

Цифровые комплексы разработки ВНИИТФ для облучательных физопытов

В. Л. СОРОКИН, М. В. ГАЛИЦКИЙ

В конце 1960-х гг. в РФЯЦ-ВНИИТФ были созданы уникальные комплексы на основе магнитных барабанов, которые в облучательных физических и др. опытах обеспечили многоканальные дискретные измерения временных интервалов, а также параметров и форм электрических сигналов. В 1980-е гг. стали применяться многоканальные аналого-цифровые комплексы с квантованием по уровню. Для надежного обеспечения измерений по десяткам-сотням каналов с заданной точностью при допустимом уровне затрат часть аппаратуры выносилась в ближнюю зону ядерного взрыва, где, как правило, она разрушалась.

Особенности проведения облучательных физических опытов. Облучательные физические опыты (физопыты) предназначались для изучения воздействия излучений и механической энергии (поражающих факторов) ядерного взрыва (ЯВ) на исследуемые объекты, а также проверки их стойкости к таким воздействиям. Это были наиболее сложные и насыщенные измерительным оборудованием эксперименты с применением специальных ядерных физических установок, выполнявших роль источников мощного импульсного ионизирующего излучения.

Методики физических измерений, задействованные в физопытах, можно условно разделить на две группы: методики, предназначенные для измерений основных характеристик ионизирующего излучения ЯВ – гамма-нейтронного и рентгеновского, и методики исследований воздействия рентгеновского и гамма-нейтронного излучений на радиоэлементы и конструкционные материалы ядерных зарядов и боеприпасов. Эти воздействия приводят к механическим повреждениям элементов конструкций ядерных зарядов и боеприпасов, а также к обратимому и необратимому выходу из строя радиоэлементов.

Особенностью организации измерений первой группы является сложность регистрации сигналов детекторов, особенно рентгеновского излучения. Как правило, это одиночные электрические импульсы наносекундной длительности в широком динамическом диапазоне ам-

плитуд ($U_{\text{макс}}/U_{\text{мин}} \sim 10^5$). Регистрация сигналов по второй группе выделяется применением значительного числа (десятки и сотни) каналов, необходимых для получения статистических характеристик нескольких измеряемых параметров динамических процессов, происходящих в испытываемых образцах, исчисляемых десятками и сотнями. Поэтому при проведении физопытов одной из первоочередных задач было обеспечение многоканальности измерений.

«Безосциллографическая» регистрация. Практика физизмерений параметров однократных процессов 1950–1960-х гг. выявила существенные недостатки регистрации посредством осциллографов с электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ):

- возможность потери результатов измерений, записанных на фото пленку, в неблагоприятных радиационных условиях;
- неоперативность и субъективные ошибки обработки данных эксперимента из-за ручной обработки полученных осциллограмм;
- недостаточная надежность осциллографов с фотоприставками;
- невысокая точность измерений из-за недостаточного амплитудно-временного разрешения;
- ограниченность (до 20–30 каналов) и сложность организации многоканальных измерений из-за громоздкости осциллографов.

Более полно условиям физизмерений могли соответствовать так называемые в то время безосциллографические регистраторы (они же – аналого-цифровые или просто цифровые), различными способами реализующие принцип преобразования непрерывной аналоговой величины в дискретную последовательность цифровых кодов. В дальнейшем они обеспечили как повышение точности измерений, так и существенно более простую и надежную передачу, запись, копирование, хранение и обработку экспериментальной информации в виде цифровых кодов вследствие их более простого сопряжения с телеметрическими каналами и средствами вычислений.

Первыми цифровыми регистраторами стали приборы с преобразованием исходного измеряе-

мого параметра во временной интервал, так как исторически сложилось так, что из всех физических величин именно время измеряется наиболее надежно и точно, а косвенные измерения ряда других физических величин чаще всего основаны на измерениях времени. Позднее появились регистраторы, реализующие другие, более сложные и более быстродействующие способы аналого-цифрового преобразования.

