

УДК 681.5.08, 681.518.3, 681.518.5

**А. М. Батраков, П. В. Логачёв, А. В. Павленко,  
В. Я. Сазанский, Г. А. Фатькин**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: G.A.Fatkin@inp.nsk.su

### **СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

В работе рассматривается структура и аппаратные средства системы автоматизации строящегося в ИЯФ СО РАН рентгенографического комплекса для импульсной рентгеновской фотографии. Особенности системы управления являются: большое количество управляющих и измерительных каналов, наносекундные времена основных процессов, работа в условиях мощных импульсных наводок от высоковольтных устройств установок.

*Ключевые слова:* система автоматизации, индукционный ускоритель, CompaqPCI, АЦП, цифровая линия задержки.

#### **Введение**

В последнее время активно развивается импульсная рентгеновская фотография (Flash X-Ray Radiography). Несмотря на значительную стоимость разработки, создания и эксплуатации мощных импульсных источников рентгеновского излучения, количество подобных установок увеличивается [1]. При практическом применении скоростной рентгеновской съемки часто ставится задача получения нескольких снимков быстротекущего процесса с небольшими временными интервалами. Примерами существующих импульсных рентгенографических установок могут служить DARHT (Dual-Axis Radiographic Hydrodynamic Test) [2; 3], FXR [4], США, и AIRIX [5], Франция.

В настоящий момент в ИЯФ СО РАН создается линейный индукционный ускоритель (ЛИУ) для рентгенографического комплекса, представляющий собой мощную импульсную установку, генерирующую на конвертор пучок электронов с энергией 2 МэВ, током 2кА, длительностью около 300 нс и предусматривающую работу с двумя импульсами с интервалом между ними 2–10 мкс. Следует отметить, что для получения хорошего рентгеновского изображения необходимо обеспечивать качественный

пучок с определенным диаметром фокусного пятна и углом сходимости пучка на мишени, а также синхронизацию импульса излучения относительно заданного момента в регистрируемом процессе.

Получение пучка необходимого качества, чего требует специфика проводимых экспериментов, не представляется возможным без создания соответствующей автоматизированной системы управления. При ее создании решались следующие задачи.

1. Выработка и оптимизация структуры системы управления.

2. Изучение возможностей встраивания сложных, многофункциональных, интеллектуальных элементов управления непосредственно в мощные высоковольтные импульсные устройства.

3. Самостоятельная разработка и производство в необходимых объемах ряда электронных устройств, что сделало бы построение системы управления реальной с коммерческой точки зрения.

#### **Структура и рабочий цикл установок**

Структура ускорителя образована цепочкой ускоряющих ячеек (индукторов), диода с диспенсерным катодом и фокусирующих линз. Полное ускоряющее напряжение со-

ставляет 2 МВ. Первая ступень оптической системы – диод, к которому приложено напряжение 1 МВ. Далее пучок попадает во вторую ступень с напряжением 1 МВ, приложенным к ускорительной трубке. После выхода из ускоряющего поля пучок фокусируется импульсными магнитными линзами (корректорами). Положение и ток пучка измеряется с помощью широкополосного пикап-электрода.

Напряжение на катодном узле и ускорительной трубке формируется двумя сборками по 48 индукторов. Каждый индуктор представляет собой сердечник с объемным витком образующим первичную обмотку, а электронный пучок образует вторичную обмотку импульсного трансформатора. Электроды ускорительной трубки формируют ускоряющее электрическое поле. Энергия, приобретаемая частицами пучка, соответствует сумме напряжений на первичных обмотках индукторов, таким образом, увеличение энергии ускорителя достигается наращиванием числа ускоряющих ячеек.

Импульсное напряжение на индукторах (в первичной обмотке) создается источниками-модуляторами. Каждый модулятор обеспечивает работу двух параллельно включенных индукторов (рис. 1) в двухимпульсном режиме и содержит генератор тока размагничивания, переводящий материал сердечника в область отрицательного насыщения; две формирующие линии; два

водородных тиратрона и управляющую электронику. Конструктивно модуляторы сгруппированы по 6 в стойку-секцию и размещены вдоль ускорителя. Напряжение на формирующих линиях составляет 45 кВ и создается общим зарядным устройством, к которому параллельно подключены все модуляторы.

