



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2000 - 5  
На правах рукописи

**Сенько Владимир Александрович**

**СИСТЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ОТБОРА  
ФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ УСТАНОВОК ИФВЭ**

01.04.23 – физика высоких энергий

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
в виде научного доклада на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Протвино 2000

Диссертация выполнена в Государственном научном центре РФ "Институт физики высоких энергий" (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Ю.К. Акимов (ОИЯИ, г. Дубна), доктор технических наук, профессор Ю.А. Волков (МИФИ), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук С.П.Денисов (ИФВЭ).

Ведущая организация – Институт ядерных исследований РАН РФ (г. Троицк).

Защита диссертации состоится "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2000 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, Протвино Московской области.

С диссертацией в виде научного доклада можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Диссертация в виде научного доклада разослана "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2000 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д034.02.01

Ю.Г.Рябов

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Общая характеристика работы. ....</b>	<b>3</b>
Актуальность проблемы.	
Цель работы.	
Научная новизна.	
Практическая ценность.	
Тезисы к защите.	
Сообщения и публикации по теме диссертации.	
Объем и структура диссертации.	
<b>2. Анализ требований, предъявляемых к системам преобразования, регистрации и отбора физической информации. ....</b>	<b>5</b>
2.1. Основные параметры ускорительного комплекса ИФВЭ.	
2.2. Развитие детекторов и физических установок ИФВЭ.	
2.3. Характерные особенности системы преобразования, регистрации и отбора физической информации.	
<b>3. Многоканальная электронная аппаратура аналого-цифрового преобразования ....</b>	<b>11</b>
3.1. Требования к аналого-цифровой аппаратуре.	
3.2. Аналого-цифровые преобразователи первого поколения.	
3.3. Интегральная схема КР1101ПД1 преобразования "заряд-время".	
3.4. Аналого-цифровые преобразователи с применением интегральной схемы КР1101ПД1.	
3.5 16-канальный модуль высокоточных время-цифровых преобразователей.	
<b>4. Электронная аппаратура регистрации, отбора и предварительной обработки физической информации. ....</b>	<b>28</b>
4.1. Модуль 32-канального стробируемого регистра с мажоритарной логикой.	
4.2. Система модулей логической наносекундной электроники.	
4.3. Организация передачи информации на основе протокола МИСС.	
4.4. Модули памяти и автономные контроллеры для их управления.	
4.5. Автономные контроллеры для предварительной обработки и передачи информации с аналого-цифровых преобразователей.	
<b>5. Применение системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации в установках ИФВЭ. ...</b>	<b>49</b>
5.1. Система сбора данных экспериментальной установки ФОДС-2.	
5.2. Система сбора данных экспериментальной установки СФИНКС-М.	
<b>Заключение. ....</b>	<b>58</b>

# **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность проблемы**

В ИФВЭ интенсивно ведутся исследования в области физики высоких энергий на крупных экспериментальных установках, характерной особенностью которых является наличие десятков тысяч каналов регистрации физической информации. Одной из основных составляющих этих установок являются электронные системы сбора и первичной обработки данных. Исследования все более сложных физических процессов требуют создания новых или модернизации действующих установок, что выражается в увеличении числа каналов регистрации существующих установок, внедрении новых детекторов, росте потока информации, поступающей на системы сбора данных. Это, в свою очередь, влечет за собой необходимость повышения эффективности регистрации и отбора физической информации, скорости набора статистики и возможности гибкого изменения критериев полезных физических событий в процессе проведения эксперимента. Решение этих задач и определило актуальность разработки и создания системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации.

## **Цель работы**

Основная цель диссертационной работы – разработка, создание и внедрение системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации в экспериментальные установки ИФВЭ.

**Научная новизна** работ, составивших диссертацию, состоит в следующем:

1. Разработан, экспериментально исследован и внедрен в состав физических установок широкий набор аналого-цифровых модулей (преобразование "заряд-цифра", "напряжение-цифра", "время-цифра").
2. Впервые разработана отечественная специализированная интегральная схема преобразователя "заряд-время" КР1101ПД1 для использования в приборах ядерной физики и других областях (совместно с ПО "РОДОН").
3. Впервые предложена, разработана и внедрена на экспериментальных установках оригинальная система логической наносекундной электроники.
4. Разработана и широко используется в физических установках многоступенчатая скоростная система предварительной обработки и передачи информации, поступающей от детекторов частиц, на базе протокола МИСС.

5. Впервые предложена, разработана и внедрена в состав экспериментальных установок ИФВЭ система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации.

**Практическая ценность** исследований и разработок, вошедших в диссертацию, заключается в следующем:

1. Освоено малосерийное производство аналого-цифровой аппаратуры для съема информации с калориметров, координатных детекторов, профилометров и систем управления и автоматизации. Изготовленная аппаратура, насчитывающая более 7000 каналов аналого-цифрового преобразования, успешно эксплуатируется на установках и стендах ИФВЭ, ИЯИ, НИИЯФ МГУ и др.
2. Разработана и внедрена в промышленность интегральная схема КР1101ПД1 преобразования заряда импульса во временной интервал (изготовлено более 150 тысяч микросхем).
3. Внедрена практически во все экспериментальные установки и стенды ИФВЭ система логической наносекундной электроники, насчитывающая 8 типов модулей; в настоящее время находится в эксплуатации более 1500 модулей.
4. Создана и внедрена в экспериментальные установки многоступенчатая скоростная система предварительной обработки и передачи информации на базе протокола МИСС.
5. Создана и внедрена на установках ФОДС-2, ВЕС, СФИНКС-М, РАМПЕКС и ИСТРА-М система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации, включающая в свой состав 27 типов модулей.
6. На основе созданной системы проведен ряд успешных физических экспериментов.

**Автор защищает:**

1. Разработку и внедрение широкого набора модулей аналого-цифрового преобразования.
2. Разработку и внедрение оригинальной системы наносекундной электроники регистрации и отбора экспериментальных событий.
3. Разработку и создание многоступенчатой скоростной системы предварительной обработки и передачи физической информации на базе протокола МИСС.
4. Создание и внедрение системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации в экспериментальные установки ИФВЭ.

### **Сообщения и публикации по теме диссертации**

Работы, составляющие основное содержание диссертации, опубликованы в виде статей в отечественных и зарубежных изданиях, в журналах "Электронная промышленность", "Instruments and Experimental Techniques", "Приборы и техника эксперимента", "Zeitschrift fur Physik", "Nuovo Cim", в трудах международных симпозиумов и всесоюзных семинаров, а также в виде препринтов ИФВЭ. Результаты работ докладывались на научных семинарах ИФВЭ, 3-ем Всесоюзном семинаре по обработке физической информации (г. Ереван, 1985), 12-ом Международным симпозиуме по ядерной электронике (г. Дубна, 1985), 5-ом Всесоюзном семинаре по автоматизации исследований в области ядерной физики (г. Ташкент, 1988), 3-ем Всесоюзном совещании по автоматизации научных исследований в ядерной физике (г. Алма-Ата, 1987).

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация в виде научного доклада изложена на 60 страницах, состоит из 5 глав и заключения. Содержит 25 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 20 наименований.

## **2. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К СИСТЕМАМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ОТБОРА ФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

### **2.1. Основные характеристики ускорительного комплекса ИФВЭ**

Построение физических установок в ИФВЭ и экспериментальная программа на них во многом определяются существующим ускорительным комплексом, который был запущен в 1967 г. и к настоящему времени значительно модернизирован как по оборудованию, так и по составу образующих его систем. Комплекс включает линейный ускоритель протонов на 30 МэВ при рабочем значении тока до 100 мА, быстро циклирующий кольцевой инжектор на 1.5 ГэВ ("бустер"), протонный синхротрон с энергией ускоренных протонов до 76 ГэВ, системы вывода пучка и каналы транспортировки частиц. Введение в строй бустера в 1983 г. позволило увеличить интенсивность пучка основного ускорителя в 50 раз и довести ее до нескольких единиц на  $10^{13}$  прот/цикл.

Цикл работы системы магнитов синхротрона таков, что стабилизация магнитного поля на уровне 1.2 Тл (энергия пучка 70 ГэВ) поддерживается 2 с при общей длительности одного цикла ускорения в рабочем режиме равной 9.5 с. Системы вывода осуществляют вывод пучка из ускорителя и формирование его с требуемыми для физического эксперимента параметрами. На ускорителе используются четыре метода вывода пучка, каждый из которых охватывает свой диапазон энергий и интенсивностей выводимых

пучков. Вывод с внутренних мишеней осуществляется смещением протонов с центральной орбиты и наведением их на мишень. При этом энергия вторичных частиц составляет от 10 до 60 ГэВ, интенсивность – до  $10^7$  частиц/цикл, а длительность сброса пучка на установку – до 2 с. Этот метод, достоинством которого является высокая эффективность использования ускоренного пучка (90%), допускает одновременную работу с тремя мишенями, но при больших интенсивностях становится серьезной проблемой активация оборудования. Поэтому для вывода высокоинтенсивного пучка применяются так называемые быстрый и медленный выходы протонного пучка на внешние мишени.