Несмотря на преимущества цифровых регистраторов, их применение на полигонах в 1960-х гг. было весьма ограничено, что объяснялось отсутствием серийных цифровых устройств, пригодных для эксплуатации в специфических условиях, а также сложностью разработки и изготовления таких устройств собственными силами организаций, участвующих в ядерных испытаниях. Полигонным цифровым измерителям времени предшествовали приборы ИВ-0,1 разработки Б. А. Предёина (1956 г.) (отделение экспериментальной физики ВНИИТФ) и ИВИ-1 разработки Л. С. Зажигаева (КБ-2 ВНИИТФ); с 1958 г. для контроля блоков автоматики началась эксплуатация приборов разработки ВНИИА и ВНИИТФ (ПКА, ФЭР, ПКВ и ПУ).

В 1968 г. В. М. Фомченковым была предложена и реализована методика регистрации и телеметрии интегрального во времени спектра рентгеновского излучения, суть которой заключалась в аналоговом интегрировании сигналов от вакуумных или полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, запоминании интегральных значений, преобразовании этих значений во временные интервалы, передаче интервалов по линии связи и автоматической обработке результатов измерений с выдачей их на бумажную ленту. То есть алгоритм регистрации проходил по схеме «интеграл–амплитуда–время» (« $\int \rightarrow A \rightarrow t$ »). Эта методика обладала меньшей погрешностью измерений по сравнению с осциллографической регистрацией формы электрического сигнала, по которой вычислялся его интеграл: $\pm 5\%$ против $\pm 15\text{--}20\%$.

Методика исследования воздействия рентгеновского излучения на автоматику боевой части и ее элементы изучала, в частности, механические повреждения полупроводниковых приборов и образцов в определенный момент времени после такого воздействия. Применялись два способа регистрации. Первый алгоритм: а) дискретная выборка мгновенного значения сигнала с датчика (или несколько выборок в фиксированные моменты времени); б) преобразование выбранного значения амплитуды во временной

интервал (и далее в код), что отражается схемой « $U(t) \rightarrow A \rightarrow t$ ». Второй алгоритм: а) дискретные выборки мгновенных значений сигнала датчика с шагом квантования по времени, устанавливаемым с учетом динамики сигнала датчика; б) преобразование выбранных значений во временные интервалы (затем в коды), то есть « $U(t) \rightarrow A_i \rightarrow t_i$ ».

В физопытах значительную долю составляли измерения, связанные с механическими перемещениями элементов конструкции заряда под воздействием на них нейтронных потоков. Логика регистрации состояла в дискретной выборке мгновенных значений сигналов индуктивных и термодатчиков с заданным шагом временного квантования, запоминании выбранных значений квазипостоянного напряжения и преобразовании их во временные интервалы (и далее в коды): « $U(t_i) \rightarrow A_i \rightarrow t_i$ ».

Особую группу измерений составляли многоканальные измерения при газодинамической обработке изделий на внутренних полигонах. Информация этих методик заключена во временных интервалах между моментами срабатывания электроконтактных датчиков. Широко применявшиеся масштабно-временные преобразования, в частности, метод «короткий интервал времени – амплитуда импульса – длинный интервал времени» (« $t \rightarrow A \rightarrow t$ »), позволили регистрировать временные интервалы длительностью до 1 мкс с низкими абсолютной и относительной ($\sim \pm 1\%$) погрешностями.

В целом, разнообразные способы преобразования входной аналоговой величины во временной интервал позволили свести регистрацию во всех указанных выше методиках к измерению временных интервалов: « $\int \rightarrow A \rightarrow t$ », « $A \rightarrow t$ », « $U(t_i) \rightarrow A_i \rightarrow t_i$ », « $t \rightarrow A \rightarrow t$ ». При этом для определенной группы физметодик обеспечение измерений амплитудно-временных параметров сигналов с высокой точностью потребовало применения многоканальной регистрации временных интервалов в микромиллисекундном диапазоне с динамическим диапазоном $10^3 \dots 10^4$. Причем значительный для 1960-х гг. поток измерительной информации (~ 300 Кбит) достаточно остро поставил вопрос ее преобразования в цифровой код.