Форма импульса тока, снимаемая на индукторе, представлена на рис. 2. Основное влияние на пучок оказывает нестабильность вершины импульса напряжения на индукторе. Для получения качественного пучка желаемая нестабильность должна быть менее 1 %, предельно допустимая – 3 %. Также большое влияние на пучок оказывает синхронность появления напряжений на индукторах.

В связи со сложностью подготовки объекта исследования к опыту и высокой стоимостью эксперимента, принципиальное значение в проектируемой установке придается надежности работы ускорителя, подразумевающей не только функционирование без сбоев, но и надлежащее качество пучка. В этой связи работу установки планируется осуществлять следующим образом: перед экспериментом проводится большое количество «холостых» выстрелов, во время которых набирается статистика по параметрам пучка и поведению всех компонентов ускорителя, при надежной работе и удовлетворительном качестве пучка производится эксперимент.

Секция модуляторов (6 модуляторов на 12 индукторов)

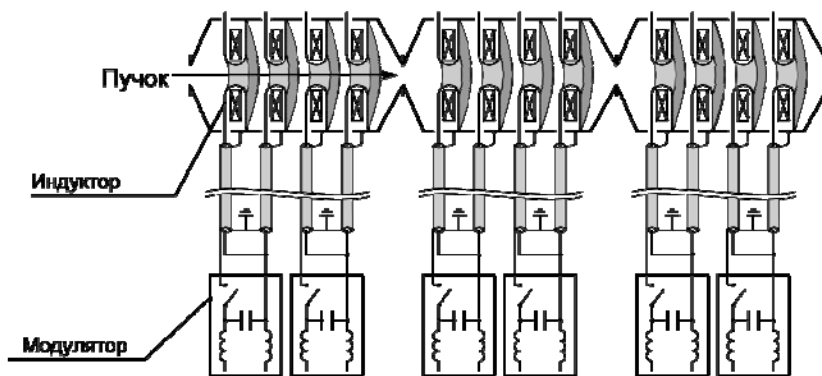


Рис. 1. Схема подключения секции модуляторов к индукторам

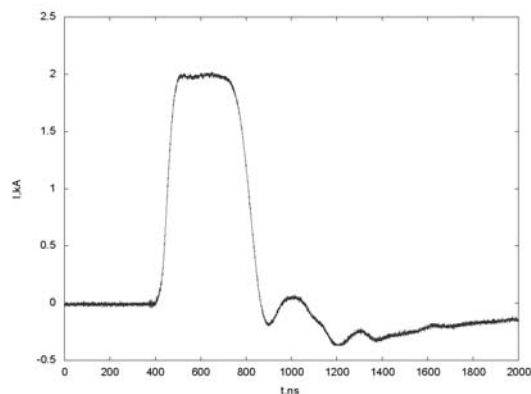


Рис. 2. Форма импульса тока на индукторе

В рабочем цикле установки можно выделить две основных фазы: медленную и быструю. Медленная фаза длится 20–40 мс и начинается с подачи напряжения на дугу генератора водорода в тиратроне (сигнал «Поджиг»). Во время медленной фазы заряжаются формирующие линии модуляторов, отключается накал катода, включается магнитное поле в корректорах. Быстрая фаза начинается с размагничивания индукторов и заканчивается генерацией пучка (или двух пучков, разнесенных по времени на 10 мкс). Ее длительность составляет около 150 мкс.

### Система управления

Основными задачами системы управления являются:

- подготовка элементов установки, выполняемая в медленной фазе;
- генерирование импульсов запуска, инициирующих работу импульсных устройств как в быстрой, так и в медленной фазе;
- регистрация сигналов, характеризующих работу ускорителя в целом и отдельных элементов
- запрет эксперимента в случае нештатной работы.