Быстрый вывод используется в настоящее время для проведения экспериментов по нейтринной физике и дает возможность сбрасывать на внешнюю мишень пучок протонов интенсивностью до  $1.5 \cdot 10^{13}$  протонов/цикл и длительностью вывода до 5 мкс. Для экспериментов с электронной методикой используется система медленного вывода, позволяющая выводить протонный пучок интенсивностью  $10^{11}$ – $10^{13}$  протонов/цикл и длительностью его сброса до 1 с. Интенсивность медленно выведенного пучка ограничена снизу величиной  $10^{11}$  протонов/цикл. Поэтому формирование пучков меньшей интенсивности осуществляется методом дифракционного вывода части циркулирующего пучка в ускорителе путем отбора частиц, рассеянных на мишени. Этот метод позволяет иметь выведенные протонные пучки длительностью до 2 с в диапазоне интенсивностей  $10^6$  –  $10^{11}$  протонов/цикл.

Для формирования пучков частиц и доведения их до экспериментальных установок используются каналы транспортировки частиц, которые можно разделить на две группы: каналы вторичных частиц с внутренних мишеней, располагающихся в экспериментальном зале, и каналы с пучками протонов, выведенных из ускорителя, которые транспортируются через зал на установки, находящиеся в галереи. Основным режимом работы ускорителя с каналами является следующий: вначале включается быстрый вывод, затем медленный вывод с длительностью растяжки до 1 с и оставшееся время постоянного магнитного поля (около 0.9 с) – вывод с внутренних мишеней. Возможна также одновременная работа внутренних мишеней с медленным или дифракционным выводом. В каналах вторичных частиц с внутренних мишеней получены пучки адронов и электронов (позитронов) интенсивностью до  $10^7$  частиц/цикл с импульсом частиц до 60 ГэВ/с. Каналы выведенных протонных пучков позволяют иметь на установках интенсивность до  $10^{10}$  частиц/цикл. Высокие интенсивности пучков частиц, поступающих на детекторы экспериментальных установок, дают возможность проводить исследования редких физических процессов, сечение которых может составлять несколько нанобар.

Исходя из приведенных параметров ускорительного комплекса ИФВЭ, можно сформулировать следующие требования к системе сбора данных экспериментальных установок:

- электронная аппаратура систем сбора данных должна быть рассчитана на работу в импульсном режиме, при котором длительность сброса частиц на установку может достигать 2 с при общей длительности цикла ускорителя 9.5 с;
- регистрирующая аппаратура систем сбора данных должна иметь быстродействие не менее 100 МГц;
- электронная аппаратура триггирования систем сбора данных должна иметь высокую эффективность отбора частиц требуемого сорта в зависимости от изучаемой реакции.

## **2.2. Развитие детекторов частиц и физических установок ИФВЭ**

Развитие фундаментальных физических исследований на ускорителях частиц высоких энергий, в том числе и на ускорительном комплексе ИФВЭ, повлекло за собой модернизацию существующих и создание новых детекторов частиц. В первых установках ИФВЭ, направленных на поиск кварков, наблюдение антигелия-3, измерение полных сечений взаимодействия протонов с протонами, использовались такие детекторы, как искровые камеры, сцинтилляционные и черенковские счетчики, сцинтилляционные годоскопы с относительно небольшим количеством каналов регистрации.

В дальнейшем были разработаны и нашли широкое применение пропорциональные, дрейфовые камеры размером до  $2 \cdot 2.5 \text{ м}^2$  и пространственным разрешением от 50 до 300 мкм, микродрейфовые трубки, сцинтилляционные спектрометры, годоскопические электромагнитные калориметры для регистрации электронов и гамма-квантов, измерения их координат и энергии, адронные калориметры для измерения энергии и координат адронов.

Основной задачей при создании и модернизации детекторов частиц являлось получение высокого пространственного, временного и амплитудного разрешения для изучения все более тонких и редких физических процессов. Это требовало, в свою очередь, не только расширения систем сбора данных, но и качественного их развития, а именно, разработки новой электронной аппаратуры с учетом существующей элементной базы, увеличения быстродействия систем сбора данных в целом, внедрение новых стандартов электроники и т.д.

Создание физических установок требует больших финансовых ресурсов и довольно значительного времени, что означает необходимость длительного планирования научной программы исследований и предусмотрения широких возможностей для существенной модернизации экспериментальной базы установки, увеличения числа используемых детекторов, внедрения



детекторов нового типа. Примером этого может служить установка ЛЕПТОН-СФИНКС, которая за 20 лет существования претерпела несколько значительных модернизаций в соответствии с развитием программы физических исследований, что видно из табл. 1. Модернизации установки влекли за собой увеличение числа каналов регистрации, потока снимаемой с детекторов информации, значительные изменения системы сбора данных. А при создании установки СФИНКС-М потребовалась почти полная замена существующей системы сбора данных на новую на базе разработанной системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора полезной информации.

**Таблица 1. Развитие установки ЛЕПТОН-СФИНКС**

Название установки	ЛЕПТОН	ЛЕПТОН-Ф	СФИНКС	СФИНКС-М
Детекторы частиц	Число каналов регистрации			
Сцинтилляционные счетчики (шт.)	25	50	30	30
Сцинтилляционные годоскопы (число каналов)	204	200	304	352
Многоканальные черенковские пороговые счетчики (число каналов)	-	-	64	32
Черенковский счетчик типа RICH (число каналов)	-	-	736	736
Пропорциональные камеры (число каналов)	-	4500	8000	3904
Дрейфовые камеры или трубки (число каналов)	-	-	960	720
Калориметры (число каналов)	-	-	383	1188
Искровые проволочные камеры (число каналов)	43,5 тыс.	-	-	-
<b>Потоки данных</b>				
Число регистрируемых событий (соб./цикл)	20	150	300	4000
Объем события (Кбайт)	2,3	0,6	1,0	1,6
Поток информации (Мбайт/сек)	0,046	0,09	0,3	6,4 (7,5)

Анализ развития физических установок показал, что имеется ряд характерных особенностей, которые должны учитываться при разработке и создании систем сбора данных, а именно:

- возможность изучения и настройки каждой подсистемы детекторов частиц параллельно и независимо от установки в целом;
- существование конечной вероятности регистрации непредвиденных физических событий при постановке запланированного эксперимента;
- наличие жестких физических фонов особенно при изучении редких процессов от сопутствующих физических реакций, вызванных как используемыми, так и примесными частицами пучка;
- возможность регистрации одновременно нескольких физических реакций для повышения эффективности использования ускорителя;

- необходимость калибровки физической и электронной аппаратуры;
- текущий контроль за ходом эксперимента и состоянием системы сбора данных.

### **2.3. Характерные особенности системы преобразования, регистрации и отбора физической информации**

Из анализа параметров ускорительного комплекса ИФВЭ, характеристик детекторов частиц и программы физических исследований на установках видно, что поток первичной информации с установки может достигать  $10^9$  бит/сек. Это означает, что основными задачами системы сбора данных являются эффективное выделение из этого потока требуемой полезной информации и доведение ее объема до величины, приемлемой для приема в ЭВМ.

Исходя из этого, сформулируем требования [1], предъявляемые к системам сбора данных, и возможности, которые необходимо закладывать в эти системы при их разработке. К ним относятся:

- максимальное быстродействие электронной аппаратуры преобразования, регистрации и отбора информации с учетом существующей элементной базы;
- возможность расширения систем сбора данных при условии минимальных временных, людских и финансовых затрат;
- регистрация нескольких физических реакций посредством организации независимых триггерных систем, работающих параллельно;
- организация многоуровневой триггерной системы и относительно простого ее изменения в процессе проведения эксперимента;
- высокая эффективность отбора полезных событий;
- буферизация и разравнивание информации перед выводом ее в ЭВМ;
- сжатие первичной информации, что в первую очередь относится к аналоговой информации, поступающей с калориметров, в которых при регистрации полезного события срабатывает 10-15% каналов из общего количества;
- достижение максимально возможных скоростей передачи данных внутри системы и во внешние устройства;
- простота в эксплуатации и надежность электронной аппаратуры;
- возможность тестирования и калибровки систем сбора данных с управлением от ЭВМ, особенно регистрирующей электроники;
- достижение компактности электронной аппаратуры для уменьшения ее габаритов и стоимости;
- разработка аппаратуры в определённом электрическом стандарте.

Последний пункт требований очень важен, так как позволяет ввести унификацию на размеры, источники питания, уровни логических и

электрических сигналов, команды, поступающие от ЭВМ, выполняемые электронными модулями функции, входные и выходные разъемы, используемые в системе сбора данных.

Электронная аппаратура для первых физических экспериментов в ИФВЭ была разработана в стандарте NIM и состояла из набора модулей для логического отбора и регистрации информации от детекторов частиц.

В начале 80-х годов была разработана и внедрена на экспериментальных установках система СУММА, соответствующая стандарту КАМАК-ВЕКТОР, которая широко применяется в Институте и по настоящее время. В рамках этой системы разработано более 300 типов модулей как для систем сбора данных, так и для систем автоматизации ускорительного комплекса ИФВЭ.