Магнитный барабан – аналоговое многоканальное запоминающее устройство. Во второй половине 1960-х гг. сложилась ситуация, когда с одной стороны существовали значительные преимущества цифровых методов регистрации перед аналоговыми, а с другой – сохранялись

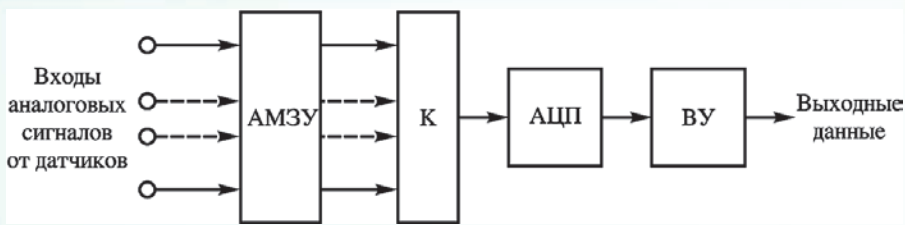


Рис. 1. Структурная схема многоканального АЦ-регистратора. АМЗУ – аналоговое многоканальное запоминающее устройство, К – аналоговый коммутатор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВУ – устройства вывода данных

высокая стоимость и сложность электронного оборудования. Это противоречие было разрешено разумным сочетанием аналоговых и цифровых методов регистрации – во ВНИИТФ был предложен и осуществлен способ построения многоканальных систем физизмерений на базе аналогового многоканального запоминающего устройства и последующей цифровой обработки аналоговых сигналов (рис. 1). Достоинство такого способа – резкое сокращение количества цифрового оборудования без заметного снижения точности регистрации.

Для реализации аналогового многоканального запоминающего устройства были отвергнуты запоминающие ЭЛТ с электрическим считыванием и линии задержки, так как они не могли обеспечить многоканальность, высокое амплитудно-временное разрешение и сохранность информации при обесточивании. Были выбраны электромеханические запоминающие устройства циклического типа – магнитные барабаны (МБ, рис. 2). Во ВНИИТФ были детально исследованы их временные метрологические характеристики. Возможность работы с высокой степенью надежности в неблагоприятных условиях эксплуатации, высокая радиационная стойкость, многоканальность при большой информационной емкости канала, стабильность временных параметров, многократное воспроизведение записанной

информации, значительный диапазон регистрации, высокая точность временных измерений (~15 нс), возможность применения стробоскопических методов анализа, а также легкость сопряжения с цифровыми системами обработки данных обусловили на десятилетие широкое применение (особенно в физопы-

тах) магнитных барабанов в качестве регистраторов временных интервалов в многоканальных комплексах физизмерений ВНИИТФ, не имевших аналогов.

КАИС – многоканальный комплекс автоматизированных измерительных средств для радиационных исследований свойств спецматериалов и для физизмерений. В конце 1970-х гг. отсутствие серийных многоканальных приборов для регистрации формы импульсных сигналов подтолкнуло к их разработкам одновременно во ВНИИТФ, ВНИИЭФ и НИИИТ. Разработанные во ВНИИТФ системы с магнитными барабанами, несмотря на их экономичность и надежность, уступили со временем более перспективным системам, основанным на дискретизации исследуемого процесса способом быстрых выборок с временным хранением мгновенных значений сигнала, их аналого-цифровым преобразованием и последующей передачей – записью в цифровом виде. В результате появились приборы КАИС (ВНИИТФ), МИФИС (ВНИИЭФ) и СУПИ-16, -18, -19 (НИИИТ), которые имели ряд общих черт: магистраль передачи данных, модульная конструкция и микропрограммное управление. Во ВНИИТФ было создано две модификации прибора КАИС (табл. 1). КАИС-1 для каждого из 10 измерительных модулей реализовал структуру «8 входных каналов–коммутатор–АЦП–ЗУ» (рис. 3). КАИС-1 отличался от классических многоканальных структур возможностью оцифровки сигналов с различной скоростью в отдельных каналах. Позднее НИИИТ разработал аналогичный КАИС прибор (СУПИ-18). КАИС-2 предназначался для дистанционных измерений формы импульсов в ближней зоне ЯВ по структуре «входные каналы–коммутатор–АЦП–ЗУ–модем–линия передачи–модем–ЗУ» (рис. 4). КАИС-1 и КАИС-2 каждый предоставляли 80 каналов, в которых сигналы проходили сквозь коммутаторы, или 10 так называемых прямых каналов, в которых сигналы проходили мимо коммутаторов.