Рассмотрим вначале структуру управления одной секции, включающей, как отмечалось выше, 6 модуляторов. Каждому из них требуется 6 запускающих импульсов для работы в двухимпульсном режиме. Регистрация и анализ осциллограмм напряжения на формирующей линии, тока размагничивания, напряжения и тока индукторов позволяют следить за нормальным функ-

ционированием модуляторов. Установка режимов работы тиратронов (ток размагничивания, ток накала...) производится при помощи встроенной в модулятор электроники с CAN-интерфейсом.

Таким образом, для управления одной секцией необходимы: CAN-модуль для управления электроникой модуляторов; регистраторы формы импульсных сигналов; цифровые линии задержки для генерации синхроимпульсов и размножители общих синхроимпульсов установки.

Рассмотрим теперь структуру системы управления всей установкой. Большое количество управляющих (36 на секцию, 288 на ускоритель) и измерительных (24 на секцию, 192 на ускоритель) каналов для модуляторов делают нецелесообразным подключение их к единому управляющему компьютеру. Кроме того, в связи с требованием к синхронности процессов не хуже 10 нс, влияние оказывают длины кабелей, по которым передаются управляющие импульсы. Логичным решением в таком случае является распределение элементов системы управления вдоль установки.

Структура системы управления изображена на рис. 3. В каждой секции располагается комплект аппаратуры, состоящий из устройств, необходимых для управления секцией. Для реализации такой распределенной структуры в состав аппаратуры секции необходимо включить процессорный модуль со средствами связи с главным контроллером системы управления. Будем называть такой комплект аппаратуры контроллером секции.

Контроллеры секций обмениваются данными с главным контроллером посредством сети Ethernet. Во время быстрой фазы работы для взаимодействия между главным контроллером и контроллерами секций используются сигналы синхронизации и блокировок, управление установкой осуществляется аппаратным образом. Главный контроллер также обеспечивает связь с ЭВМ оператора, управление (по CAN-BUS) зарядными устройствами, питанием катода, токами корректоров.

При добавлении новых ускоряющих секций система управления легко может быть расширена увеличением количества контроллеров секций.

Стоит заметить, что при расположении контроллера в модуляторной стойке возни-

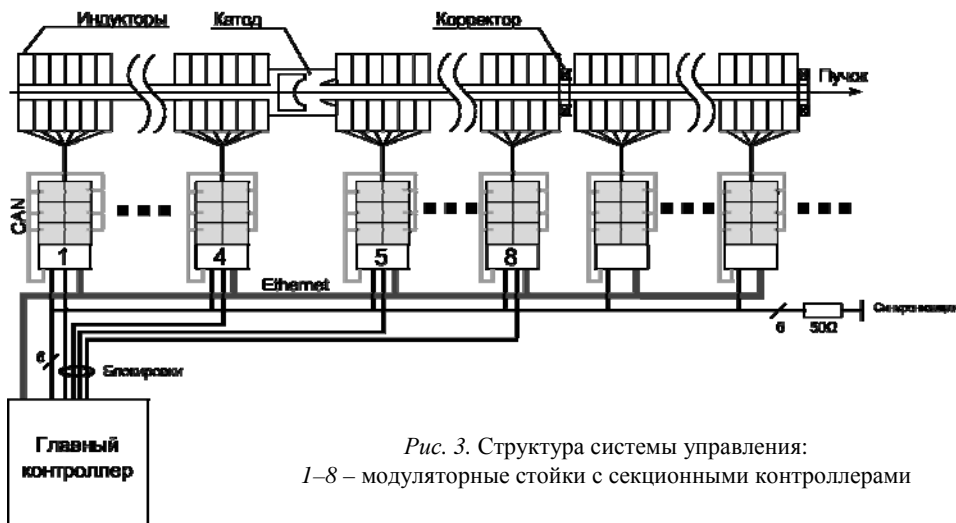


Рис. 3. Структура системы управления:  
1–8 – модуляторные стойки с секционными контроллерами

