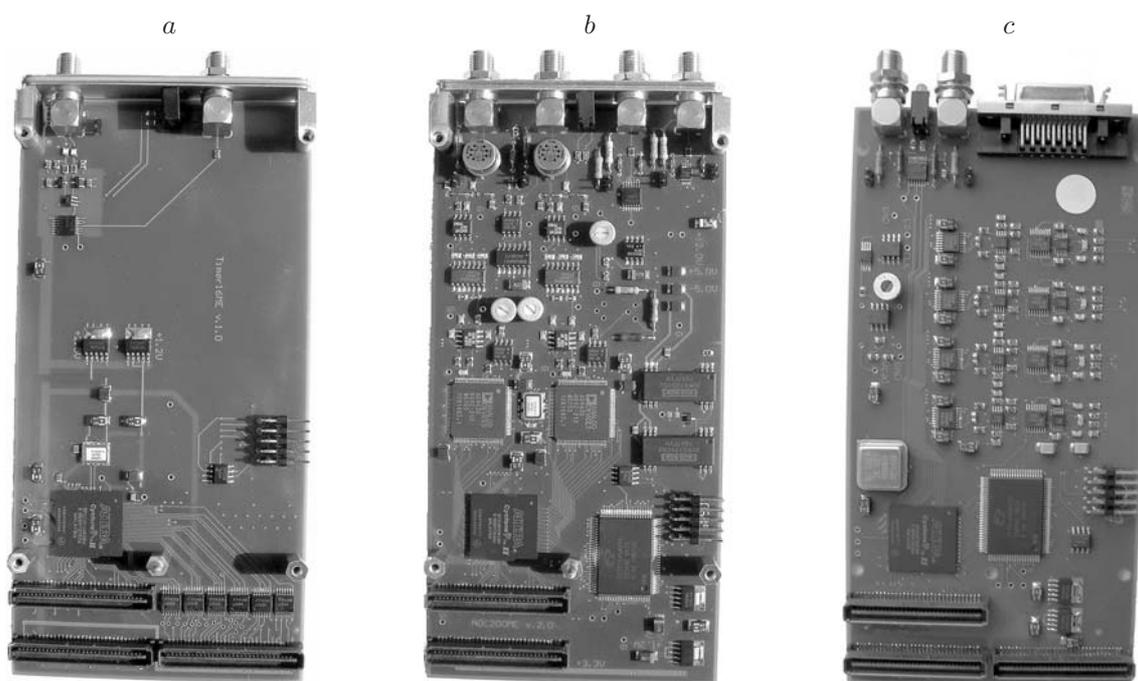


Рис. 8. Фотографии разработанных PMC-модулей: DL-200ME (a), ADC-200ME (b), ADC-812ME (c)

на суммарную погрешность регистраторов формы прежде остальных факторов.

**3. Запуск системы управления и полученные результаты.** В мае 2010 г. была собрана и запущена тестовая версия системы управления, включающая центральный контроллер и одну модуляторную секцию. Такая конфигурация длительное время испытывалась с номинальными уровнями напряжений и токов [7]. Так как принципиальных проблем выявлено не было, началась сборка всей системы, что позволило в октябре 2010 г. приступить к её полномасштабному запуску. Параллельно налаживались и тестировались секции модуляторов и ускорительная структура установки. В ноябре 2010 г. все пусконаладочные работы были завершены, и вскоре на установке получили проектные параметры пучка. На основании выполненных работ сделаны следующие выводы:

1. Распределённая структура системы автоматизации, использующая встроенные в высоковольтные импульсные элементы интеллектуальные управляющие устройства, жизнеспособна и надёжна. За время пусконаладочных работ неоднократно случались высоковольтные пробои, но ни одной остановки процессора контроллеров секций не зарегистрировано.

2. Разработанная и изготовленная аппаратура обладает нужными характеристиками и живучестью. Как в штатном режиме, так и при высоковольтных пробоях не обнаружено сбоев или выходов из строя в линиях задержки и в цифровых регистраторах, непосредственно контактирующих с элементами модуляторов.

3. Некоторые проблемы наблюдались при отладке двухимпульсного режима. Они проявлялись в том, что высоковольтные пробои, возникавшие при генерации первого пучка, провоцировали несанкционированный запуск второго пучка. Для решения проблемы кабельные трассы, линии задержки и формирователи, использующиеся для синхронизации, потребовали доработки и изменения схем заземления.

**Заключение.** В данной работе представлена созданная и введённая в эксплуатацию распределённая система управления мощным импульсным ускорителем, базирующаяся на аппаратуре выполненной в стандарте Compact PCI.

Особенность системы в том, что управляющие и измерительные микроэлектронные устройства встроены в мощные высоковольтные импульсные генераторы. Для оснащения системы аппаратными средствами созданы несколько типов микроэлектронных модулей, часть из которых являются специализированными, а остальные могут использоваться как универсальные РМС-платы.

Опыт, полученный в процессе создания и эксплуатации системы управления ЛИУ-2, будет востребован при разработке более мощного радиографического комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ecdahl C.** Modern electron accelerators for radiography // Proc. of the IEEE Pulsed Power Conference. Las Vegas, USA, 2001. Vol. 1. P. 29–34.  
URL: <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00789151.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).
2. **Burns M. J., Carlsten B. E., Davis H. A. et al.** Status of the DARHT phase 2 long-pulse accelerator // Proc. of the Particle Accelerator Conference. Chicago, USA, 2001. P. 325–330.  
URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p01/PAPERS/WOAA008.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).
3. **Ong M., Avasle C., Richardson R., Zentler J.** LLNL flash X-ray radiography machine (FXR) double-pulse upgrade diagnostics // Proc. of the IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, USA, 1997. Vol. 1. P. 430–436.  
URL: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/632503-11SvCz/webviewable/632503.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).

- 
4. **Mouillet M., Boivinet R., Bombardier F. et al.** First results of the AIRIX induction accelerator // Proc. of the XX Intern. Linac Conference. Monterey, USA, 2000. P. 491–493.  
URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/100/papers/TUC02.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).
  5. **Archuleta R., Sanchez L.** The DARHT data acquisition, archival, analysis and instrument control system (DAAAC), and network infrastructure // Proc. of the XXIV Linear Accelerator Conference. Victoria, Canada, 2008. P. 337–339.  
URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC08/papers/mop112.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).
  6. **Delvaux J., Merle E., Mouillet M. et al.** RBF neural net based classifier for the AIRIX accelerator fault diagnosis // Proc. of the XX Intern. Linac Conference. Monterey, USA, 2000. P. 488–490. URL: <http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/TUC01.pdf> (дата обращения: 14.03.2011).
  7. **Батраков А. М., Логачёв П. В., Павленко А. В. и др.** Система автоматизации линейного индукционного ускорителя рентгенографического комплекса // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2010. **5**, вып. 3. С. 98–105.

*Поступила в редакцию 14 марта 2011 г.*

---