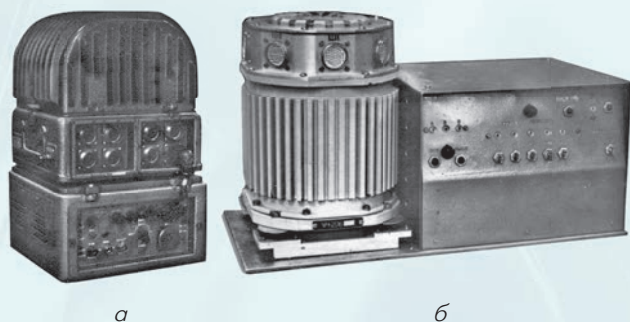


Рис. 2. Внешний вид магнитных барабанов, применявшихся во ВНИИТФ для физизмерений: а – МБ-1, б – УН-206

Таблица 1

Технические характеристики КАИС-1 и КАИС-2

Параметр	КАИС-1	КАИС-2
Полоса пропускания	100 кГц	5 кГц
Разрядность АЦП	9 бит	10 бит
Время преобразования	2,5 мкс	20 мкс
Время регистрации	2,58–69,12 мс	30 мс

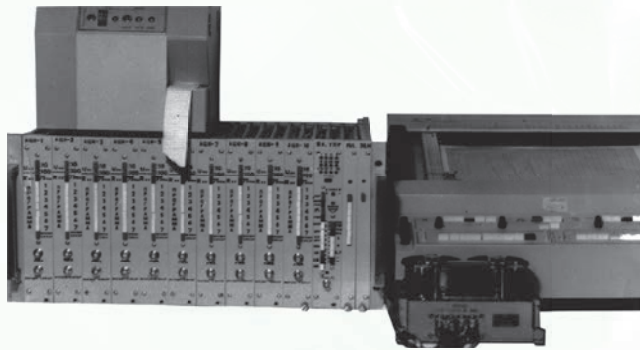


Рис. 3. Внешний вид цифрового комплекса КАИС-1



Рис. 4. Блок-схема измерений с применением цифрового комплекса КАИС-2 (дистанционный)

Аппаратура в ближней зоне подземного ядерного взрыва. Обеспечение многоканальных измерений – особенно в физопытах – требует прокладки сотен кабельных линий длиной более километра, что ведет к большим материальным и финансовым затратам. Кроме того, в большинстве физметодик для однозначной и качественной интерпретации результатов измерений требуется процедура восстановления сигналов, искаженных при передаче по длинной кабельной линии. Также для минимизации влияния элементов измерительного тракта на результаты измерений по другим методикам желательно (а зачастую необходимо) обеспечить плотную однородную забивку вблизи заряда. Поэтому измерительная многоканальная система должна была обладать еще и свойствами «уплотнителя» каналов передачи информации, транслирующего данные от нескольких входов по одному выходу. Решением такой проблемы стало размеще-

ние измерительной аппаратуры в ближней зоне подземного ЯВ (до 200 м от ядерной установки): экономились сотни километров дорогого радиочастотного кабеля, что резко удешевляло стоимость исследований; радикально сокращалась длина линий связи датчиков с регистраторами, что значительно снижало искажения измеряемых сигналов.

Впервые идея аппаратуры для ближней зоны ЯВ была сформулирована во ВНИИТФ В. М. Фомченковым в 1967 г. Уже в 1969 г. вынесенные в ближнюю зону многоканальные телеметрические системы передавали измерительные сигналы с информацией о временных интервалах по одному общему радиочастотному кабелю для регистрации на магнитном барабане, впервые были получены уникальные результаты по стойкости элементов РЭА к воздействию сверхжесткого рентгеновского излучения. Также в 1967 г. с учетом результатов применения «лямбдометра» (прибора разработки Б. А. Предеина с дискретным определением моментов срабатывания туннельных диодов по мере роста сигнала детектора) З. А. Альбикив и И. П. Волобуев предложили использовать дискретный метод измерений временных параметров гамма-излучения, состоявший в регистрации моментов времени достижения сигналом четырех-шести установленных пороговых уровней. Простая реализация преобразования « $U-t$ » позволила располагать такие аналоговые устройства рядом с детекторами, что существенно улучшило временное разрешение измерений.

Существенным недостатком установки в ближней зоне вторичных измерительных преобразователей является большая вероятность их частичного или полного уничтожения, что часто происходило на практике (впервые в январе 1971 г.). Поэтому выносные преобразователи должны были иметь минимальное «мертвое» время между последовательными актами преобразования и максимальную скорость считывания информации в удаленное на безопасное расстояние запоминающее устройство. Вместе с тем применение многоканальных цифровых комплексов ВНИИТФ для регистрации именно форм электрических сигналов в облучательных физопытах практически стало штатным в 1980–1988 гг., а также показало свою высокую эффективность при проведении натуральных опытов.