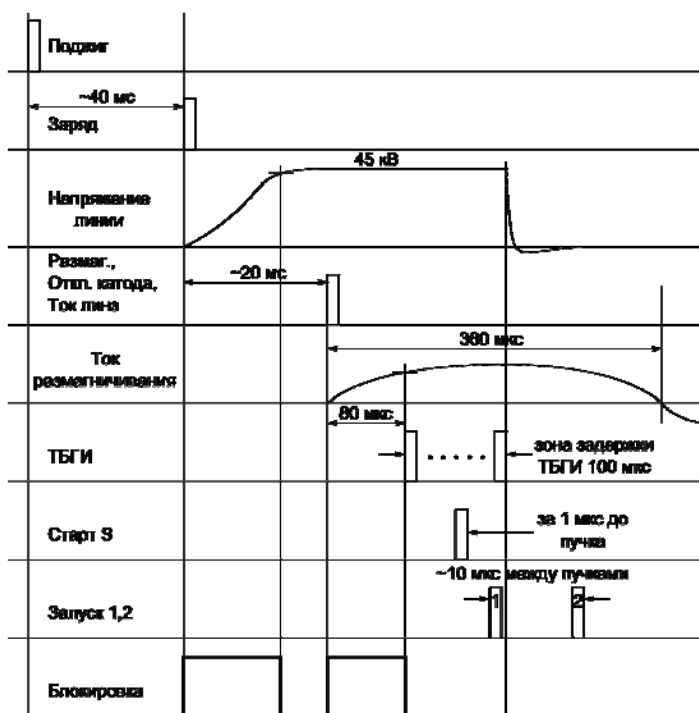


Рис. 4. Временная диаграмма синхроимпульсов и блокировок в случае успешного выстрела (масштаб по времени не сохранен)

кает вопрос о правильной работе управляющей электроники при высоковольтных разрядах поблизости, а также о сохранении ее работоспособности при пробоях.

### Синхронизация и блокировки

Мощная электроника модуляторов имеет заметный разброс во времени срабатывания, что приводит к необходимости подстраивать запускаящие сигналы с точностью до 10 нс для синхронного появления ускоряющего напряжения на всех индукторах. Все

остальные запускаящие импульсы достаточно синхронизовать с точностью около 100 нс. Быстрые синхроимпульсы формируются в контроллерах секций с привязкой к единому сигналу «Старт секций». Медленные синхроимпульсы формируются в главном контроллере и при необходимости размножаются в периферийных.

Временная диаграмма импульсов запуска, необходимых для работы ЛИУ, изображена на рис. 4. С завершением подготовительных операций активная фаза работы установки начинается с подачи главным

контроллером по программному каналу стартовой команды системе синхронизации. После получения команды с привязкой к фазе промышленной электросети системой синхронизации генерируется импульс «Поджиг», инициирующий подачу напряжения накала на генераторы водорода тиратронов. Этот импульс размножается в каждой секции и передается модуляторам. Затем примерно через 40 мс на зарядные устройства подается импульс «Заряд», и начинается заряд линий. После достижения номинального напряжения (~ 45 кВ) подаются импульсы «Отключение катода», «Ток линз», «Размагничивание». По импульсу «Размагничивание» в модуляторах запускаются генераторы тока размагничивания.

Далее следует быстрая фаза работы ускорителя. Примерно за 1 мкс до пучка формируется сигнал «Старт секций», подаваемый на каждую секцию и запускающий программируемые линии задержки контроллеров секций. По получении этого сигнала программируемые линии задержки периферийных контроллеров генерируют импульсы «Предзапуск» (создающий предварительный разряд) и «Запуск» (инициирующий основной разряд) тиратронов. В зависимости от сценария после первого выстрела могут генерироваться импульсы «Предзапуск» и «Запуск» для второго пучка.

Рассмотрим теперь работу системы блокировок. Основной задачей системы блокировок является запрет стартующего эксперимента импульса ТБГИ в том случае, если какой-то из компонентов ускорителя работает некорректно, что сказывается на качестве пучка и, следовательно, на качестве рентгеновского изображения.

В каждой секции блокировки от всех модуляторов собираются по схеме ИЛИ, и формируется объединенный сигнал «Блокировка секции». Модуляторы устроены таким образом, что подают сигнал блокировки начиная с прихода соответствующего запускающего импульса и снимают его (в случае корректной работы всех компонентов) при достижении определенного значения характеризующего инициированный процесс параметра. К примеру, после получения импульса размагничивания модулятор удерживает «блокировку» до тех пор, пока не будет достигнута необходимая величина тока размагничивания.

Сигналы блокировок секций, а также зарядного устройства, источников питания линз и катода собираются в главном контроллере и запрещают формирование всех последующих импульсов. К примеру, если компаратор зарядного устройства к нужному моменту не обнаружит необходимого напряжения на формирующих линиях, и сигнал блокировки не будет снят, то не будут поданы сигналы «Размагничивание», «Старт Секций» и т. д. Если произошла авария (выставлена блокировка), то дальнейшая работа прекращается аппаратно, а ее причина определяется программно опросом всех устройств по CAN-шине.

### **Подсистема регистрации осциллограмм**

Как уже отмечалось, особенности применения ЛИУ требуют сверхвысокой надежности его работы, что весьма непросто, так как рабочие напряжения и токи силовых элементов достигают 50 кВ и 8кА 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 надежности работы установки и выдачи разрешения на старт в предстоящем рабочем цикле.

Следует заметить, что подход, основанный на регистрации и анализе большого количества осциллограмм при прогнозировании неприятностей, вполне обоснован и применяется на мощных импульсных радиографических установках достаточно часто. Действительно, осциллограммы предоставляют гораздо более полную информацию о процессах, чем, например, измерение амплитуды, длительности, интеграла и т. п., хотя получение осциллограмм достаточно дорого, а их анализ сложен. В качестве примера использования описанного способа можно привести линейный индукционный ускоритель DARHT-II в Лос-Аламосе, где значительную часть аппаратуры составляют регистраторы формы импульсных сигналов

DC271, DC440, DC282, DC271V фирмы «Agilent» [3].

Таким образом, одной из основных частей системы управления является подсистема регистрации осциллограмм, призванная фиксировать, обрабатывать и сравнивать более 180 осциллограмм. Все регистрируемые осциллограммы можно разделить на «быстрые» и «медленные». К «быстрым», длительность которых составляет 50–500 нс относятся токи и напряжения на индукторах, а также сигналы с пучковых датчиков. Для регистрации формы импульсов таких сигналов с погрешностью порядка 0,5 % необходим интервал дискретизации 5 нс.

Сигналы тока индуктора снимаются с вторичной обмотки трансформатора, первичную обмотку которого образует одна из десяти жил высоковольтной трассы, к которой подключен индуктор. Сигналы напряжения снимаются с высоковольтного емкостного делителя, смонтированного непосредственно на индукторе, расстояние от которого до крейта составляет около 15 м (рис. 5). Необходимая точность достигается путем программной фильтрации наводок и коррекции искажений на сигнальных передающих линиях.

К «медленным» сигналам относятся осциллограммы токов размагничивания, напряжения на формирующих линиях, напряжение на зарядном устройстве. Эти сигналы используются для контроля надежности работы модуляторов.

Все полученные осциллограммы должны записываться в архив, и на основании их сравнения между собой можно делать выводы о надежности работы установки.

### Аппаратные средства

Аппаратно система управления базируется на стандартах CompactPCI и PMC (PCI Mezzanine Card). Остановимся на причинах, обусловивших выбор этих стандартов. Разнообразие быстродействующих измерительных и управляющих устройств, которые необходимо собрать в одну систему, ограничивают выбор магистрально модульными стандартами. Далее, выбранный стандарт должен быть широко распространенным и поддерживаемым многими производителями оборудования, что гарантирует покупку необходимых аппаратных средств. Наиболее известными и широко применяе-

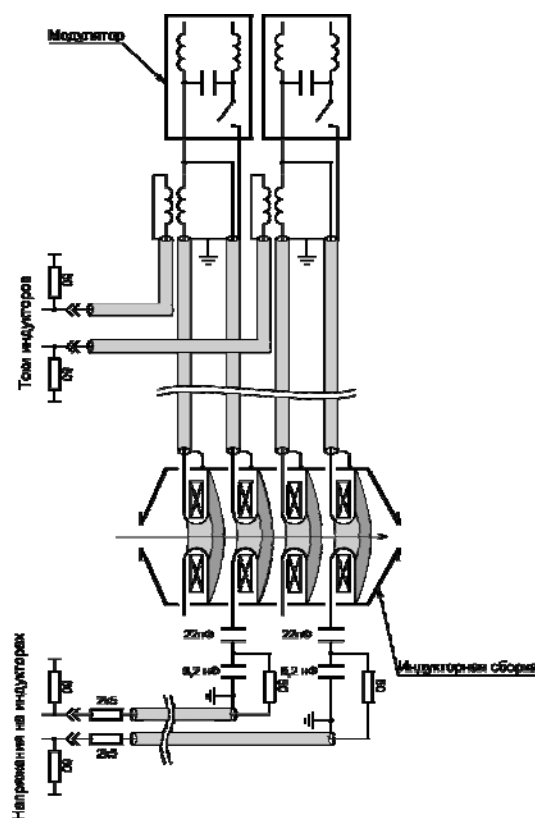


Рис. 5. Схема съема токов и напряжений индукторов

мыми как в научном приборостроении, так и в промышленности являются стандарты VME и Compact PCI. Авторы не рассматривали модульные системы с коммутируемой средой связи как, например, cPCI Express, поскольку пропускной способности классических шин PCI и VME вполне достаточно для системы управления ЛИУ. При окончательном выборе следовало учесть необходимость минимизировать габариты системы управления. Так как ее предполагалось встраивать в стойку с мощными высоковольтными устройствами, малые размеры могли бы облегчить при необходимости размещение крейта с модулями в экранированных боксах. Наиболее адекватно сформулированным требованиям отвечает применение современного стандарта для мезонинных плат, в качестве которого был выбран PMC. Отметим, что оборудование в стандарте PMC можно использовать не только в «родном» конструктиве cPCI, но и в конструктиве VME.

Рассматривая различные возможности оснащения системы автоматизации ЛИУ

аппаратными средствами, авторы посчитали самостоятельную разработку устройств регистрации осциллограмм и таймирования импульсных элементов наиболее целесообразным способом решения задачи. Модуль процессора, связные и интерфейсные устройства было решено приобрести.

Для системы управления в ИЯФ СО РАН были разработаны 4 модуля. Два регистратора формы импульсных сигналов используются для работы с быстрыми и медленными сигналами – ADC200ME и ADC8-12ME соответственно. Оба выполнены в стандарте PMC. Их краткие спецификации приведены в табл. 1. Для многоканального модуля ADC8-12ME предусмотрена возможность ввода сигналов со специальной платы, располагающейся на задней панели (сPCI RIO module).

Таблица 1  
Характеристики регистраторов  
формы импульсных сигналов

Показатель	ADC200ME	ADC8-12ME
Количество синхронных каналов	2	8
Скорость преобразования (MSPS)	200	5
Разрядность (бит)	12	12
Память (бит)	1M × 2 × 12	125K × 8 × 12

Для системы синхронизации и блокировок было разработано два модуля: цифровая линия задержки с встроенной логикой блокировок DL-200ME и формирователь / размножитель синхроимпульсов Ф-16, выполненный в формате сPCI RIO module. Каналы блокировок оптически развязаны. В DL-200ME для реализации логики блокировок используется ПЛИС. Существует две разновидности платы DL-200ME: с дискретностью 5 и 80 нс. Первая используется в секционных крейтах, а вторая – в главном контроллере системы управления для формирования задержек в медленной фазе работы ускорителя. Основные характеристики DL-200ME приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Характеристики цифровой линии  
задержки DL-200ME

Показатель	Значение
Количество каналов	16
Дискретность (нс)	5 (80)
Джиттер (нс)	< 0,5
Разрядность счетчика (бит)	16 (23)
Входов блокировок	16
Выходов «Аварий»	2

Ф-16 без DL-200ME работает как размножитель двух входных сигналов на 8 направлений каждый и используется для выдачи медленных синхроимпульсов всем модуляторам секции. При совместной работе с DL-200ME он используется как формирователь запускающих импульсов.