Системы сбора данных, созданные в рамках системы СУММА, перестали удовлетворять в полной мере сформулированным выше требованиям. Особенно это стало ясно к концу 80-х годов, когда начали планироваться новые эксперименты, в которых должны были возрасти как объемы аппаратуры, так и потоки физической информации. Эти эксперименты требовали увеличения скорости передачи информации, расширения возможностей для буферизации и разравнивания данных, сжатия первичной информации, организации многоступенчатых триггерных систем. Поэтому встала задача разработки новой системы, в которой электронная аппаратура в большей степени удовлетворяла бы этим требованиям.

Была сделана попытка разработки и внедрения в ИФВЭ аппаратуры в новом стандарте ФАСТБАС [2], в котором системы сбора данных в значительной степени удовлетворяли бы вышеуказанным требованиям. Но это оказалось невозможным из-за отсутствия технологической и элементной базы. Поэтому была предложена и осуществлена разработка новой системы МИСС (Многоканальная Информационная Скоростная Система), основные положения которой описаны в настоящей диссертации.

Разработка и создание системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора полезной информации осуществлялись как в рамках системы СУММА, так и системы МИСС. Это определялось в зависимости от задач и требований физических экспериментов.

При разработке системы учитывалась необходимость ее совмещения с ранее разработанной и используемой электроникой, а также увеличение числа каналов регистрации на модуль единичной ширины с целью уменьшения объема и стоимости систем сбора данных.

### 3. МНОГОКАНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

#### 3.1. Требования к аналого-цифровой аппаратуре

Одними из основных детекторов экспериментальных установок ИФВЭ являются калориметры различного типа, содержащие до несколько тысяч каналов регистрации, для которых необходима электронная аппаратура аналого-цифрового преобразования. Требования к этой аппаратуре, в первую очередь, определяются такими параметрами детекторов, как:

- энергетическое разрешение;
- динамический диапазон канала регистрации;
- диапазон линейной зависимости величины выходного сигнала от энергии;
- временные параметры выходных импульсов.

Энергетическое разрешение детектора не накладывает жестких требований на динамический диапазон канала регистрации. В большей степени эти требования вытекают из необходимости определения координат в калориметре, и динамический диапазон в этом случае должен быть не менее 300. Дальнейшего расширения динамического диапазона требует топология событий. Для оценки этого был рассмотрен анализ погрешности измерения координат центра электронно-фотонного ливня (ЭФЛ) в зависимости от разрядности АЦП канала регистрации. Из моделирования и расчетов видно, что ошибка, определяемая разрешающей способностью преобразователя при вычислении центра ЭФЛ, не превышает 0.1 мм при 12-разрядном преобразовании.

Линейность ФЭУ, используемых в установках ИФВЭ, достаточна высока, например для ФЭУ-84-3 она составляет около 1% при выходном сигнале 1.3 В. Временные параметры импульса с выхода детектора определяются в основном типом используемого ФЭУ. Типичная величина ширины импульса равна примерно 15-30 нс.

Измеряемым параметром импульсов тока с выхода ФЭУ, как правило, является их заряд, а не амплитуда, так как заряд менее подвержен статистическим флуктуациям в сборе света и числе фотоэлектронов. Вместе с тем для повышения нагрузочной устойчивости необходимо использовать токовый съём сигнала с анода, а интегрирование входного тока производить после отбора импульсов, т.е. на выходе схемы линейного пропускания (линейных ворот).

Отличительной особенностью преобразователей заряд-цифра является, как правило, наличие “пьедестала”, т.е. отсчеты на выходе преобразователя не равны нулю при нулевом входном сигнале. Это обуславливается стремлением к упрощению принципиальной схемы преобразователя в многоканальных системах при сохранении приемлемой нелинейности.

В результате информация, поступающая от калориметра, характеризуется наличием большого количества “ненужных” слов в виде “пьедесталов”, так как только в небольшой части (10-15%) регистрирующих каналов появляется полезная информация. Передача “пьедесталов” непроизводительно занимала бы время сбора информации особенно в многоканальных аналого-цифровых системах.

Исходя из вышеизложенного, сформулируем требования и принципы построения электроники аналого-цифрового преобразования:

- входной сигнал, поступающий на вход АЦП с согласованной линии передачи представляет собой импульс тока длительностью 25-50 нс;
- в АЦП должны быть предусмотрены возможности временной селекции сигналов на входе и быстрого окончания преобразования (быстрого сброса) в случае выработки отрицательного решения триггерной системой;
- интегральная нелинейность преобразователя должна находиться на уровне 0.1-0.5% ;
- время преобразования может достигать 100 мкс, но для обеспечения высокой производительности систем регистрации необходимо в ряде случаев доводить ее до единиц микросекунд;
- предусматривать в системе сбора данных устройства предварительной обработки информации до передачи ее в ЭВМ;
- использовать модульный принцип построения многоканальной аналого-цифровой аппаратуры;
- при построении многоканальных систем аналого-цифрового преобразования добиваться минимизации габаритов, потребляемой мощности и стоимости канала преобразования.

Наряду с зарядочувствительными АЦП широко применяются преобразователи, измеряющие напряжения. Эти модули используются для преобразования сигналов, поступающих с устройств “выборки-хранения”, интеграторов, пропорциональных камер, работающих в режиме накопления, т.е. измеряют медленно изменяющиеся напряжения. Они должны обладать высокой интегральной линейностью (на уровне младшего значащего разряда), динамическим диапазоном 10-12 бит, хорошей временной и температурной стабильностями.

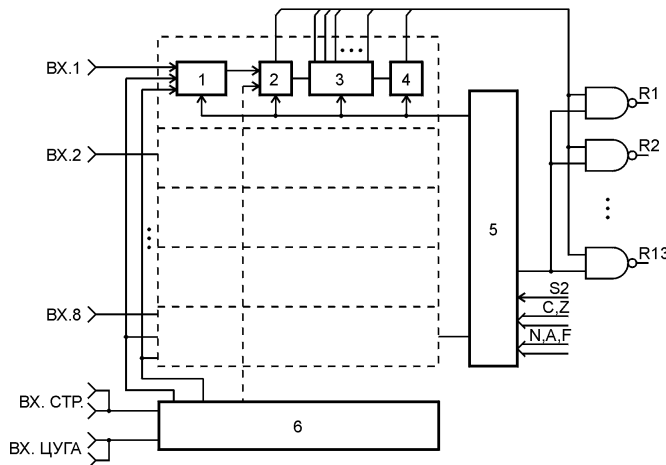
Практически в каждой экспериментальной установке ИФВЭ используются время-пролетные детекторы, дрейфовые, микродрейфовые камеры и трубки, которые требуют временных измерений. При этом в зависимости от типа детектора времена для измерения могут варьироваться в диапазоне от единиц наносекунд до единиц микросекунд. Широко применяются время-цифровые преобразователи так же, как составная часть зарядо-цифровых преобразователей. Требования к время-цифровым преобразователям в

значительной мере зависят от конкретного типа детектора и решаемых физических задач.

С возрастанием требований к аналого-цифровой аппаратуре и развитием элементной базы постоянно велась разработка новых и модернизация существующих модулей аналого-цифрового преобразования. Начиная с 1985 г., был создан ряд аналого-цифровых модулей, которые и будут рассмотрены ниже.

### 3.2. Аналого-цифровые преобразователи первого поколения

Одной из первых разработок аналого-цифрового модуля была разработка 8-канального модуля стробируемого 12-разрядного преобразователя "заряд-цифра" типа П-59 в системе СУММА на дискретных элементах [3], структурная схема которого приведена на **рис. 1**. Модуль включает в себя восемь каналов преобразования "заряд-цифровой код" (схемы 1-4), которые объединены общими цепями стробирования, быстрого сброса, цуга импульсов заполнения, подключенными к схеме формирования соответствующих сигналов 6, и дешифратор функций КАМАК.

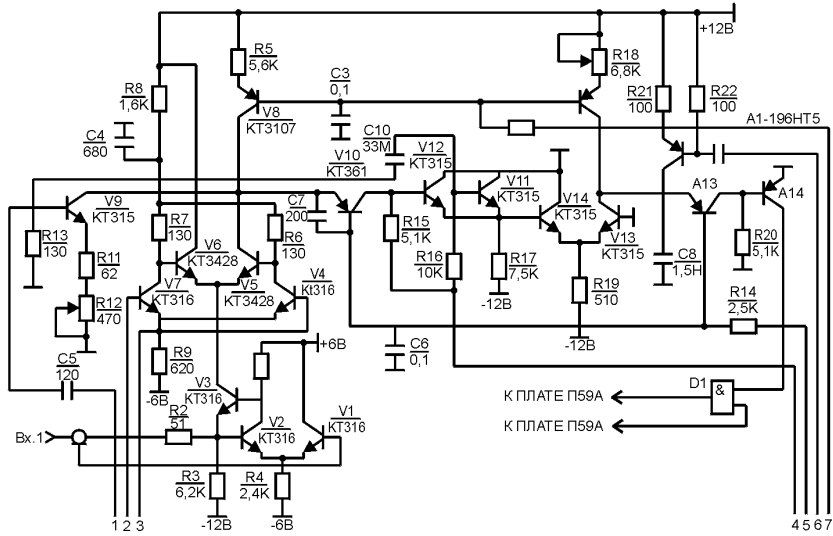


**Рис. 1.** Структурная схема модуля П-59.

Преобразование заряда наносекундного импульса в цифровой код осуществляется в два этапа: преобразование "заряд-время" (схема 1) и преобразование "время-цифровой код". Преобразователем "время-цифровой код" служит фазочувствительный счетчик (схемы 2, 3) и триггер переполнения 4.