Развитие такой аппаратуры во ВНИИТФ проходило в два этапа. На первом этапе (1980–1985 гг.) цифровая аппаратура ВНИИТФ для

Основные параметры многоканальных комплексов для регистрации в ВЗ ЯВ «быстрых» и «медленных» сигналов

Параметр	Комплекс для «быстрых» сигналов	Комплекс для «медленных» сигналов
Количество каналов преобразования	3	2 × 64
Максимальная частота дискретизации	50 МГц	$(54 \text{ мкс})^{-1} = 18,518 \text{ кГц}$
Количество двоичных разрядов АЦП	7 бит	12 бит

ВЗ ЯВ в основном была реализована на схемно-технических решениях, разработанных в рамках НИР на КАИС (рис. 3), которые успешно применялись в облучательных и натуральных опытах, а также на физустановках ВНИИТФ. Именно в физопытах впервые была проверена идеология оцифровывания сигнала с последующей записью информации в оперативное запоминающее устройство и ее передачей по одному длинному кабелю (рис. 4).

В процессе применения цифровых регистраторов типа «КАИС-дистанционный» была впервые опробована цифровая система регистрации сигналов дозовых детекторов гамма- и рентгеновского излучений, которая включала в себя комплекс аппаратуры, размещаемый в измерительной нише в штольне, и аппаратный комплекс КАИС, размещаемый в фургоне на устье штольни. Были проведены измерения мягкой части рентгеновского излучения на позиции 200 м от ядерных физустановок, отработка методики по регистрации формы волны механических напряжений, измерения полей нагружения по стандартным и разрабатывавшимся физметодикам (в основном, спектральные измерения и измерения малых доз сверхжесткого рентгеновского излучения). При этом с целью сокращения длинных кабельных линий большая часть каналов регистрации была цифровой с применением электронных коммутирующих устройств, расположенных в штольне в непосредственной близости от испытуемых объектов. Были выполнены измерения и получены результаты от 60 датчиков с преобразованием информации и ее последующей передачей по одной кабельной линии. Дистанционные измерения на КАИС-2 позволили в дальнейшем выносить в ближнюю зону более сложную аппаратуру.

Второй этап связан с интенсивным внедрением схемотехнических разработок Института ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР в стандарте КАМАК, а также приборов и модулей семейства СУПИ разработки НИИИТ. Были созданы макеты цифровых измерительных комплексов для регистрации «быстрых» (до ~500 мкс) и «медленных» (до ~20 мс) сигналов (табл. 2). Выносные преобразовательно-передающие блоки, размещаемые в ближней зоне, соединялись с регистрирующей аппаратурой одним радиочастотным кабелем (рис. 4).

Цифровой телеметрический комплекс, созданный для регистрации «быстрых» сигналов на базе разработок ВНИИТФ, а также блоков и

стандартного конструктива СУПИ, был применен в физопыте в 1987 г. В фургоне, как обычно, размещалась сохраняемая аппаратура управления и регистрации, а в ближней зоне (на отметке ~100 м) – одноканальный аналого-цифровой прибор (5 бит, 50 МГц), впоследствии уничтоженный взрывом. Тогда впервые для стандартной методики с «быстрыми» сигналами были получены данные из ближней зоны, не искаженные длинными кабелями.

Результаты описанных работ позволили оптимистически рассматривать вопрос широкого применения в ядерных испытаниях цифровой измерительной техники. Для облучательных и натуральных опытов были предложены, реализованы и успешно применены в составе многих физметодик РФЯЦ-ВНИИТФ цифровые измерительные комплексы с распределенной структурой, основанной на измерительных преобразователях, вынесенных в ближнюю зону ядерного взрыва и передающих результаты преобразований по одному кабелю в регистраторы, удаленные от места взрыва на безопасное расстояние.

С полным основанием можно сказать в заключение, что переход от аналоговой аппаратуры на цифровую технику позволил повысить надежность получения измерительной информации, ее точность и оперативность экспресс-обработки.

СОРОКИН Вячеслав Леонтьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник отделения экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИТФ, лауреат Государственной премии СССР

ГАЛИЦКИЙ Максим Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отделения экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИТФ