

КОМПЛЕКС ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФИИ УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-20

© 2021 г. П. А. Бак^а, А. М. Батраков^а, Е. А. Бехтенёв^а, М. Ю. Васильев^{а,б},
К. И. Живанков^а, Е. С. Котов^{а,б}, Я. М. Мачерет^{а,б,*}, А. В. Павленко^а,
О. А. Павлов^а, А. И. Сенченко^а, С. С. Середняков^а, Г. А. Фатькин^{а,б}, К. С. Штро^{а,б}

^а Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^б Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

*e-mail: Ya.M.Macheret@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.

После доработки 06.09.2020 г.

Принята к публикации 08.09.2020 г.

Описывается осциллографический комплекс линейного индукционного ускорителя, предназначенного для рентгенографических экспериментов. Оборудование комплекса позволяет регистрировать осциллограммы сотен импульсных сигналов, лежащих в диапазоне времен от десятков наносекунд до десятков миллисекунд, что предоставляет исчерпывающую информацию о работе ускорителя. Рассматривается широкий круг вопросов, посвященных архитектуре осциллографического комплекса, типам первичных датчиков, способам передачи аналоговых сигналов с малым уровнем искажений, аппаратным и программным средствам, методикам работы с зарегистрированными данными.

DOI: 10.31857/S0032816221020014

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН создается ускоритель ЛИУ-20, предназначенный для импульсной рентгенографии высокого разрешения. Специфика проводимых экспериментов требует высокой надежности работы рентгенографической установки, что невозможно без соответствующих систем контроля ее текущих параметров.

Для мощных импульсных высоковольтных установок, к которым относится и создаваемый ускоритель, осциллографический мониторинг, т.е. регулярная регистрация осциллограмм сигналов, получаемых с широкого набора датчиков, является наиболее информативным, хотя и весьма затратным способом контроля работы оборудования [1]. В этой связи в создаваемой установке одним из важнейших является осциллографический комплекс, позволяющий регистрировать сотни импульсных сигналов, поступающих от различных систем, и на основе анализа сохраненных цифровых осциллограмм получать исчерпывающую информацию о ее работе.

ЛИУ-20 — это ускоритель индукционного типа, генерирующий на мишень-конвертор пучок электронов с энергией 20 МэВ и током 2 кА. Чтобы избежать размытия рентгенограмм из-за сме-

щения объекта исследования в результате ударного воздействия, длительность полученного в конверторе рентгеновского пучка должна лежать в диапазоне 50–300 нс. Соответственно, регистрирующая аппаратура должна быть ориентирована на работу в этом диапазоне времен.

Наибольший объем данных — это около пяти-сот осциллограмм ускоряющих напряжений на индукторах электронно-оптического тракта установки. Сумма этих напряжений и их форма определяют полную энергию электронного пучка и ее разброс. Как будет показано далее, для регистрации ускоряющих напряжений достаточно быстродействия 250 М выборка/с.

Аппаратура, входящая в подсистему диагностики пучка (датчики положения и трансформаторы тока пучка), требует такого же быстродействия.

Вместе с тем заметное количество импульсных сигналов имеет длительности в микро- и миллисекундном диапазоне и также требует контроля. К ним относятся зарядные напряжения формирующих линий, токи фокусирующих магнитных элементов и размагничивания индукторов и т.п. Количество таких сигналов, которые можно назвать технологическими, превышает 500.

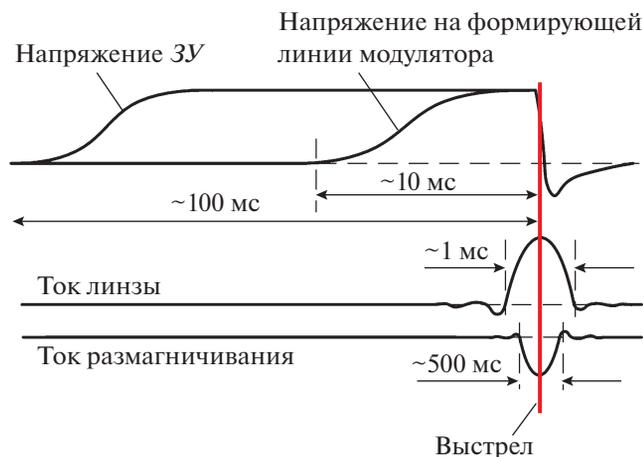


Рис. 1. Диаграмма работы установки. 3У – зарядное устройство.

К осциллографическому комплексу помимо упомянутых можно было бы отнести аппаратуру для осциллографирования сигналов с длительностью 20–30 нс от поворотных магнитов – кикеров, а также оптико-электронную аппаратуру, регистрирующую рентгеновское излучение. Прототипы этих устройств созданы, однако активное их использование начнется позднее, поэтому в данной статье они не рассматриваются.

Важным обстоятельством, существенно влияющим на технические решения, является то, что аппаратура регистрации работает в условиях сильнейших электромагнитных наводок от мощных высоковольтных импульсных устройств ускорителя. В этой связи весьма серьезные требования предъявляются как к живучести и помехоустойчивости электроники, так и к помехозащищенности сигнальных трасс, правильным заземлениям и т.п.

В статье рассматривается широкий круг вопросов, посвященных архитектуре осциллографического комплекса, типам первичных датчиков, способам передачи аналоговых сигналов с малым уровнем искажений, аппаратным и программным средствам, методикам работы с зарегистрированными данными.

1. АРХИТЕКТУРА ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Принцип работы индукционных ускорителей заключается в ускорении пучка электронов вихревым, мало меняющимся за время пролета пучка, электрическим полем, вызванным изменением во времени магнитного поля в индукторе ускоряющего элемента. Электрическое поле описывается соотношением:

$$E = -\frac{n}{l} Q \frac{dB}{dt},$$

где n – количество индукторов, l – длина системы, Q – сечение магнитопровода индуктора, dB/dt – скорость изменения индукции в магнитопроводе [2].

Приращение энергии в одном ускоряющем модуле ЛИУ-20 равно 0.34 МэВ. В создаваемой установке полное число модулей составит 60 (6 в инжекторе и 54 в ускорятельном тракте). Каждый из них собран из 16 отдельных индукторов, которые питаются от 8 импульсных генераторов (модуляторов) – по два индуктора на модулятор. Индуктор установки ЛИУ-20 представляет собой объемный виток из нержавеющей стали диаметром около 1 м, внутри которого размещен ферромагнитный сердечник [3]. На оси сборки из индукторов размещена керамическая ускоряющая трубка, разделенная на секции кольцевыми электродами, между которыми включены резисторы, разносящие потенциал вдоль трубки и демфирующие паразитные резонансы структуры. К объемному витку прикладывается импульс напряжения 20–22 кВ, в результате чего через него протекает ток 4–5 кА, создающий в сердечнике импульсное магнитное поле, которое в свою очередь создает электрическое поле, ускоряющее электроны.

Напряжение на индукторы поступает от импульсных модуляторов. Основными элементами модулятора являются формирующая линия, заряжаемая в типовом режиме до напряжения 44 кВ, водородный тиратрон с полым катодом и набор вспомогательных устройств [4].

Работу установки поясняет временная диаграмма, показанная на рис. 1. За 130 мс до старта электронного пучка подается синхроимпульс на зарядные устройства (ЗУ). Он запускает размагничивание сердечника импульсного трансформатора ЗУ, после чего, примерно за 10 мс до пучка, начинается перекачка энергии, накопленной в емкостях ЗУ, в формирующие линии модуляторов. За 70 мс до старта пучка подается запуск на поджиг дуги псевдоискровых тиратронов; длительность дуги составляет 90 мс. За 8 мс до импульса на 10 мс отключается ток накала катода инжектора, что исключает влияние магнитного поля нагревателя на пучок.

За 500 мкс до пучка включается ток в импульсных линзах, а за 250 мкс – ток размагничивания индукторов ускоряющих секций. Команда на запуск пучка подается близко к максимуму магнитного поля в линзе. Длительность электронного пучка задается временем разряда формирующих линий модуляторов. Идеализированная форма ускоряющих напряжений на индукторах – это трапецеидальный импульс с фронтами 60–80 нс и длительностью полки 60 нс для одного режима работы и 300 нс – для другого.

Система управления ЛИУ-20, куда входит и осциллографический комплекс, распределена вдоль

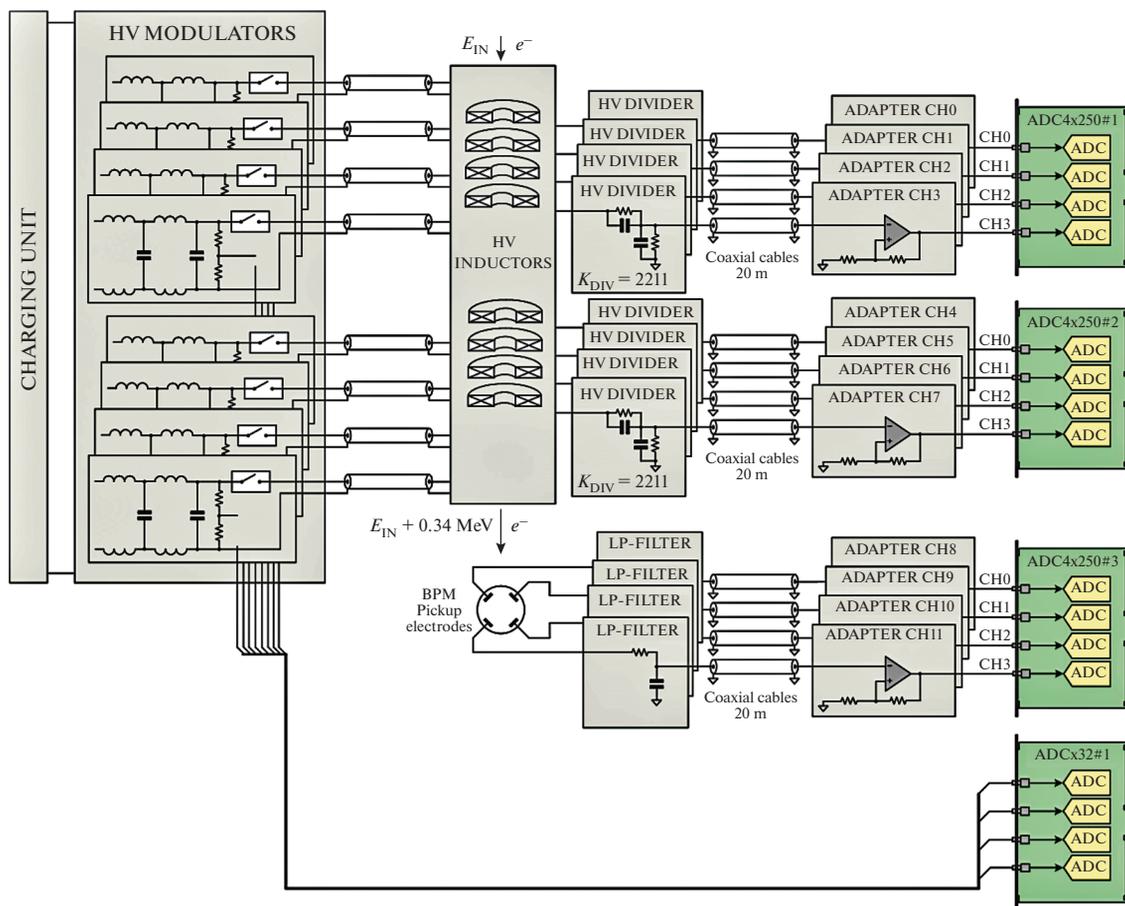


Рис. 2. К описанию архитектуры осциллографического комплекса.

ускорительного тракта установки и размещена в радиационно защищенном зале. По отношению к системе управления ускорительная структура из 60 ускоряющих модулей разбита на 30 секций [5]. Каждая секция включает два ускорительных модуля и набор первичных датчиков: 16 широкополосных высоковольтных делителей, датчик положения пучка и трансформатор тока пучка. Эти сигналы, относящиеся к классу “быстрых”, регистрируются в секции системы управления, называемой локальным контроллером.

В локальные контроллеры поступают также технологические сигналы от высоковольтных делителей формирующих линий модуляторов и трансформаторов тока размагничивания. Локальный контроллер системы управления представляет собой крейт VME64-BINP с набором модулей, предназначенных как для регистрации сигналов, так и решающих иные задачи по управлению установкой [6].

Представление о наборе регистрируемых сигналов, поступающих от одного из 60 ускорительных модулей и связанных с ним модуляторов, можно получить из рис. 2.

Импульсное напряжение на 8 делителей одного ускоряющего модуля подается с высоковольтной части объемных витков индукторов. С выхода делителей по кабельным трассам длиной около 20 м сигнал поступает в модуль-адаптер, а после нормировки и коррекции — на входы двух 4-канальных осциллографических модулей ADC4x250.

Третий модуль ADC4x250 служит для регистрации сигналов с четырех выходов датчика положения пучка. Сигнал на него поступает по таким же трассам и проходит процедуры обработки в модуле-адаптере. И наконец, еще один ADC4x250 предназначен для регистрации осциллограмм с датчика тока пучка.

Напряжения на формирующих линиях также приводятся к низкому уровню с помощью делителей и передаются в измерительную электронику по дифференциальным экранированным трассам. Регистрация этих сигналов выполняется в модуле ADCx32, часть каналов которого зарезервирована для развития установки и измерительной системы.

В табл. 1 перечислен набор сигналов, регистрируемых в одном локальном контроллере, их

Таблица 1. Набор сигналов, регистрируемых в осциллографическом комплексе

Сигнал	Характерное время	Диапазон сигналов датчика	Диапазон амплитуд на выходе датчика	Допустимые погрешности	Количество сигналов	
					Контроллер	Ускоритель
Напряжение индукторов	100–300 нс	15–25 кВ	7–12 В	±0.5%	16	480
Ток и положение пучка	100–300 нс	0.2–2 кА ± 50 мм	2–4 В	±1%	1 × 4	41 × 4
Трансформатор тока	100–300 нс	0.2–3 кА	5–50 В	±1%	1	31
Напряжение на формирующих линиях	10 мс	30–44 кВ	3–4.4 В	±1%	16	480
Ток размагничивания	1 мс	0.3–1 кА	1–4 В	±2%	2	60

характерные параметры и полное количество на всей установке. Как видно из табл. 1, в состав создаваемого комплекса должны входить осциллографические модули, обладающие различными возможностями по быстродействию, числу каналов, уровню входных сигналов и т.п.

Большая часть модулей должна работать в одном, “быстром”, диапазоне с характерными длительностями сигналов 100–300 нс. Обсудим допустимые погрешности регистрации, приведенные в табл. 1.

Наиболее жесткие требования к полной ошибке предъявляются к каналам, регистрирующим ускоряющие напряжения, так как эти данные информируют об энергии пучка, что необходимо для успешной проводки пучка по электронно-оптическому тракту. Суммарная ошибка от влияния всех факторов в тракте измерения ускоряющих напряжений не должна превышать ±0.5%.

Требования к каналам измерения положения пучка с точки зрения частотных свойств близки к таковым для каналов ускоряющих напряжений. Однако при измерении координат необходим большой динамический диапазон, так как уровни сигналов зависят не только от тока, но и от положения пучка. Чтобы иметь реальную разрешающую способность в измерении координаты центра тяжести пучка 1 мм при апертуре 100 мм и изменении тока пучка от 200 А до 2 кА необходима разрешающая способность порядка 0.1% в соответствующей сигнальной полосе.

Наиболее простые требования предъявляются к трансформаторам, измеряющим ток пучка: динамический диапазон – 10, амплитудная погрешность 1–2%.

Требования к погрешностям регистрации технологических каналов слабее, чем к каналам “быстрым”, так как они не предоставляют такой важной информации как энергия, ток и координаты пучка. Данные этих каналов носят информационный характер и используются в основном для мониторинга нормальной работы высоковольтных устройств.

2. СИГНАЛЬНЫЕ ТРАКТЫ ДАТЧИКОВ УСКОРЯЮЩИХ МОДУЛЕЙ

2.1. Высоковольтный делитель напряжений индукторов

Повторим, что наиболее массовым и требовательным к параметрам является высоковольтный делитель импульсных напряжений индукторов. Сумма амплитуд этих напряжений дает приращение энергии пучка при пролете через ускоряющий модуль, а неравномерность и колебательность на полочке импульса ускоряющего напряжения – разброс энергии электронного пучка. Взаимное положение фронтов позволяет синхронизовать правильным образом времена срабатывания модуляторов.

Искажения полочки трапецеидального импульса, вносимые делителем, не должны превышать 0.3%. На одном ускоряющем модуле устанавливаются 8 делителей, так что в общей сложности необходимо обеспечить 480 (8 × 60) каналов измерения.

Для измерения высоких импульсных напряжений в ЛИУ-20 используются комбинированные резистивно-емкостные делители [7]. Схема делителя показана на рис. 3. Делитель состоит из верхнего, высоковольтного плеча с эквивалентной емкостью 20 пФ и сопротивлением 51 кОм, и нижнего плеча, представляющего комбинацию емкости 200 пФ и резистивного делителя с выходным сопротивлением 50 Ом, к которому подключается кабельная трасса. Основные параметры делителей:

- рабочее напряжение – до 30 кВ;
- средний коэффициент деления – 2211;
- полоса частот – 30 МГц;
- искажения полочки – <0.3%;
- температурная зависимость коэффициентов – $\pm 35 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

2.2. Трансформаторы тока пучка

Быстрые трансформаторы тока обеспечивают измерение тока пучка на различных участках пучкового тракта ЛИУ-20. В ускорительном тракте рас-

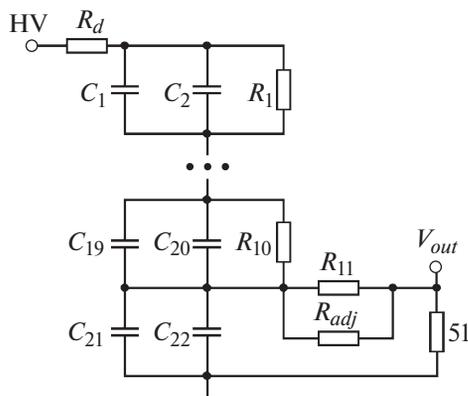


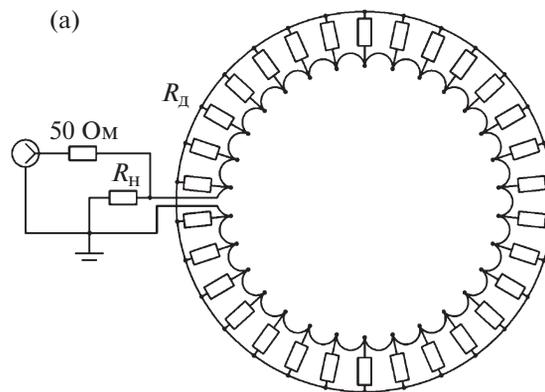
Рис. 3. Схема делителя. $C_1-C_{22} = 100 \text{ пФ} \pm 1\%$, $R_1-R_{11} = 5.1 \text{ кОм} \pm 0.25\%$, $R_d = 50 \text{ Ом}$; R_{adj} – резистор подстройки.

положены 28 трансформаторов тока: один расположен в инжекторе, непосредственно за анодом вакуумного диода, а 27 вмонтированы в ускоряющие модули. В канале транспортировки пучка до мишени имеются три размещенных вне ускоряющих модулей, трансформатора. Они расположены в различных сечениях транспортного канала и непосредственно перед мишенным узлом.

Трансформаторы в ускоряющих модулях вмонтированы во фланец, к которому крепится ускорительная трубка, и полностью ее охватывают. Таким образом, они отображают сумму тока пучка и тока через разносящие потенциал резисторы ускорительной трубки. Этот дополнительный ток регистрируется без пучка, а затем учитывается при обработке осциллограмм.

Конструктивно трансформаторы представляют собой магнитопровод из аморфного сплава 5БДСР размерами $388 \times 369 \times 10$ (диаметр наружный \times диаметр внутренний \times высота) с навитой на него измерительной обмоткой. Обмотка насчитывает 30 витков, каждый виток шунтирован резистором $R_d = 1 \text{ кОм}$ (рис. 4а) для демпфирования колебаний, возникающих из-за неоднородностей намотки и экранирования трансформатора. В нагрузку используется малоиндуктивный фольговый резистор $R_H = 1 \text{ Ом}$ WSR21R000FEA компании Vishay [8]. Сигнал выводится из ускоряющего модуля через герметичный проходной коаксиальный разъем, расположенный на плоскости фланца ускоряющего модуля.

Коэффициенты трансформации при нагрузке 50 Ом составляют: инжектора – 92 А/В, ускоряющих модулей – 60 А/В, транспортного канала – 100 А/В. Время нарастания выходного сигнала не более 10 нс, спад вершины – не более 0.1% при длительности импульса до 400 нс.



(б)



Рис. 4. Схема трансформатора тока (а) и внешний вид части сердечника с обмоткой и резисторами (б).

2.3. Датчик положения пучка

Для измерения положения пучка в линейном ускорителе применяется датчик, близкий по конструкции к полосковому. Чувствительный элемент представляет собой отрезок нержавеющей проволоки длиной 110 мм, заземленной с одного конца, а с другого – выведенный через вакуумированный изолятор на высокочастотный разъем (см. рис. 5).

В частотном диапазоне сигналов ЛИУ-20 датчик может рассматриваться как генератор тока, зашунтированный индуктивностью 60 нГн, образованной отрезком проволоки. Датчик нагружен на фильтр низких частот, имеющий входное сопротивление 50 Ом до нескольких сотен мегагерц. Отклик датчика, нагруженного на 50 Ом, с хорошей точностью описывается функцией однократного дифференцирования сигнала тока и выглядит как два последовательных прямоугольных импульса положительной и отрицательной полярностей, совпадающих по длительности и положению с фронтами сигнала тока.

Для приведения выходных амплитуд данного датчика, близких к значениям остальных датчиков осциллографического комплекса, фильтр выполняет предварительное интегрирование короткого импульса. Для этого его частотная характе-

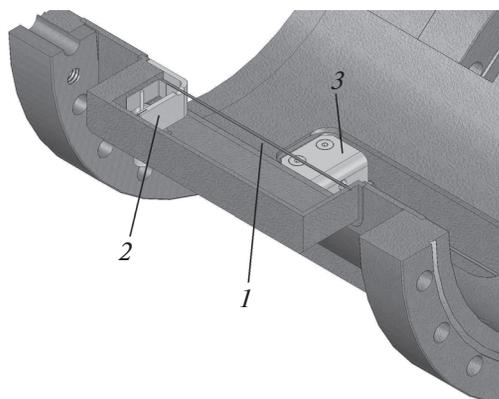


Рис. 5. Конструкция датчика положения пучка. 1 – проволока; 2, 3 – вакуумные выходы по оси X (2) и по оси Y (3).

ристка сделана как у интегрирующего звена первого порядка с постоянной времени 160 нс.

Перед вычислением координат пучка выполняется восстановление формы сигналов. Так как функция передачи датчика представляет собой функцию однократного дифференцирования, можно написать следующее выражение для напряжения на выходе фильтра, используя преобразование Лапласа:

$$F[U_{ADC}] = F[I]L \frac{p}{1 + p\tau_f},$$

где F – преобразование Лапласа, I – ток в проволочке датчика, U_{ADC} – сигнал аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.), τ_f – постоянная времени фильтра, L – индуктивность датчика. Для восстановления исходного сигнала $I(t)$ надо, очевидно, умножить образ функции U_{ADC} на обратный

множитель $\frac{\tau_f}{L} \left(1 + \frac{1}{p\tau_f} \right)$.

Выполнив обратное преобразование Лапласа и переходя к напряжениям, получим:

$$U(t) = U_{ADC}(t) + \frac{1}{\tau_f} \int_0^t U_{ADC}(\tau) d\tau,$$

где $U(t)$ – восстановленное напряжение, U_{ADC} – данные с а.ц.п. Нормализованные осциллограммы сигналов с выходов а.ц.п. и фильтра и восстановленный сигнал представлены на рис. 6. Амплитуда на выходе фильтра (один канал датчика) при пролете пучка через центр составляет 2 В/кА, чувствительность для определения отклонения центра тяжести – 0.1 В/(кА · мм). После восстановления форм сигналов с четырех проволочек датчика положение пучка в любой момент времени вычисляется по формуле

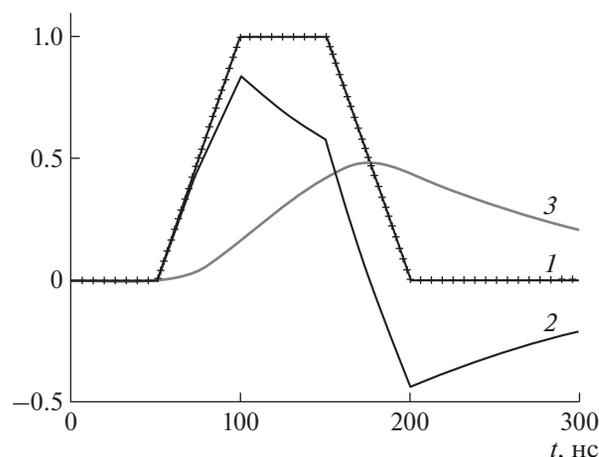


Рис. 6. Моделирование восстановления сигнала датчика положения. 1 – форма сигнала тока и восстановленный сигнал; 2 – сигнал на выходе фильтра, измеренный а.ц.п.; 3 – интеграл данных а.ц.п.

$$X = G_x \frac{U_{x1} - U_{x2}}{U_{x1} + U_{x2}}, \quad Y = G_y \frac{U_{y1} - U_{y2}}{U_{y1} + U_{y2}},$$

где X, Y – вычисленные координаты; G_x, G_y – коэффициенты пропорциональности, равные 20 мм; $U_{x1}, U_{x2}, U_{y1}, U_{y2}$ – восстановленное напряжение с электродов датчика.

2.4. Модуль-адаптер

Сигналы, снимаемые с высоковольтных делителей, трансформаторов тока и датчиков положения пучка, выводятся из защищенного зала по кабельным трассам, имеющим строго одинаковую длину 16 ± 0.25 м. Особенности прокладки кабельных линий, а также их заметное количество ограничили габариты кабеля диаметром 6 мм. Для транспортировки сигналов использован негорючий радиочастотный кабель РК 50-3-310нг с диэлектриком из вспененного полиэтилена и двойной экранировкой: проволочной оплеткой и фольгой. Как показало экспериментальное изучение уровня наводок, собственная экранировка кабеля оказалась недостаточной. Поэтому сигнальные кабели группами по 4 штуки уложены в экранирующую оплетку ПМЛ 10×16 .

Вследствие относительно небольшого диаметра кабеля при длине линий 16 м начинает проявляться скин-эффект, вызывающий на выходе линии плавное нарастание полочки импульса с постоянной времени, примерно равной 550 нс. Это искажение, достигающее 4%, недопустимо, поэтому на выходе сигнального тракта должно быть устройство, корректирующее пришедший сигнал.

Сигналы, снимаемые с датчиков, имеют амплитуду от 10 до 15 В, что приемлемо для отношения сигнал/наводка. Для приведения амплитуд

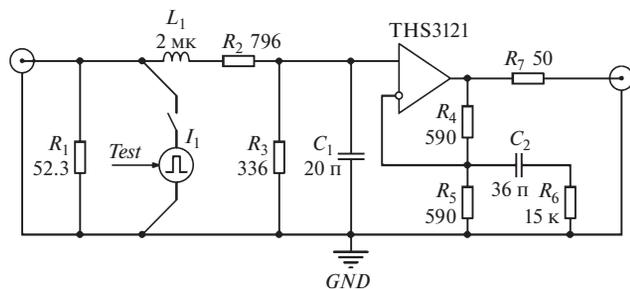


Рис. 7. Схема сигнального тракта модуля-адаптера.

сигналов к входным диапазонам осциллографических модулей и фильтрации помех в частотной полосе свыше 30 МГц также необходим адаптер.

Перечислим функциональные и технические возможности модуля-адаптера. Эти устройства работают совместно с аппаратурой локального контроллера и принимают сигналы с двух ускоряющих модулей, поэтому должны содержать по 16 каналов для обработки сигналов с высоковольтных делителей, 4 канала для сигналов с датчиков положения пучка, 1 канал — для трансформатора тока и 3 канала, которые являются резервными. Таким образом, суммарное число каналов модуля-адаптера составляет 24. Модуль должен быть выполнен в конструктиве “Евромеханика 3U”, чтобы монтироваться в ту же стойку, что и VME крейт с осциллографическими модулями. Он должен обеспечивать коррекцию искажений из-за скин-эффекта, нормализацию амплитуд сигналов и фильтрацию высокочастотных компонент. Погрешность статического коэффициента передачи должна быть не хуже 0.2%, а полоса частот ограничиваться величиной 30 МГц. Полное число модулей-адаптеров в ускорительной части — 30 и в транспортном канале — 4.

Схема сигнального тракта одного канала представлена на рис. 7. Входной сигнал приводится к диапазону ± 4 В с помощью согласованного делителя с коэффициентом 3.37, образованного резисторами R_2 , R_3 . Для фильтрации помех делитель сделан частотно-зависимым и имеет частоту среза 33 МГц и спад амплитудно-частотной характеристики (а.ч.х.) —40 дВ/декада.

Коррекция искажений, вносимых скин-эффектом, заключается в дифференцировании входного импульса, что обеспечивается частотной зависимостью коэффициента передачи усилителя. Это дифференцирование компенсирует интегрирующие свойства сигнала из-за скин-эффекта. Значения сопротивлений в цепи обратной связи подбираются из условия $R_5/R_6 = 0.04$, а емкость C_2 — исходя из постоянной времени дифференцирования, равной 550 нс.

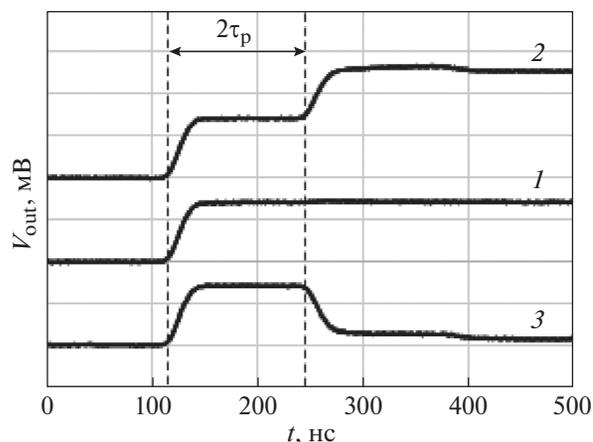


Рис. 8. Демонстрация проверки исправности трасс передачи сигналов: кабельная трасса исправна (1), разрыв кабельной трассы (2), кабельная трасса закорочена (3). Масштаб по вертикали 100 мВ/деление, длина кабельной трассы 15 м.

Еще одно крайне полезное свойство модуля-адаптера — возможность дистанционной проверки функционирования всех сигнальных трактов (от датчика до готовых данных) без посещения персоналом радиационно-опасной зоны. Перед началом экспериментов необходимо убедиться, что все 840 кабельных трасс исправны. Достигается это автоматизированным образом с помощью схемы проверки, присутствующей в каждом сигнальном тракте.

По приходу сигнала *Test* ключ подключает схему проверки к входам устройства, как показано на рис. 7, и затем она формирует импульс тока амплитудой 18 мА, длительностью 800 нс и фронтами 20 нс. Как результат, сигнал появляется на входе модуля-адаптера, а также “уходит” в кабельную трассу до соответствующего датчика. Таким образом, в течение времени $2\tau_p$ (τ_p — время распространения сигнала по коаксиальному кабелю) сигнальный тракт модуля-адаптера со стороны входа “видит” волновое сопротивление коаксиальной линии передающей линии и далее — выходное сопротивление датчика. В итоге возможны три случая (см. рис. 8):

- 1) кабельная трасса исправна — в этом случае будет зарегистрирован импульс тестирования с длительностью 800 нс и амплитудой 130 мВ;
- 2) разрыв кабельной трассы — в зарегистрированной осциллограмме амплитуда увеличится в 2 раза через время $2\tau_p$ от разрыва;
- 3) кабельная трасса закорочена — в зарегистрированной осциллограмме амплитуда уменьшится через время $2\tau_p$ от закоротки.

Как можно увидеть, тестовые сигналы демонстрируют не только сам факт неисправности, а

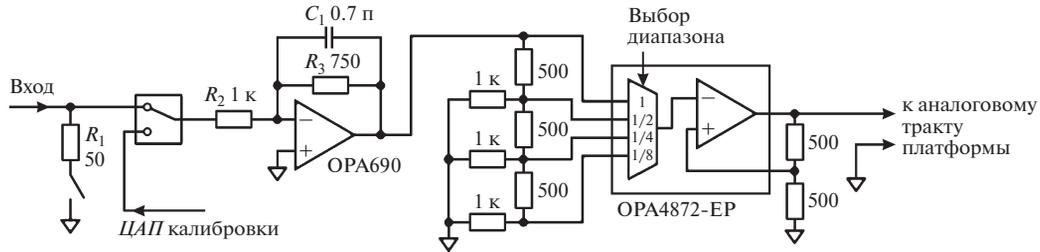


Рис. 9. Схема предусилителя ADC4x250-4Ch. ЦАП – цифроаналоговый преобразователь.

еще и с точностью до метра позволяют определить место неисправности.

3. ОСЦИЛОГРАФИЧЕСКИЕ МОДУЛИ ADC4x250-4Ch И ADCx32

Определим необходимые параметры наиболее массового осциллографического модуля, начав с оценки полосы частот сигнального тракта. Напомним, что идеализированная форма ускоряющих напряжений, формируемых модуляторами, – это трапецеидальный импульс с длительностью на полувывоте 100 нс и фронтами около 50–60 нс, однако для оценки полосы удобнее использовать не идеализированный трапецеидальный сигнал, а колоколообразный импульс, который можем представить как один период функции $U(t) = U_0 - U_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$.

Если принять $T = 200$ нс, то время нарастания по уровням 0.1–0.9 составит около 70 нс, а ширина на полувывоте – 100 нс, что близко к параметрам реального импульса. Целесообразно для оценок использовать T с некоторым запасом, приняв $T = 100$ нс. В этой связи имеет смысл такой параметр преобразователя, как соотношение сигнал/шум, также определять в частотной полосе 10 МГц.

Предположим далее, что а.ч.х. тракта аналого-цифрового преобразования задается лишь одной постоянной времени τ . Тогда для гармонического сигнала с периодом T условие для τ такое:

$$\tau \leq T\sqrt{2\delta},$$

где δ – амплитудная ошибка, вносимая трактом передачи сигнала [9]. С учетом того, что полная ошибка в каналах регистрации ускоряющих напряжений не может быть более 0.5%, примем за величину амплитудной ошибки 0.2%. Из этого получается значение $\tau \approx 6$ нс, что соответствует полосе частот тракта 27 МГц.

Определимся теперь с разрядностью преобразования. Выше отмечалось, что реальная разрешающая способность оцифровки сигналов должна быть примерно 10 бит, что вызвано динамическим диапазоном системы измерения траектории пучка. Такую разрешающую способность реально получить, используя а.ч.п. с разрядностью не менее 12 бит.

Последний параметр осциллографического модуля, требующий определения, – это частота выборок F_s . Для этого воспользуемся простым соотношением, дающим оценку F_s снизу и приведенным в [10]: $F_s = \frac{\alpha}{2.5\sqrt{\eta}}$, где $1/\alpha$ – характерное время изменения сигнала, η – погрешность линейной интерполяции. Положив $1/\alpha = 50$ нс, а $\eta = 0.2\%$, получим $F_s \approx 180$ М выборок/с.

Подводя итог приведенным выше оценкам, можно сказать, что “быстрый” осциллографический модуль должен обладать следующими основными параметрами: F_s не менее 180 М выборок/с, разрядность 12 бит, полоса частот не менее 27 МГц, отношение сигнал/шум в полосе 10 МГц не хуже 60 дБ.

Модуль с соответствующими параметрами был разработан на базе универсальной аппаратной платформы, кратко описанной в [11], и получил название ADC4x250-4Ch. Его структурные решения рассматривались в той статье, поэтому здесь мы ограничимся лишь кратким описанием и параметрами.

Модуль содержит четыре одинаковых канала, тактируемых синхронно, причем эта тактовая частота связана с синхрочастотой, получаемой от магистрали VME крейта [12]. Средства синхронизации и таймирования осциллографического комплекса будут рассмотрены в следующем разделе.

В каждом из каналов (см. рис. 9) обеспечиваются диапазоны ± 0.5 В, ± 1 В, ± 2 В и ± 4 В, выбираемые программно. С выхода усилителя аналоговый сигнал поступает на дифференциальный драйвер аппаратной платформы, приводящий уровни сигнала к значениям, соответствующим микро-схеме а.ч.п.

Взаимодействие усилителей и цифровой части аппаратной платформы выполняется посредством шины SPI. Для организации этого взаимодействия применена программируемая логическая интегральная схема (п.л.и.с., FPGA) Altera MAX II, которая преобразует данные SPI в команды выбора диапазонов, управления цифроаналогового преобразователя ЦАП и реле калибровки. В памяти п.л.и.с. также записываются величина смещения нуля в каждом канале и ошибка

масштаба. Эти данные определяются с помощью 16-разрядного ЦАП при проведении калибровки. В дальнейшем они используются в текущей работе для коррекции данных и проверки исправности аналогового тракта.

Задачи цифровой части заключаются в следующем:

- управление работой памяти при записи данных от а.ц.п., а также ее чтении через интерфейс VME;

- коррекция читаемых из памяти данных по результатам калибровки;

- установка режимов работы узлов платы: микросхем а.ц.п., блока тактирования, предварительного усилителя, интерфейса;

- организация транзакций через VME-интерфейс;

- инициация команд старта осциллографирования, запуска самотестирования и т.п.

Решение всех задач цифровой части обеспечивается посредством двух микросхем Altera Cyclone III EP3C25F324C6. Логическую структуру можно условно разделить на “быструю” и “медленную”. “Быстрая” отвечает за получение и сохранение данных от а.ц.п. и синхронный старт записи осциллограмм. Функционирование медленной части обеспечивается софт-процессором Nios II, который располагается в одной из п.л.и.с., выполняющей функции ведущей.

Использование софт-процессора позволило реализовать сложные алгоритмы работы. При инициализации процессор задает значения конфигурационных регистров фазовой подстройки промежуточной частоты (ф.а.п.ч.), а.ц.п., а далее может изменить их в соответствии с текущим режимом работы. Кроме того, в его задачи входит обработка обращений к регистрам платы по шине VME, выполнение алгоритмов при самотестировании, калибровке и осциллографировании. Параметры модуля ADC4x250-4Ch:

Количество каналов	4 синхронных			
Частота измерений, М выборок/с	250			
Входной диапазон, В	±0.5	±1	±2	±4
Полоса по уровню –3 дБ, МГц	95	90	85	80
Статический шум канала (средне-квадратичный), мВ	0.22	0.37	0.70	1.38
Смещение нуля, не более, мВ	0.3			
Ошибка масштаба, не более	$5 \cdot 10^{-4}$			
Соотношение сигнал/шум, дБ	64.1	65.6	66.1	66.2
Взаимное влияние каналов, дБ	–70			
Фазовый шум (среднеквадратичный), пс	0.7			
Объем памяти/канал	700000 точек			
Форм-фактор	VME64x, 6U 4HP			

Обсудим средства осциллографии технологических сигналов. В локальный контроллер эти

сигналы поступают от двух модуляторных стоек, генерирующих импульсы напряжения для двух ускоряющих модулей секции (см. рис. 2). Перечислим требования к регистрирующей аппаратуре этих сигналов.

Общее число каналов измерения напряжения на формирующих линиях (PFN) в одной модуляторной стойке в настоящее время составляет 8, однако далее планируется перейти к трехимпульсной работе ускорителя (три пучка с разной длительностью), в связи с чем полное число каналов возрастет до 24. К этому количеству необходимо добавить регистрацию тока размагничивания. Таким образом, минимально необходимое число каналов для осциллографии технологических сигналов составит $2 \cdot (24 + 1)$. С учетом возможного развития целесообразно использовать два 32-канальных осциллографических модуля.

Устройство должно иметь возможность выполнять измерения сигналов различной длительности (500 мкс–100 мс) со средним темпом оцифровки 10–15 мкс/32 канала, что относительно времени процессов обуславливает практически синхронную регистрацию. Характерные времена изменения технологических сигналов не требуют полосы частот выше 50–70 кГц, а погрешности измерений на уровне 1% вполне достаточно, так как делители высоковольтных сигналов, применяемые для нормализации сигналов, лучшей точности не обеспечивают.

Для оснащения осциллографического комплекса потребуется 60 осциллографических модулей, поэтому для упрощения диагностики неисправностей и обеспечения надежной работы модули должны иметь функцию самотестирования.

Так как система управления строится на основе стандарта VME64x, модули должны быть выполнены в этом стандарте.

Структурная схема модуля, получившего название ADCx32, приведена на рис. 10. В модулях применены мультиплексированные аналого-цифровые преобразователи, так как производительность а.ц.п. с синхронными каналами является избыточной для регистрации технологических процессов. В то же время последовательный сдвиг моментов отсчетов во всех 32 каналах, вызванный опросом каналов, не должен быть более 20 мкс, чтобы можно было соотнести моменты разряда формирующих линий и максимум тока размагничивания сердечников индукторов, как это было показано на рис. 1. Такое требование заставило применить в модуле четыре мультиплексированных а.ц.п. с темпом опроса 1 мкс/канал. В результате 32 канала опрашиваются за 8 мкс, так как 4 а.ц.п. работают параллельно.

Управляющий узел модуля построен на п.л.и.с. Altera Cyclone III и осуществляет управление оперативным запоминающим устройством

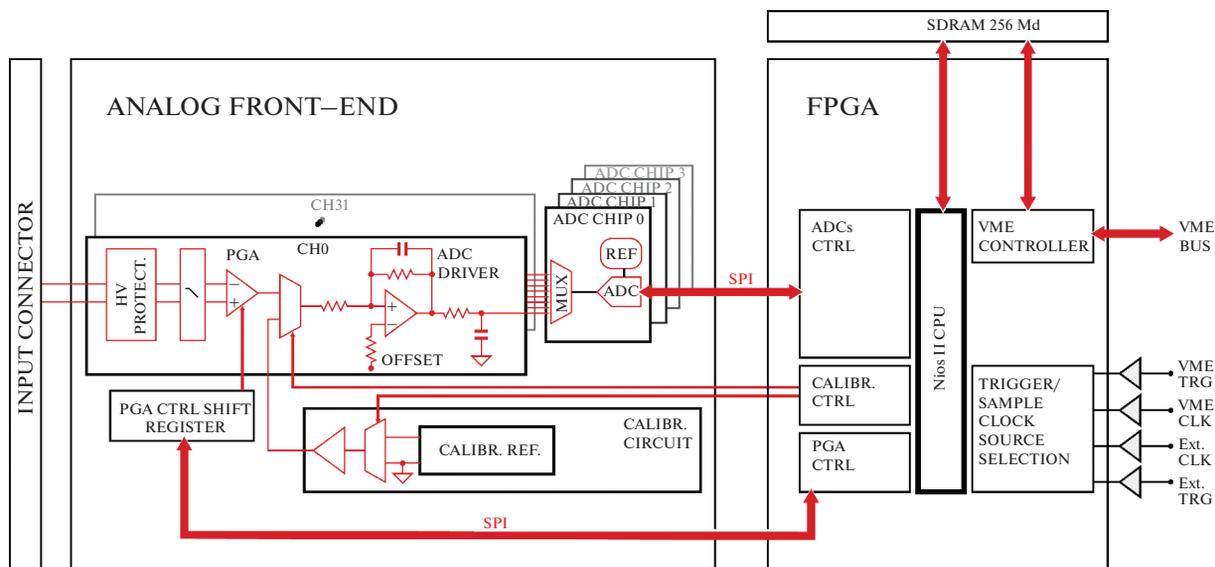


Рис. 10. Структурная схема ADCx32.

(о.з.у.) и поддержку VME-интерфейса, а через SPI-интерфейс – взаимодействие с блоком преобразователей. Последний состоит из четырех а.ц.п. AD7091R-8 и включает в себя схему калибровки для самотестирования.

Входные каскады содержат схему защиты, синфазный и противофазный RC-фильтры, сигнал с которых подается на инструментальный усилитель AD8251.

Так как производительность а.ц.п. 1 М выборка/с и разрешающая способность 12 бит, то п.л.и.с. должна успевать записывать в о.з.у. 48 бит данных за время < 1 мкс. Объем памяти определяется самым длительным процессом – зарядным напряжением (~ 100 мс):

$$(100 \text{ мс}/8 \text{ мкс}) \cdot 32 \text{ канала} \cdot 16 \text{ бит} \sim 64 \text{ Мбит.}$$

Данная микросхема работает на частоте 133 МГц и имеет 256 Мбит памяти, что позволяет записывать ~ 500 тыс. точек/канал.

4. СИНХРОНИЗАЦИЯ ОСЦИЛОГРАФИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Важнейшее требование к осциллографическому комплексу – синхронная регистрация “быстрых” сигналов. Под синхронной регистрацией подразумевается неизменяемое от выстрела к выстрелу относительное положение моментов выборки сигналов для всех модулей комплекса. И второе, что подразумевается под синхронной регистрацией, – необходимость обеспечить старт регистрации процессов одновременно для всех “быстрых” модулей комплекса с допустимой разницей моментов старта не более 3–5 нс. Причем,

эта разница должна быть постоянной и жестко привязанной к запуску мощных устройств.

Сформулированные требования объясняются двумя основными причинами. Первая – изучение влияния моментов запуска модуляторов на форму ускоряющего напряжения и точная расстановка моментов запусков. Вторая – максимально подробная и точная информация о поведении пучка в ускорятельном тракте и возможность изучения корреляций различных процессов.

Для организации процедур запуска и таймирования оборудования ЛИУ-20, в том числе и для синхронной регистрации, создана глобальная система таймирования установки [5]. Глобальная система таймирования использует принцип единого времени, когда все территориально распределенные узлы имеют синхронно идущие часы, время в которых выставлено одинаковым с точностью несколько наносекунд. Структура системы с единым временем показана на рис. 11.

Главный таймер (System Timer – S-Timer), размещенный в центральном VME-крейте, устанавливает в часах локальных таймеров единое время с погрешностью ± 2 нс. Также S-Timer передает по оптической линии синхросигнал 250 МГц, принимаемую в локальных таймерах, что позволяет их часам идти синхронно. L-Timer’ы установлены в каждом локальном контроллере в выделенной позиции рядом с контроллером VME крейта, обеспечивая процедуры синхронизации и таймирования внутри этого крейта. Задача L-Timer’a – организовать взаимодействие с глобальной системой синхронизации, а на локальном уровне – обеспечить межмодульную синхронизацию.

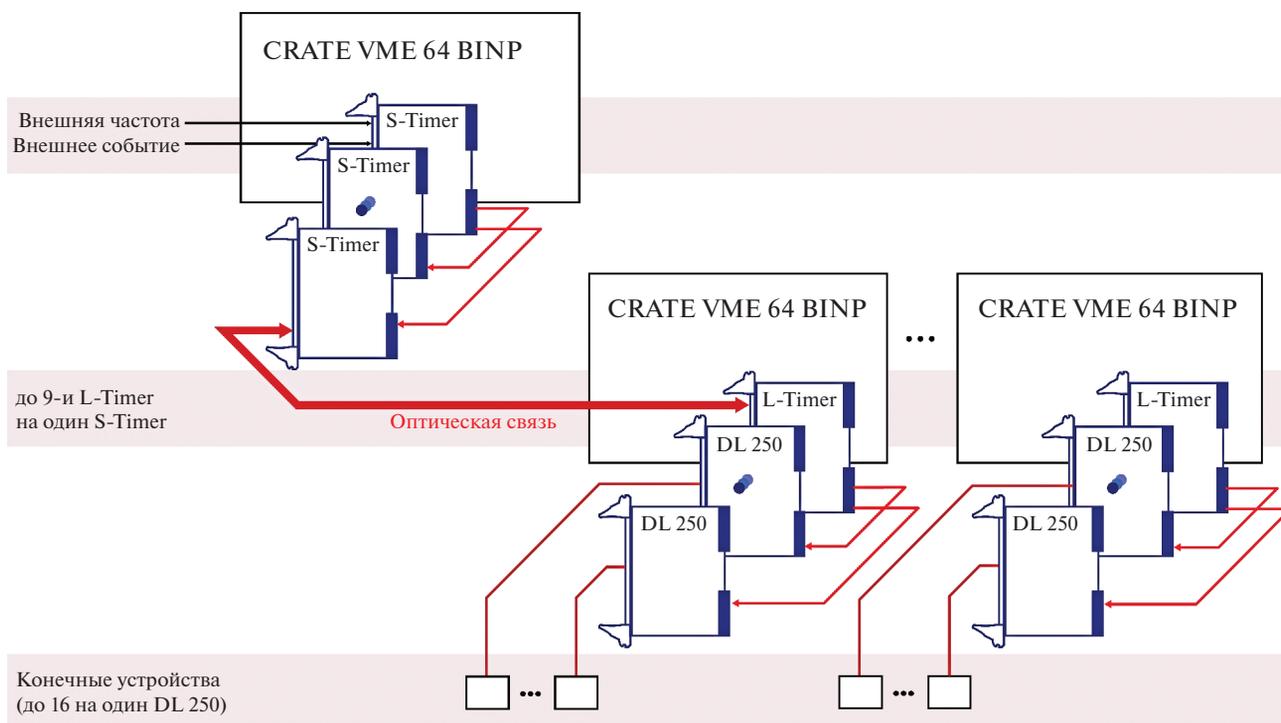


Рис. 11. Структура системы с единым временем.

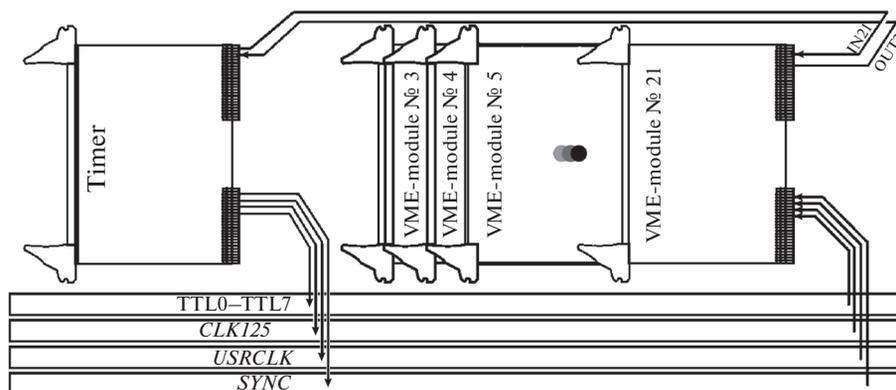


Рис. 12. Шины внутрикрейтовой синхронизации.

Стандартная системная магистраль VME64x не предоставляет средств межмодульной синхронизации. Чтобы их обеспечить, на нижнюю магистраль J2 крейта, используя так называемые user define pins, были добавлены шины, обеспечивающие межмодульную синхронизацию внутри крейта [12] – см. рис. 12:

- два синхросигнала в LVDS-формате *CLK125* и *USRCLK*, которые раздаются по индивидуальным шинам на каждый из слотов; физические длины шин для первых восьми слотов выравнены с точностью 0.2 нс;

- 8 TTL-линий TTL0–TTL7, проходящих “насквозь” через все слоты;

- сигналы точной синхронизации *SYNC* в LVDS-формате, также транслируемые по индивидуальным шинам на каждый из слотов, их физические длины для первых восьми модулей выравнены с точностью 0.2 нс;

- 19 индивидуальных шин для специфических режимов IN2–IN21/OUT2–OUT21.

Шины *USRCLK* и IN2–IN21/OUT2–OUT21 в данной работе не используются.

Сигнал *CLK125* предназначен для организации синхронной работы осциллографических

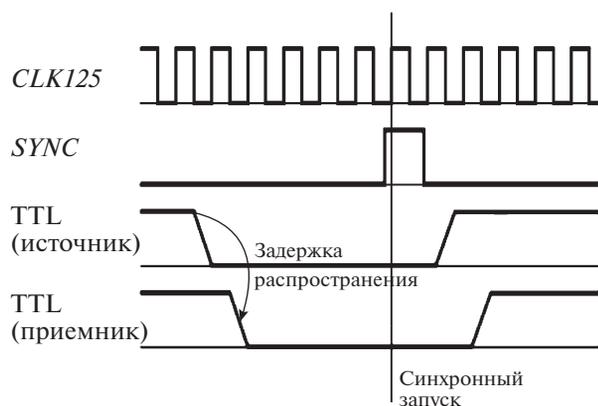


Рис. 13. Синхронизация в режиме TTL+SYNC.

модулей, а также времязадающих модулей системы управления. Модули содержат схему ф.а.п.ч., которая обеспечивает внутренние узлы необходимым набором частот. В частности, в модуле ADC4x250-4Ch ф.а.п.ч. выдает частоту тактирования а.ц.п. 250 МГц, обеспечивая фазовый шум <1 пс. Напомним, что во всех 30 VME-крейтах осциллографического комплекса частота *CLK125* сфазирована посредством центрального S-Timer'a.

Импульсы TTL0–TTL7, выдаваемые на сквозные шины, могут применяться как несинхронные запуски, либо для выбора одного или группы модулей, которые должны принимать сигнал *SYNC*.

Линии *SYNC* предназначены для запуска с субнаносекундной точностью. Процедура точного старта заключается в следующем. L-Timer выставляет на одну или несколько шин TTLx сигнал, который должен восприниматься модулями-приемниками как разрешающий прохождение сигнала *SYNC* на узлы запуска этих модулей (см. рис. 13). Модули-приемники, использующие режим запуска по TTL+*SYNC*, должны в обязательном порядке принимать сигнал *CLK125*, а также вносить минимальную задержку для этого сигнала с тем, чтобы обеспечить уверенное срабатывание внутренних цифровых узлов, тактируемых от *CLK125*. Сигнал *SYNC* обеспечивает синхронный старт выбранных с помощью TTLx модулей с неопределенностью 0.2 нс.

5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение осциллографического комплекса состоит из уровня работы с аппаратным обеспечением (Hardware Tier), промежуточного программного обеспечения (Middleware Tier) и уровня представления (Presentation Tier). Взаимодействие между компонентами реализовано на

основе программной платформы Tango [13]. Общая структура приведена на рис. 14.

Ключевыми концепциями, лежащими в основе Tango, являются “классы устройств” (Device Class) и “устройства” (Device). Device Class является абстракцией, определяющей какие атрибуты (attributes), команды (commands), каналы (pipe) и свойства (properties) доступны посредством Device. Зачастую Device Class связан с определенным типом или семейством аппаратного обеспечения. Device, в свою очередь, предоставляет доступ непосредственно к физическому или программному устройству. Атрибуты можно рассматривать как технологические параметры системы, а команды как операции с устройством. Каналы позволяют передавать данные произвольной структуры. Свойства служат для хранения конфигурационных параметров или другой вспомогательной информации: единицы измерения, диапазон допустимых значений.

Tango не накладывает строгих ограничений на выбор механизма взаимодействия, позволяя реализовать схожее поведение как через атрибуты, так и через команды или каналы, оставляя этот вопрос на усмотрение разработчика. Например, измеренное значение а.ц.п. может быть получено чтением атрибута *adcValue* или вызовом команды *getAdcValue*. Несмотря на гибкость такого подхода, это может приводить к созданию разнородных Device Class, которые будет сложно интегрировать в единую систему управления.

Проведя анализ возможностей по созданию графических интерфейсов и средств архивирования, а также учитывая опыт создания систем управления на других установках, было сформулировано следующее правило: атрибуты должны описывать состояние аппаратного устройства, а команды переводить его из одного состояния в другое или являться логически выделенной операцией. Поясним на примере осциллографического модуля ADC4x250. Входной диапазон, источник тактирования, источник запуска, количество отсчетов, измеренные осциллограммы – это атрибуты, а старт, остановка и калибровка модуля – команды.

Tango-устройства, реализующие доступ к оборудованию, находятся на уровне аппаратного обеспечения и являются источниками данных как для компонентов уровня представления, так и уровня промежуточного программного обеспечения. К компонентам промежуточного программного обеспечения относятся система архивирования и программные устройства высокого уровня (High Level Device). На уровне представления реализованы графические пользовательские приложения для настройки устройств, просмотра и анализа данных.

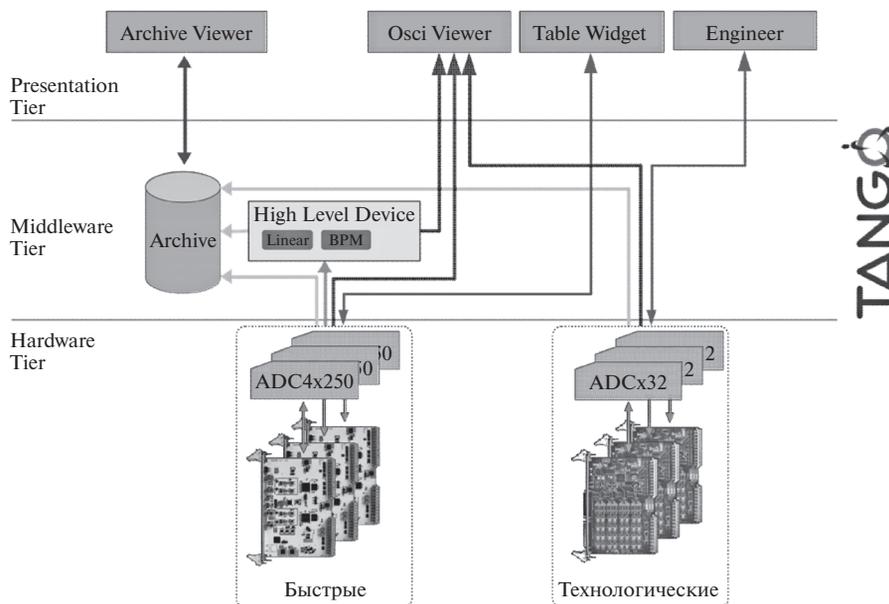


Рис. 14. Архитектура программного обеспечения осциллографического комплекса.

Программные устройства высокого уровня получают данные от одного или нескольких устройств нижнего уровня и преобразуют их по заданному закону. Так Linear возвращает линейную комбинацию входных осциллограмм и используется для вычисления суммы напряжений, что, напомним, определяет энергию, а BPM преобразует полученные данные в координаты пучка и интенсивность.

Поддерживаемые на момент разработки базы данных либо не предоставляли эффективного способа хранения осциллограмм, либо их использование требовало дополнительных вычислительных ресурсов и было неоправданно. Для преодоления этого ограничения авторами статьи были сделаны необходимые дополнения в программное обеспечение баз данных.

На уровне представления находятся графические приложения, которые можно разделить на следующие группы: инженерные (Engineer), табличные (Table Widget), средства доступа к архивным данным (Archive Viewer) и универсальный просмотрщик осциллограмм. Инженерные программы являются базовыми инструментами и предоставляют полный доступ к модулям, предназначены для пусконаладки, тестирования и устранения неисправностей. Табличные виджеты предназначены для удобной работы с большим количеством устройств и адаптированы под определенные сценарии использования. Универсальный построитель осциллограмм позволяет просматривать осциллограммы из разных источников:

ADC4x250, ADCx32 или программных устройств верхнего уровня.

Таким образом, реализованный набор программного обеспечения позволил оператору удобным образом настраивать устройства комплекса цифровой осциллографии, отслеживать их работоспособность и, что самое главное, сохранять, изучать и сравнивать с историей полученные данные о работе рентгенографического комплекса ЛИУ-20.

В следующем разделе приведено несколько примеров, демонстрирующих методики работы с большим количеством осциллографических данных.

6. МЕТОДИКИ РАБОТЫ С ОСЦИЛЛОГРАММАМИ

Большую часть информации о состоянии ускорителя во время его работы оператор получает из осциллограмм. Во время высоковольтных испытаний, настройки ускорителя и проводки пучка анализ осциллограмм с датчиков различных типов является главной деятельностью оператора и основанием для выполнения тех или иных операций.

Как отмечалось в табл. 1, объем осциллографических данных, поступающих на мониторы пульта управления с каждым импульсом ускорителя, весьма велик. Создавая комплекс цифровой осциллографии, авторы опасались, что огромное количество осциллограмм сделает очень сложным визуальный анализ оператором предоставляемой информации и определения необходимых

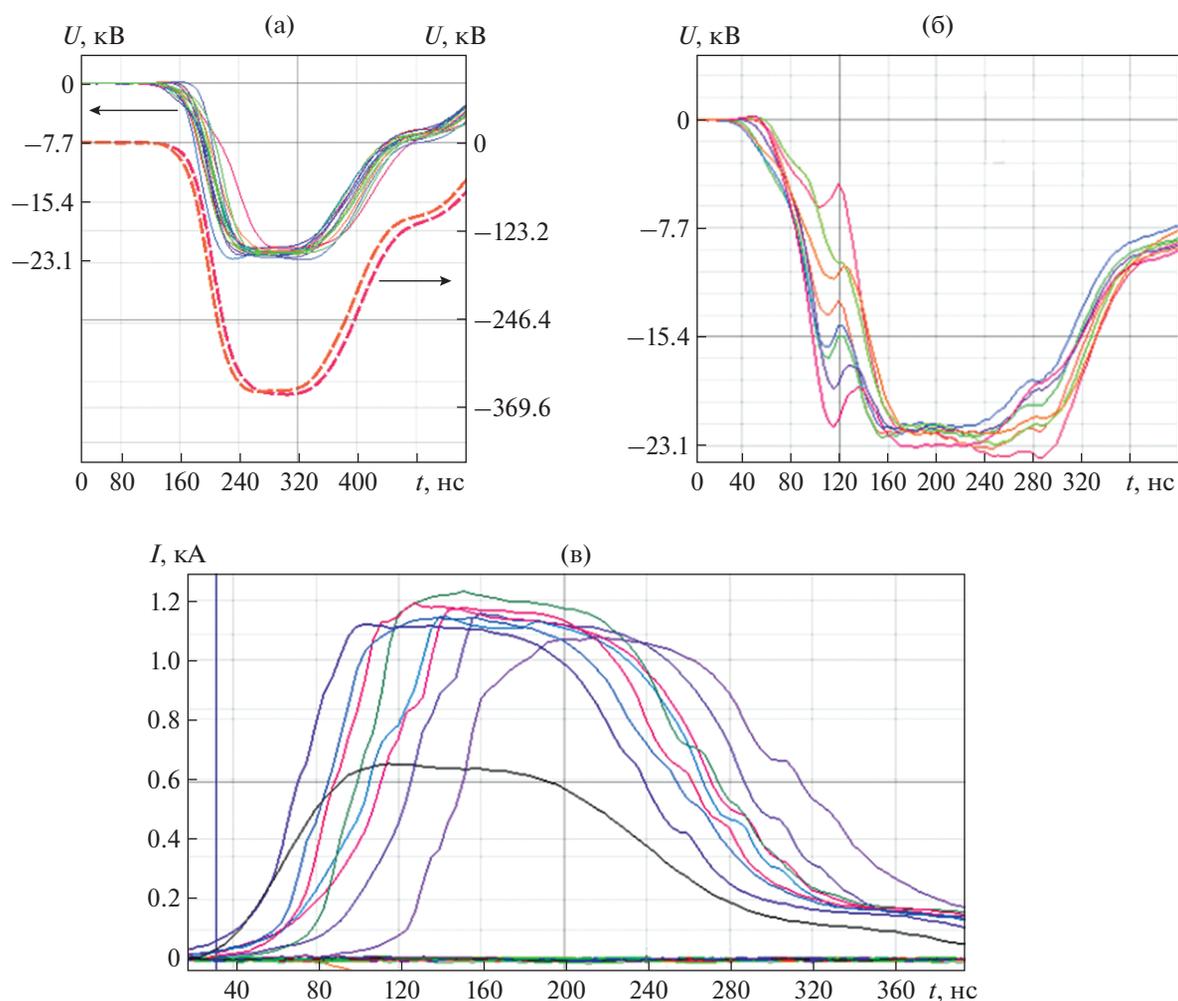


Рис. 15. Демонстрация осциллограмм “быстрых” сигналов: **а, б** – импульсы с высоковольтных делителей напряжения ускоряющих модулей (штриховыми линиями выделена сумма напряжений для каждой группы сигналов); **в** – сигналы с трансформаторов тока.

действий в различных ситуациях. В этой связи рассматривались возможные способы автоматизации этого анализа, как, например, предпринималось в [14, 15]. Однако работа с установкой в течение нескольких месяцев показала, что при продуманном способе представления осциллограмм опытный оператор в состоянии проводить визуальный анализ и принимать решения о необходимых действиях, хотя поиск надежных алгоритмов с целью автоматического выявления проблемных устройств будет продолжаться.

Опишем способы представления и методики работы с осциллограммами.

К осциллограммам, которые подлежат рассмотрению после каждого выстрела, относятся осциллограммы “быстрых” сигналов (импульсы с высоковольтных делителей напряжения, трансформаторов тока и датчиков положения пучка). Количество осциллограмм высокого напряжения

на индукторах инжектора и ускоряющих модулей достигает 480. Для удобства анализа они объединяются в группы по 8 согласно ускоряющим модулям, а на монитор выводится две группы (16 каналов), соответствующие двум соседним ускоряющим модулям (рис. 15а). Как видно из рисунка, anomalous поведение ускоряющих напряжений вполне заметно. На графиках также показывается сумма напряжений для каждой группы (штриховые линии на рис. 15а), фактически отображающая прирост энергии пучка в соответствующих ускоряющих модулях.

Состояние инжектора отображается двумя группами по 24 осциллограммы. При первичной настройке системы импульсного питания ускорителя эти осциллограммы служат для определения стабильности работы коммутирующих устройств – тиратронов, а также для правильной расстановки времен запуска модуляторов. На

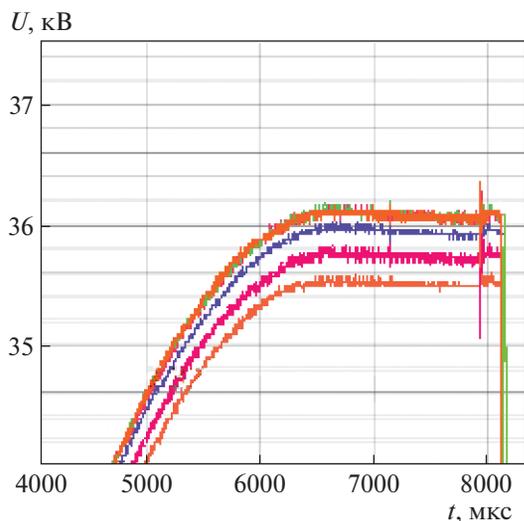


Рис. 16. Осциллограмма напряжения на формирующих линиях нескольких модуляторов.

рис. 15б показана ситуация, когда высоковольтные модуляторы одного из ускоряющих модулей были запущены раньше, чем в данном модуле оказался пучок, а на рис. 15а видно, что один из модуляторов запускается позже необходимого.

Сигналы с трансформаторов тока всего ускорительного тракта выводятся на один график (рис. 15в). Сигналы с трансформаторов тока и датчиков положения используются при настройке прохождения пучка через электронно-оптическую систему для определения амплитуды тока, формы и положения электронного пучка в различных сечениях ускорителя. Изменения в этих осциллограммах при отсутствии оперативных вмешательств могут свидетельствовать в основном о неисправностях в системе фокусировки и коррекции пучка.

По завершении настройки ускорительного тракта в регулярной работе осциллограммы “быстрых” сигналов позволяют оценить величину и разброс энергии электронного пучка, а любые изменения их формы служат сигналом о некорректной работе системы высоковольтного питания.

Осциллограммы медленных, технологических сигналов, к которым относятся напряжения на формирующих линиях модуляторов, тока размагничивания и токи импульсных линз, необходимы лишь в процессе настройки, а в регулярной работе носят справочный характер. Эти сигналы также выводятся группами в соответствии с ускорительными модулями (рис. 16). Обращаться к медленным сигналам приходится для определения адекватности текущих и заданных значений параметров, а также при обнаружении неисправно-

стей в работе ускорителя для уточнения их источников.

Все данные за выстрел автоматически сохраняются в архив с указанием даты и времени их получения. При необходимости определить долгосрочную стабильность работы ускорителя, данные с каждого датчика (либо их группы) за весь интересующий оператора период можно вывести на одном графике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан программно-аппаратный комплекс, с помощью которого регистрируются, визуализируются и архивируются осциллограммы нескольких сотен импульсных сигналов, поступающих от датчиков ускорителя ЛИУ-20, предназначенного для рентгенографических экспериментов. Комплекс, являющийся частью системы управления ускорителя, предоставляет исчерпывающую информацию о функционировании установки. Аппаратная инфраструктура комплекса базируется на стандарте VME64x с доработками, допускаемыми этим стандартом, что обеспечивает организацию межмодульной синхронизации (VME64-BINP). Программное обеспечение реализовано на основе платформы Tango.

Аппаратура и программное обеспечение введены в эксплуатацию более полугода назад и активно используются для поэтапной наладки оборудования установки и получения пучков с нужными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Archuleta R., Sanchez L. // Proc. LINAC08. Victoria, BC, Canada. 2008. P. 337.
2. Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978.
3. Akimov A., Bak P., Batrakov A., Chernitsa A., Khrenkov S., Nikitin O., Pavlov O., Petrov D., Zhelezkin D., Zhivankov K. // Proc. 21st International Conference on Pulsed Power. Brighton, UK. 2017. P. 832.
4. Akimov A., Akhmetov A., Bak P., Baydak A., Chernitsa A., Egorychev M., Fedorova L., Eliseev A., Khrenkov S., Kulenko Ya., Ottmar A., Pachkov A., Panov A., Pavlov O., Petrov D., Zhivankov K. // Proc. 21st International Conference on Pulsed Power. Brighton, UK. 2017. P. 829.
5. Fatkin G., Baluev A., Batrakov A., Bekhtenev E., Kotov E., Macheret Ya., Mamkin V., Ottmar A., Pavlenko A., Panov A., Selivanov A., Selivanov P., Senchenko A., Serebnyakov S., Shiro K., Singatulin S. // Proc. ICALEPCS. Barcelona, Spain. 2017. P. 1485. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALPCS2017-THPFA052>
6. Fatkin G., Baluev A., Batrakov A., Kotov E., Macheret Ya., Mamkin V., Pavlenko A., Panov A., Selivanov A. // Proc. ICALEPCS 2017. Barcelona, Spain. 2017

7. *Батраков А.М., Васильев М.Ю., Котов Е.С., Штро К.С.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 58.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220020093>
8. Техническое описание высоковольтных резисторов Vishay.
<http://www.vishay.com/resistors-fixed/list/product-30101/>
9. *Батраков А.М.* Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2011. 231 с.
10. Преобразование информации в аналого-цифровых устройствах и системах / Под ред. Г.М. Петрова. М.: Машиностроение, 1973.
11. *Kotov E.S., Batrakov A.M., Fatkin G.A., Pavlenko A.V., Shtro K.S., Vasilyev M.Yu.* // Proc. ICALEPCS. Barcelona, Spain. 2017. P. 1291.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THMPL09>
12. *Fatkin G., Baluev A., Batrakov A., Kotov E., Macheret Ya., Mamkin V., Pavlenko A., Panov A., Selivanov A.* // Proc. ICALEPCS. Barcelona, Spain. 2017. P. 1294.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THMPL10>
13. <https://www.tango-controls.org/>
14. *Merle E., Delvaux J., Mouillet M.* // Proc. 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago. 2001. P. 3478.
15. *Фаткин Г.А.* // Автометрия. 2015. Т. 51. № 1. С. 22.