Принципиальная схема одного канала преобразования "заряд-цифра" изображена на **рис. 2**. Функционально канал преобразования представляет собой две каскадно-соединенные схемы преобразования заряда во времен-

ной интервал. Первый преобразователь трансформирует заряд входного импульса во временной интервал, используя для этого конденсатор  $C7$ . Выходным сигналом устройства является импульсный сигнал, длительность которого линейно зависит от заряда входного импульса.



**Рис. 2. Принципиальная схема канала преобразования “заряд-цифра”.**

В точки 2 и 3 схемы преобразователя подаются строб-импульсы в уровнях ЭСЛ положительной и отрицательной полярностей, управляющие схемой временной селекции. В точку 1 схемы подается строб-импульс положительной полярности, а в точку 6 – импульс быстрой очистки отрицательной полярности в уровнях ТТЛ. В точки 4, 5 и 7 подаются напряжения, необходимые для обеспечения рабочих режимов преобразователя.

Устройством временной селекции (линейные ворота) служит схема последовательно-параллельного ключа, выполненная на транзисторах  $V5$  и  $V6$ . На транзисторах  $V7$  и  $V4$  построена схема управления устройством временной селекции. Транзисторы  $V1$ ,  $V2$  и  $V3$  входят в состав генератора тока, управляемого входным сигналом и представляющего собой дифференциальный усилитель, который охвачен 100%-й отрицательной обратной связью. Это позволяет уменьшить ток, протекающий в транзисторе  $V3$  и далее по транзистору  $V6$  или  $V5$  линейных ворот при отсутствии сигнала, и тем самым уменьшить “пьедалстал” преобразователя.

На транзисторе  $V10$  построен компаратор тока, с выхода которого снимается импульс переменной длительности, поступающий на схему

преобразователя-растяжителя "время-время", коэффициент которого определяется по формуле:  $K = \frac{I_{R19}}{I_{R18}}$ , где  $I_{R19}$  – ток, протекающий в

резисторе R;  $I_{R18}$  – ток, протекающий в резисторе R18.

Применение двухкаскадной схемы растяжения позволяет уменьшить число необходимых активных элементов при снижении требований к параметрам примененных транзисторов. Основные параметры модуля П-59 приведены в табл. 4 (стр. 26).

Для измерения изменяющихся напряжений разработан модуль 16-канального аналого-цифрового преобразования типа П-91 в системе СУММА [4], структурная схема которого приведена на рис. 3. В модуле содержится один АЦП, который преобразует напряжения, поступающие со схем выборки-запоминания через аналоговый коммутатор. Преобразованная информация хранится во внутренней схеме цифровой памяти и может быть прочитана.

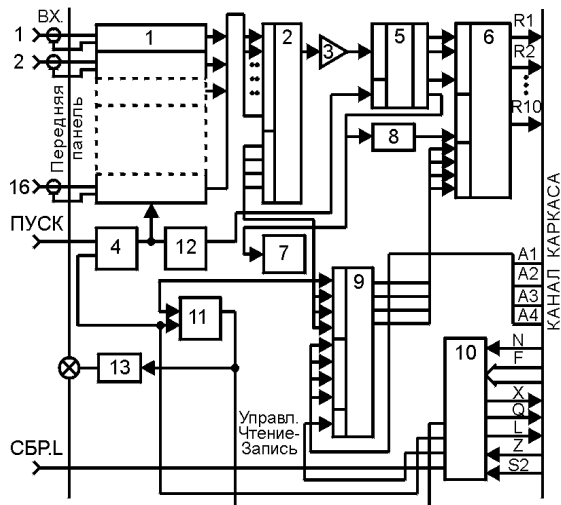


Рис. 3. Структурная схема модуля П-91.

Работа модуля осуществляется следующим образом. В исходном режиме триггер пуска 4 и триггер ЛАМ 11, а также 4-разрядный счетчик адреса 7 находятся в нулевом состоянии. Схемы выборки-запоминания отслеживают входные сигналы, поступающие на разъемы передней панели ВХОД 1,2,...16. С приходом импульса на разъем передней панели ПУСК в модуле запоминаются текущие значения входных напряжений на схемах выборки-запоминания 1. Далее эти напряжения поступают на вход АЦП 5, рабо-



тающего по принципу поразрядного уравнивания, через аналоговый коммутатор 2 и операционный усилитель 3. Управляющий сигнал для схем вырабатывается триггером пуска 4. Этот же сигнал включает генератор тактирующих импульсов 12, которые необходимы для работы АЦП.

Регистр последовательного приближения, входящий в состав АЦП, генерирует в числе прочих сигнал о конце преобразования. Этот сигнал используется для формирования строб-импульса записи схемой 8 в цифровую память 6 информации с АЦП, а также для наращивания адреса в 4-разрядном счетчике адреса 7. Счетчик адреса управляет переключением каналов аналогового коммутатора и адресами цифровой памяти 6. Применяемые в модуле интегральные схемы памяти имеют единые адресные шины и для записи и для чтения, поэтому необходим мультиплексор адресных шин. Его функции выполняет схема выбора адреса канала 9. В режиме записи адрес ячейки в памяти задается счетчиком адреса, в режиме чтения – по шинам канала каркаса.

Сигнал переполнения адресного счетчика, возникающий в конце цикла преобразования, устанавливает триггер LAM 11 в единичное состояние. Сигнал L поступает в канал каркаса, а также подсвечивает светодиод на передней панели. Начиная с этого момента, можно читать из модуля преобразованную информацию. По окончании чтения необходимо специальной командой канала каркаса или импульсом по передней панели СБР L снять сигнал L и установить триггер пуска в нулевое состояние для следующего запуска преобразования. Основные характеристики модуля П-91 приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Параметры преобразователя “напряжение-цифра” типа П-91.**

<u>Параметр</u>	<u>Значение</u>
Число каналов	16
Тип входа	однофазный или дифференциальный
Диапазон входных сигналов, В	
- однополярные	0 - +5
- двуполярные	-2,5 - +2,5
Входное сопротивление, Ком	10
Разрешение, бит	10
Интегральная нелинейность, младший значащий разряд (МЗР)	0,5
Дифференциальная нелинейность, МЗР	0,5
Влияние канала на канал, МЗР	0,5
Температурный коэффициент, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	200
Апертурное время, мкс	0,5
Время преобразования, мкс	800
Уровни сигналов управления	ТТЛ

### 3.3. Интегральная схема КР1101ПД1 преобразования “заряд-время”

Необходимость преобразования аналоговой информации в цифровую форму с тысяч каналов детекторов поставила при разработке соответствующей аппаратуры такие вопросы, как надежность этой аппаратуры, повторяемость характеристик, объем аппаратуры, ее стоимость и т.д. Наиболее эффективным способом решения этих вопросов является переход на технологию интегральных схем, что дает ряд заметных преимуществ разрабатываемой аппаратуре, а именно: улучшение основных качественных характеристик, уменьшение габаритных размеров канала регистрации, снижение стоимости, уменьшение трудоемкости при производстве и настройке.

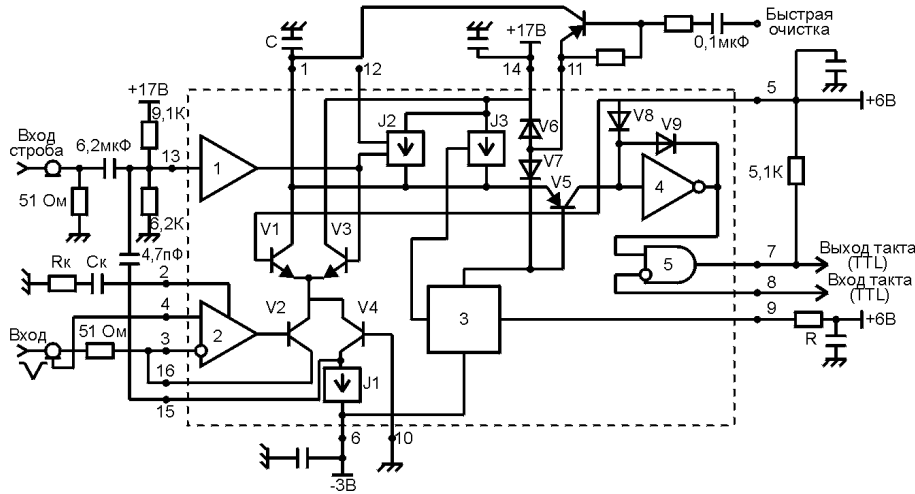
В этом разделе описывается впервые разработанная в нашей стране под руководством автора специализированная интегральная схема для создания аналого-цифровых преобразователей – стробируемый преобразователь заряда импульса во временной интервал типа КР1101ПД1 [5]. Разработка проводилась совместно с ПО “РОДОН” (г. Ивано-Франковск), которое и выпускало эту схему серийно. Было изготовлено более 150 тысяч таких схем.

Интегральная схема (ИС) представляет собой преобразователь заряда короткого импульса во временной интервал с интегрированием входного тока и предназначена для построения зарядочувствительных время-импульсных АЦП. Ширина выходного импульса пропорциональна собранному на входе заряду за время строба с точностью 0,1%. Эта точность обеспечивается при скорости нарастания входного сигнала 2 м А/нс. Основные параметры преобразователя приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры интегральной схемы КР1101ПД1.

<u>Параметр</u>	<u>Значение</u>
Входное сопротивление, Ом	0,1
Максимально допустимый входной ток, мА	50
Максимальный измеряемый заряд, пКл	300-1000
Температурная зависимость коэффициента преобразования, 1/°С	$0,2 \times 10^{-3}$
Температурная зависимость пьедестала, пКл/°С	0,2
Длительность выходного импульса при максимальном входном сигнале, мкс	50-1000
Кратковременная нестабильность длительности выходного импульса, % от полной шкалы	0,025
Интегральная нелинейность зависимости длительности выходного импульса от входного заряда, %	0,1
Уровни строб-импульса, В	
- логический ноль	7,4 - 8,0
- логическая единица	3,9 - 4,5
Длительность строб-импульса, нс	50 - 2000
Потребляемая мощность	+17В x 1мА +6В x 10мА -3В x 20мА
Диапазон температур окружающей среды, °С	10 - 55

Функциональная схема преобразователя и внешние элементы, необходимые для обеспечения работы ИС, приведены на **рис. 4**. Входной ток поступает на схему через повторитель тока, образованный операционным усилителем 2 и транзистором V2. Вывод 2 ИС используется для коррекции частотной характеристики операционного усилителя 2. С приходом низкого логического уровня на вход схемы формирования строб-импульса транзистор V3 закрывается, а транзистор V1 отпирается. При этом начинается интегрирование входного тока на емкости C. Транзистор V5 компаратора тока при этом запирается, а генератор тока I2 включается. На выходе компаратора тока формируется положительный перепад напряжения. Таким образом, к зарядной емкости в момент интегрирования входного тока подключены коллектор транзистора линейных ворот V1, генератор тока I2 и генератор тока I3. Через транзистор V1 протекает сумма трех токов, а именно: ток сигнала с выхода повторителя тока, ток генератора I1 и ток с вывода 15 ИС. Ток генератора I1 и ток с вывода 15 ИС служат для улучшения линейности преобразователя.



**Рис. 4.** Функциональная схема ИС КР110ПД1.

Линейность характеристики передачи тока транзистором V1 недостаточна, так как ток коллектора V1 меняется от нуля, где  $\beta$  транзистора мал. Для линеаризации характеристики V1 через него пропускается начальный ток от генератора I1 такой величины, при которой  $\beta$  слабо зависит от величины коллекторного тока. Импульс тока с вывода 15 ИС, получаемый дифференцированием переднего фронта строб-импульса, обеспечивает в зарядной емкости некий пороговый заряд, необходимый для уверенного

запираания транзистора V5. При отсутствии этого пьедестального заряда характеристика преобразователя  $T_{вых}$  на начальном участке имеет значительную нелинейность.

Постоянный ток  $I_1$ , проходя через зарядную емкость, будет обеспечивать накопление довольно большого заряда и уменьшать динамический диапазон измерения. Кроме того, этот балластный заряд будет линейно возрастать при увеличении длительности строб-импульса. Для устранения этих нежелательных явлений в схему введен генератор тока I2. Этот генератор включается только в момент строб-импульса, и своим током, направленным в противоположном направлении току  $I_1$ , компенсирует балластный заряд в зарядной емкости. Величина компенсирующего тока может быть отрегулирована изменением постоянного напряжения, подключаемого к выводу 12 ИС.

По окончании строб-импульса транзистор V1 запирается, и генератор тока I2 выключается. Транзистор V5 остается закрытым на время рассасывания накопленного заряда на емкости С током генератора I3. При отпирании транзистора V5 ток генератора I3 начинает поступать на вход компаратора тока и формирует на его выходе отрицательный перепад напряжения. К выходу компаратора тока подключен вход логического вентиля 5. Другой его вход выведен на вывод 8. При подаче на вывод 8 последовательности импульсов на выходе вентиля формируется цуг из определенного числа импульсов, пропорционального входному заряду.

У ИС предусмотрено также наличие вывода 11, напряжение на котором равно напряжению на зарядной емкости в отсутствие строб-импульса. Этот вывод позволяет организовать быстрый сброс заряда с емкости С посредством внешнего транзистора. Стабильность характеристик преобразователя при изменении разрядного тока и температуры достигается использованием специальной схемы стабилизации 3, построенной на системе дополнительных генераторов тока. Разрядный ток емкости С задается величиной резистора, подключаемого к выводу 9.

Интегральная схема КР1101ПД1 выполнена на основе биполярной эпитаксиально-планарной технологии с использованием матричной ИС, содержащей 500 элементов. Кристалл матричной ИС содержит n-p-n и p-n-p транзисторы различной конфигурации, набор резисторов с номиналами в диапазоне от 10 Ом до 50 кОм, набор диффузионных перемычек и т.д. Кристалл ИС имеет размер 2.9•2.35 мм и помещен в 16-выводной пластмассовый корпус с двухрядным расположением выводов. ИС КР1101ПД1 позволяет существенно сократить затраты и трудоемкость при проектировании и изготовлении аппаратуры, а также повысить эксплуатационные характеристики. На основе этой схемы был разработан ряд новых аналого-цифровых модулей, описания которых приводятся в следующем параграфе.

### 3.4. Аналого-цифровые преобразователи с применением интегральной схемы КР1101ПД1

Модуль П-267 представляет собой 16-канальный стробируемый 12-разрядный зарядочувствительный АЦП в системе СУММА[6]. Он выполняет функции, аналогичные тем что и описанный выше модуль П-59, но имеет более высокие эксплуатационные характеристики. Функционально модуль состоит из двух частей:

- 16-канальный преобразователь "заряд-время" со схемами выработки сигналов строга и быстрого сброса на основе ИС КР1101ПД1 (аналоговая часть);
- 16-канальный преобразователь "время-цифра" со схемами формирования импульсов заполнения и схемой дешифратора команд КАМАК (цифровая часть).

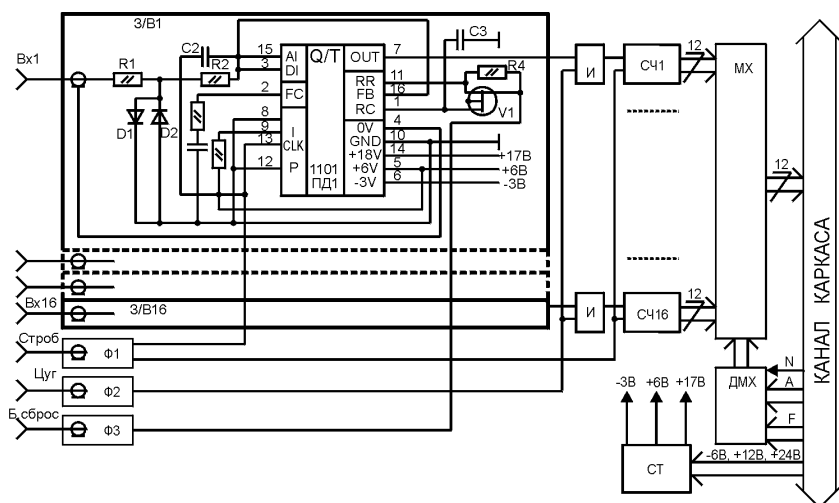


Рис. 5. Структурная схема модуля П-267.

Структурная схема модуля, изображенная на рис. 5, включает в себя 16 идентичных каналов преобразования "заряд-время" 3/В1-3/В16, шестнадцать 12-разрядных счетчиков СЧ1-СЧ16, формирователи сигналов строга Ф1, импульсов частоты Ф2, а также схемы мультиплексирования данных МХ, дешифратора ДМХ команд КАМАК и стабилизаторов питающих напряжений СТ. Входное сопротивление сигнальных входов Вх.1..Вх.16, образованных объединенными выводами 3 и 16 ИС КР1101ПД1, определяется сопротивлениями R1 и R2 и равно примерно 50 Ом. Диоды Д1 и Д2 предназначены для защиты ИС от слишком больших входных сигналов,

поступающих по линии передачи от ФЭУ ко входу АЦП в аварийных ситуациях. Конденсатор  $C2=4.7$  пФ обеспечивает необходимый уровень “пьедестала”. Резистор R4 задает величину разрядного тока в зарядный конденсатор C3. Через транзистор V1 осуществляются быстрый разряд зарядного конденсатора C3 и установка исходного напряжения на выводе 1 ИС. С вывода 7 снимается выходной сигнал – временной интервал, длительность которого пропорциональна заряду, поступившему на вход схемы. Эти 16 выходных импульсов поступают на входы 16 преобразователей “время-цифра” (схема И и счетчик СЧ). Сброс счетчиков происходит одновременно с приходом импульса строба в модуль.

Основные параметры модуля П-267 приведены в табл. 4 (стр. 26). Кроме того, разработан модуль П-267К, представляющий собой модификацию модуля П-267 в стандарте КАМАК.

Дальнейшее развитие модуля П-267 состояло в разработке модуля П-337, в котором увеличено количество разрядов счетчиков до 14 при уменьшении энергопотребления за счет частичного применения интегральных схем КМОП серий [7]. В нем также предусмотрена возможность использования встроенного кварцевого генератора для преобразования время-цифра, что позволяет обойтись без дополнительных генератора и разветвителей в малоканальных системах регистрации. Максимальный измеряемый заряд равен  $1000 \cdot 10^{-12}$  Кл. При длительности строб-импульса равной 80 нс шумовой заряд, приведенный ко входу, составляет  $60 \cdot 10^{-15}$  Кл (RMS). Основные параметры модуля П-337 приведены в табл. 4 (стр. 26).

В связи с внедрением скоростной системы МИСС в физические установки, принцип которой будет описан в п.4.3, была проведена разработка модулей аналого-цифрового преобразования в рамках этой системы, а именно 10-разрядного АЦП типа ЛЭ-31 [6] и двух 16-канальных зарядочувствительных АЦП типа ЛЭ-61 [7] и ЛЭ-61М [8] для калориметров.

Модуль ЛЭ-31, структурная схема которого изображена на рис. 6, по принципу работы аналогичен описанному ранее модулю П-91, т.е. в нем используется коммутация нескольких аналоговых сигналов на один АЦП, работающий по методу последовательного приближения. Для уменьшения времени преобразования 16 каналов регистрации, содержащиеся в модуле, скомпонованы в две группы по восемь. Каждая группа обслуживается восьмиканальным мультиплексором, АЦП и памятью.

Модуль содержит 16 идентичных каналов З-Н, преобразующих заряд входного импульса в напряжение. Полученные напряжения поступают на входы двух восьмиканальных аналоговых мультиплексоров АМХ. Выбранный мультиплексором сигнал поступает на вход повторителя напряжения П и далее на АЦП. Преобразованная информация с выхода АЦП записывается в память ПАМ. Выходной регистр  $R_{вых}$  предназначен для вывода информации в магистраль МИСС. Кроме названных узлов модуль содержит схемы формирования импульсов строба  $\Phi_c$  и быстрого сброса

Фбс, схему управления преобразованием СУпреоб, триггер наличия данных в модуле Т, счетчики номера канала при записи СЧзап и чтении СЧчт, мультиплексор адресных шин МХадр, а также схему СУ, реализующую протокол обмена системы МИСС.

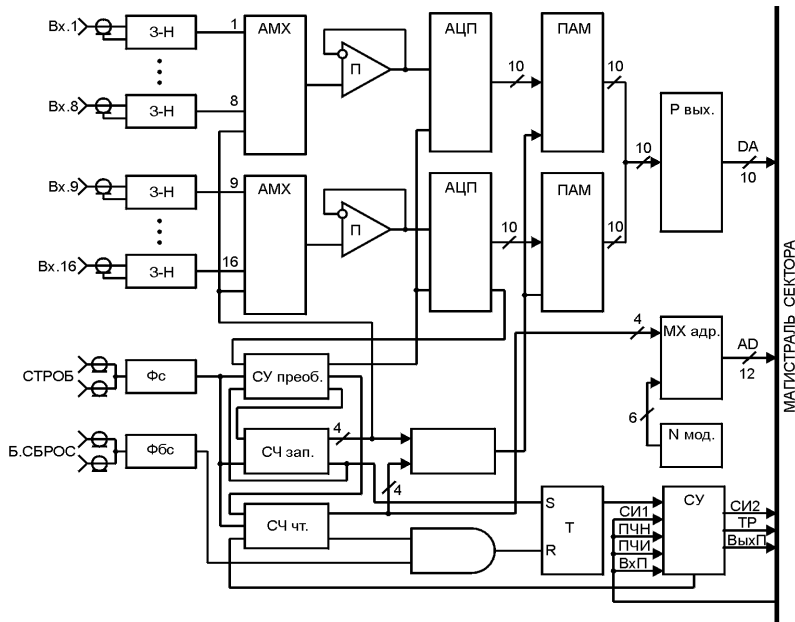


Рис. 6. Структурная схема модуля ЛЭ-31.

Модуль работает следующим образом. Во время импульса строба, проходящего на коаксиальный разъем передней панели, схемой 3-Н производятся интегрирование входных сигналов и их запоминание на емкостях. Спустя некоторое время, необходимое для установления выходных напряжений, схема управления преобразованием СУпреоб запускает АЦП. По импульсу конца преобразования, вырабатываемого схемой СУпреоб, происходят запись преобразованной информации в память ПАМ, наращивание на единицу счетчика СЧзап и подключение следующего канала к аналоговому мультиплексору АМХ. Далее схема СУпреоб инициирует следующее преобразование. По окончании восьмого цикла преобразования в схеме вырабатывается импульс сброса, обнуляющий счетчик Счзап. Одновременно устанавливается в единичное состояние триггер Т. Чтение информации из модуля осуществляется с помощью специальной схемы интерфейса СУ модуля ЛЭ-31 в соответствии с протоколом МИСС. Вместе с данными в магистраль МИСС передаются адреса модулей и регистров в них.

Схема узла преобразования заряда входного импульса в напряжение является, по существу, схемой выборки-хранения, в которой ИС КР1101ПД1 выполняет функцию выборки заряда и преобразования его в напряжение. Напряжение снимается непосредственно с зарядной емкости. При этом необходимо установить ток разряда этой емкости минимальным, с тем чтобы изменение напряжения на ней во время преобразования не превышало величины, соответствующей одному младшему значащему разряду.

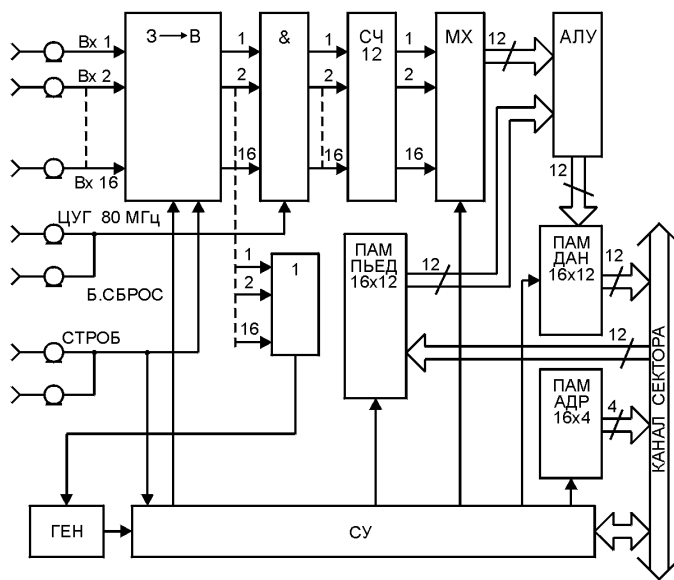
Повторитель напряжения с большим входным сопротивлением собран на ИС типа К544УД2. Вход его подключен непосредственно к зарядной емкости. В качестве аналого-цифрового преобразователя выбрана ИС АЦП К1108ПВ1, которая представляет собой 10-разрядный, прецизионный, быстродействующий, функционально законченный аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения с временем преобразования не более 1мкс. Она включает в себя источник опорного напряжения, тактовый генератор, выходной регистр на три состояния с хранением информации преобразования в течение последующего цикла преобразования. В качестве аналогового мультиплексора используется ИС КР590КН6. Основные характеристики модуля ЛЭ-31 приведены в табл. 4 (стр. 26).

Модули 16-канального 12-разрядного зарядочувствительного АЦП типа ЛЭ-61 и ЛЭ-61М в системе МИСС отличаются от ранее описанных наличием арифметического устройства для вычитания "пьедесталов" преобразования внутри модуля. Вследствие этого экономится время на передачу лишней информации в магистрали каркаса между АЦП и контроллером. Кроме того, в них реализуется минимально достижимое время преобразования, ограниченное техническими данными ИС КР1101ПД1.

Структурная схема модуля ЛЭ-61М, показанная на **рис. 7**, содержит следующие функциональные узлы:

- 16 независимых ячеек стролируемых преобразователей "заряд-время" З-В;
- преобразователь "время-цифра", состоящий из логических элементов (&) и узла из 12-разрядных счетчиков СЧ12, выходы которых коммутируются мультиплексором МХ;
- логический сумматор сигналов с преобразователей "время-цифра" 1;
- память "пьедесталов" ПАМ<sub>пед</sub>;
- арифметико-логическое устройство АЛУ для вычитания "пьедесталов";
- память данных на одно событие ПАМ<sub>дан</sub>;
- память адресов каналов, содержащих значащую информацию ПАМ<sub>адр</sub>;
- схему управления и синхронизации работы узлов модуля СУ;
- интерфейсную схему для связи с магистралью МИСС.





*Рис. 7. Структурная схема модуля ЛЭ-61М.*

Выходные сигналы с детектора в виде импульсов тока, содержащих заряд величиной до 1000 пКл, поступают на входы Вх1-Вх16 преобразователей "заряд-время", построенных на основе ИС КР1101ПД1. Работа преобразователей стробируется сигналом СТРОБ, поступающим в уровнях НИМ. Выходные сигналы преобразователей в виде "полочек" (импульсов уровня ТТЛ, длительность которых пропорциональна величине входных измеряемых зарядов) поступают на группу логических элементов, где осуществляется заполнение "полочек" импульсами определенной частоты от внешнего генератора, поступающими на вход ЦУГ на передней панели модуля. Максимальная частота заполнения "полочек" импульсами равна 80 МГц. Одновременно сигналы с выходов 3-В подаются на сумматор 1, который выдает на схему управления сигнал начала цикла обработки, совпадающий с окончанием самой длинной из 16 каналов 3-В "полочки". Группы импульсов, соответствующие длительностям "полочек", оцифровываются 12-разрядными счетчиками СЧ12, выходные коды которых устанавливаются до начала цикла обработки. Работа преобразователя 3-В может быть прервана сигналом Б.СБРОС, поступающим в схему управления по каналу МИСС.

По сигналу начала цикла обработки с сумматора 1 запускается внутренний генератор ГЕН, вырабатывающий 16 импульсов уровня ТТЛ с периодом следования 500 нс для последовательной подачи выходных кодов

счетчиков на АЛУ. Генератор ГЕН также обеспечивает работу схемы СУ, которая служит для синхронизации циклов работы устройства вычитания “пьедесталов”, записи информации в выходную память и чтения ее по каналу сектора МИСС.

С началом цикла обработки коды с выходов счетчиков СЧ12 с помощью мультиплексора МХ в соответствии с очередностью каналов последовательно поступают на арифметико-логическое устройство АЛУ, где происходит вычитание кодов “пьедесталов”, одновременно поступающих на АЛУ из памяти “пьедесталов” ПАМ<sub>пед</sub>. Значения “пьедесталов” заносятся в эту память при подготовке модуля к работе. В результате работы АЛУ в выходной буфер памяти данных ПАМ<sub>дан</sub> заносятся данные только тех каналов, в которых величина заряда превышает значение “пьедестала”. Одновременно в выходной буфер памяти адресов ПАМ<sub>адр</sub> заносится 4-битный адрес этих каналов.

По окончании серии из 16 импульсов, поступивших с генератора ГЕН, в счетчике схемы СУ хранится информация о количестве сработавших каналов и соответствующее количество слов будет передано модулем при чтении. Если во всех каналах модуля сигнал не превышает пьедестала, то счетчик в схеме СУ не сработает, и сигнал на шине ТР магистрали МИСС схемой управления установлен не будет. При чтении такой модуль будет пропущен. Таким образом, в модуле организован наиболее эффективный способ сбора данных, предусматривающий хранение и чтение информации только о сработавших ячейках детектора.

Чтение информации из модуля происходит в соответствии с протоколом МИСС, обеспечивающим скоростное считывание рассеянных данных. За один цикл чтения в канал сектора передаются данные о величине оцифрованного входного заряда (12 разрядов), адресе соответствующего канала в модуле (4 разряда) и индивидуальном номере модуля (5 разрядов). Индивидуальный номер устанавливается с помощью микропереключателей, расположенных на печатной плате модуля. Основные параметры модулей ЛЭ-61 и ЛЭ-61М приведены в табл. 4.

### **3.5. 16-канальный модуль высокоточных время-цифровых преобразователей**

В экспериментальных установках ИФВЭ используются координатные детекторы с прецизионным пространственным разрешением, такие как многопроволочные дрейфовые трубки и микростриповые камеры, требующие точных временных измерений. В связи с этим, заметно возросли требования к время-цифровым преобразователям (ВЦП), основными из которых являются требования уменьшения шага квантования до величин  $< 1$  нс и интегральной нелинейности 0.5%. Для отдельных применений желателен также достаточно большой диапазон измеряемых интервалов (до 2 мкс).

**Таблица 4. Параметры зарядо-цифровых преобразователей.**

Параметр	П-59	П-267 П-267К	П-337	ЛЭ31	ЛЭ61 ЛЭ61М
Число каналов	8	16	16	16	16
Максимальный измеряемый заряд (пКл)	1000	1000	1000	1000	1000
Шумовой заряд (RMS), приведенный ко входу при длительности $T_{\text{строба}}=80\text{нс}$ (фКл)	150	35	35	35	35
Максимальный входной ток (мА)	50	50	50	50	50
Максимальная скорость нарастания входного тока (мА/нс)	2	2	2	2	2
Входное сопротивление канала преобразования (Ом)	50	50	50	50	50
Диапазон изменения длительности сигнала "Строб" (нс)	40-200	40-2000	40-2000	40-2000	40-2000
Минимальная длительность сигнала "Быстрый сброс" (нс)	нет	800	800	800	800
Уровни сигналов управления	NIM	NIM	NIM	NIM	NIM
Динамический диапазон (бит)	12	12	14	10	12
Время преобразования (мкс)	200	100	400	12	60
Интегральная нелинейность (% от полной шкалы)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Цифровая магистраль	СУММА	СУММА, КАМАК	СУММА	МИСС	МИСС
Год разработки	1986	1988 1993	1994	1988	1994 1998

Для прецизионных координатных детекторов был разработан 16-канальный модуль высокоточных ВЦП типа П-267Т на основе ИС КР1101ПД1 [9], структурная схема которого приведена на **рис. 8**. Функционально модуль состоит из 16 одинаковых каналов время-цифрового преобразования, мультиплексора данных, кварцевого генератора, логики управления и интерфейса с магистралью СУММА. В модуле предусмотрена мода работы для регистрации двух сигналов по каждому из входов. Однако в этой моде количество каналов регистрации уменьшается до восьми, и сигналы должны подаваться на нечетные входы. Переключение модуля для работы в этой моде осуществляется переключателем, расположенным на плате.

Каждый канал состоит из приемника парафазных сигналов, быстродействующей логической схемы БЛ на основе триггера для выделения временного интервала между передними фронтами сигналов СТРОБ и входного сигнала, преобразователя "время-время" ПрТ-Т и 12-разрядного счетчика импульсов Сч. Для работы в моде регистрации двух сигналов по каждому из входов, соседние каналы попарно объединяются через триггер Т, включенный в счетном режиме.

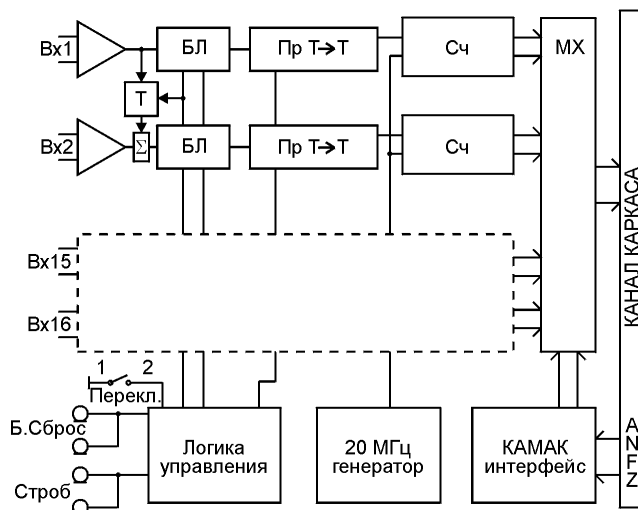


Рис. 8. Структурная схема модуля П-267Т.

По приходу переднего фронта сигнала СТРОБ формируется короткий сигнал СТАРТ, который подается на вход схемы БЛ. Триггеры устанавливаются в состояние "1", и начинается формирование исходного измеряемого временного интервала. Входные сигналы возвращают их в состояние "0". Таким образом, на выходе триггеров формируется исходный временной интервал. Минимальное значение этого интервала определяется длительностью сигнала СТАРТ и равняется 40 нс (пьедестальное значение). В случае отсутствия входных сигналов измеряемый интервал равен длительности сигнала СТРОБ.

Сигналы с триггеров, преобразованные в уровни ТТЛ, подаются на входы СТРОБ схем ПрТ-Т, выполненных на ИС КР1101ПД1. Она включена таким образом, что ее зарядовый вход постоянно подключен к стабилизированному источнику тока. На выходе микросхемы при этом вырабатывается импульсный сигнал, длительность которого пропорциональна длительности входного сигнала. Коэффициент преобразования "время-время" равен 100.

На схеме совпадения, которая входит в состав схемы Сч, из сигналов преобразователя и кварцевого генератора с тактовой частотой 20 МГц выделяется серия импульсов, которая подается на 12-разрядные пересчетные схемы. При регистрации двух сигналов по каждому каналу эти сигналы подаются на нечетные входы. Установка счетчиков в исходное состояние происходит по переднему фронту сигнала СТРОБ, длительность которого может составлять от 50 нс до 2 мкс. Для быстрого обнуления аналоговых

цепей преобразователей с передней панели модуля может быть подан сигнал сброса Б.СБРОС, длительность которого должна быть не менее 2 мкс.