Во всех крейтах используется процессорный модуль Kontron CP-6000<sup>1</sup>. На 4 GB CompactFlash памяти, сконфигурированной в режиме «только чтение» (read-only), находится операционная система и управляющее программное обеспечение. В качестве носителей мезонинов PMC используется модуль Kontron CP-690HS. CAN контроллером служит плата TEWS TPMC810-10<sup>2</sup>.

### Заключение и выводы

На момент написания статьи собраны и запущены главный контроллер системы и одна модуляторная секция. Такая конфигурация длительное время испытывалась в реальных условиях с номинальными уровнями напряжений и токов индукторов. На основании этих испытаний можно сделать вывод, что распределенная структура системы автоматизации, использующая встроенные в высоковольтные импульсные элементы интеллектуальные управляющие устройства, вполне жизнеспособна и надежна. За время испытаний не зарегистрировано ни одной остановки процессора контроллера секции.

Как в штатном режиме, так и при высоковольтных пробоях не обнаружено сбоев

<sup>1</sup> <http://emea.kontron.com/products>

<sup>2</sup> <http://www.tews.com/>

в линиях задержки DL-200ME и быстром ADC-200ME. Доработки потребовала схема цепей заземления и защиты формирователя Ф-16, так как были зафиксированы выходы из строя нескольких каналов при высоковольтных пробоях внутри модулятора. К настоящему времени изготовлены все РМС-модули линий задержки и быстрых АЦП. Заканчивается производство ADC8-12ME и формирователей. Разработанная аппаратура вполне технологична, а ее параметры воспроизводимы в серийном производстве.

Автоматизированная система управления в настоящий момент разворачивается по мере сборки ускорителя.

### Список литературы

1. *Edahl C.* Modern Electron Accelerators for Radiography // Proc. 2001 IEEE Pulsed Power Conference. Las Vegas, NV, 2001.

2. *Burns M. J. et. al.* Status of the DARHT Phase 2 Long-Pulse Accelerator // Proc. Particle Accelerator Conference. Chicago, IL, 2001. P. 325–330.

3. *Archuleta R., Sanchez L.* The DARHT Data Acquisition, Archival, Analysis and Instrument Control System (DAAAC), And Network Infrastructure // Proc. XXIV Linear Accelerator Conference. Victoria, Canada, 2008. P. 337–339.

4. *Ong M. et. al.* LLNL Flash X-Ray Radiography Machine (FXR) Double-Pulse Upgrade Diagnostics // Proc. 1997 IEEE Pulsed Power Conference. Baltimore, MA, USA, 1997. P. 430–436.

5. *Mouillet M. et. al.* First Results of the AIRIX Induction Accelerator // Proc. XX International Linac Conference. Monterey, California, 2000. P. 491–493.

*Материал поступил в редколлегию 24.07.2010*

**A. M. Batrakov, P. V. Logatchev, A. V. Pavlenko, V. Ya. Sazansky, G. A. Fatkin**

### THE CONTROL SYSTEM OF LINEAR INDUCTION ACCELERATOR FOR X-RAY RADIOGRAPHY

The structure and hardware of control system for flash X-Ray radiography complex currently under construction in BINP, SB RAS are discussed in this paper. Special features of this control system are: high amount of channels, nanosecond times of main processes, work in environment of powerful noises from pulsed high-voltage devices.

*Keywords:* control system, induction accelerator, CompactPCI, ADC, digital delay line.