Приведем основные параметры ВЦП типа П-267Т. Временное разрешение модуля составляет 0.5 нс/отсчет, диапазон измерения – 1 мкс, время преобразования равно 100 мкс при измеряемом интервале 1 мкс, длительность входных сигналов должна составлять не менее 10 нс. Интегральная нелинейность преобразователя составляет 0.15%, а дифференциальная нелинейность не превышает 15%.

Разработанные на основе ИС КР1101ПД1 аналого-цифровые преобразователи "заряд-цифра" и "время-цифра" широко применяются в физических установках ИФВЭ, а именно ФОДС-2, ПРОЗА, ВЕС, СФИНКС-М, РАМПЕКС и ИСТРА-М для съема информации с калориметров и координатных детекторов. В общей сложности было изготовлено и эксплуатируется по настоящее время 450 модулей аналого-цифрового преобразования с общим количеством каналов регистрации более 7000.

#### **4. ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ, ОТБОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

##### **4.1. Модуль 32-канального стробируемого регистра с мажоритарной логикой**

При проведении экспериментов на 70-ГэВ ускорителе ИФВЭ одной из самых сложных задач является выделение изучаемых физических взаимодействий на уровне большого фона. В частности, для ее решения используются сцинтилляционные годоскопы, на основе информации с которых строятся триггерные системы с отбором полезных событий по определенным критериям, например, множественности продуктов взаимодействия. Для создания таких систем был разработан модуль 32-канальных стробируемых регистров с мажоритарной логикой типа ЛЭ-39 [10]. Этот модуль регистрирует сигналы от сцинтилляционных детекторов и малых пропорциональных камер, передает полученную информацию в магистраль сектора МИСС и вычисляет количество сработавших каналов (множественность). Структурная схема модуля приведена на **рис. 9** и состоит из схем регистрации, суммирования и управления.

Схема регистрации (**рис. 10**) включает в себя входные приемники парафазных сигналов в уровнях ЭСЛ и триггера, запоминающие импульсные сигналы при стробировании. Строб-импульсы, минимальная длительность которых составляет 10 нс, могут подаваться на разъем "Строб" на передней панели в уровнях NIM или по шинам УР1 и УР2 магистрали каркаса парафазным сигналом в уровнях ЭСЛ, но при этом минимальная длительность сигнала "Строб" достигает 50 нс.

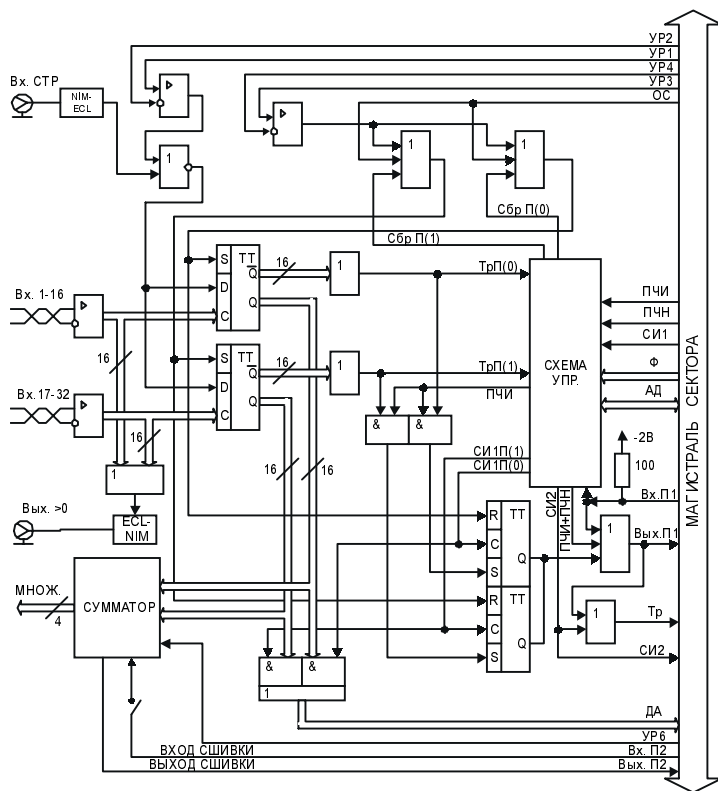


Рис. 9. Структурная схема модуля ЛЭ-39.

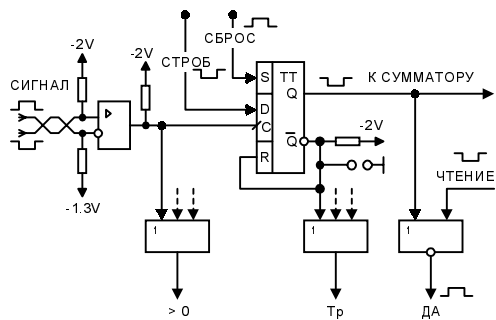


Рис. 10. Принципиальная схема регистрации входных сигналов.

Парафазные сигналы с модулей усилителей-формирователей подаются на входы приемников К500ЛП115, и с их выходов — на С-входы D-триггеров К500ТМ131. Запоминание входного сигнала происходит по его положительному фронту при наличии на D-входе строб-импульса в виде низкого уровня ЭСЛ, т.е. в триггер записывается "0", если фронт приходит во время действия строб-импульса. При этом с выхода  $\bar{Q}$  на вход R поступает высокий уровень, который блокирует триггер в этом состоянии. Очевидно, что при таком способе записи время разрешения определяется только длительностью строб-импульса.

Импульсные сигналы с выходов приемников всех 32 каналов собираются по ИЛИ и выводятся на разъем ">0" в уровнях NIM. Выходы  $\bar{Q}$  триггеров объединяются по ИЛИ с 1-го по 16-й и с 17-го по 32-й и формируют внутренние сигналы требования на чтение ТрП(0) и ТрП(1) по двум подадресам. Кроме того, эти выходы соединяются со схемой суммирования и через ворота чтения выводятся на шины данных сектора. На печатной плате модуля имеются контакты для подпайки плоского кабеля к выходам всех триггеров, что при необходимости дает возможность включить модуль в систему отбора событий по топологическим признакам. Регистр приводится в исходное состояние сигналом сброса, действующим на S-входы триггеров. Сигнал сброса вырабатывается по окончании выполнения команды чтения данных со сбросом в соответствующем подадресе модуля, при выполнении команды "Общий сброс", а также при приеме по шинам УР3 и УР4 магистрали сектора парафазного сигнала "Сброс регистров".

Схема суммирования числа сработавших каналов выполнена на микросхемах ППЗУ и АЛУ и работает по одной из двух записанных в ППЗУ программ, выбор которой осуществляется потенциалом на шине УР6, а именно:

- простое суммирование всех сработавших каналов;
  - вычисление функции  $(n+1)/2$ , где  $n$  – количество сработавших каналов
- отдельно для каждого кластера, и суммирование полученных результатов.

Во втором случае необходима сшивка информации в соседних каналах рядом стоящих модулей. Для сшивки информации в системах с числом каналов больше 32 модуль имеет вход и выход переноса для учета состояния последнего триггера в соседнем справа модуле. 4-разрядный код суммы (множественности) выведен на разъем "Множ" на передней панели.

Схема суммирования имеет четыре ступени, первая из которых – кодировщик, выполненный на 6 микросхемах ППЗУ типа К500РТ416. Группы из шести выходов триггеров соединены с адресными входами соответствующей ППЗУ. Адресный вход А2 используется для сшивки с соседней группой. В первой ППЗУ этот вход используется для сшивки с последней группой соседнего справа модуля. Эта связь может быть разорвана переключателем S1. Адресный вход А1 используется для выбора одной из двух программ

кодировки, записанных в ППЗУ. Полученные 4-разрядные коды суммируются на АЛУ К500ИП181.

Таким образом, первая ступень преобразует 32-разрядный унитарный код в шесть 4-разрядных двоичных чисел по заданному в ППЗУ алгоритму. Последующие три ступени на К500ИП181 суммируют эти числа. Полученный код подается на 4-разрядную схему пропускания, вход разрешения которой соединяется с выходами переполнения всех АЛУ. Далее полученный результат выводится на разъем "Множ" на передней панели. Двоичный код "1111" на выходном разъеме означает переполнение, т.е. сумма больше или равна "1111". Время установления кода суммы на выходном разъеме после окончания строб-импульса равно 50 нс.

Схема управления обеспечивает дешифрацию команд, возможность чтения данных регистра, номеров модуля и подадреса и адресного чтения со сбросом. Для чтения информации модуль разбит на два подадреса. В режиме ПЧИ читаются только подадреса с ненулевой информацией.

Описанные 32-канальные стробируемые регистры с мажоритарной логикой в системе МИСС нашли широкое применение в физических установках ИФВЭ, и в настоящее время 700 модулей типа ЛЭ-39 используются для регистрации информации с более чем 22 тысяч каналов детекторов.

#### **4.2. Система модулей логической наносекундной электроники**

Модернизация физических установок и постановка все более сложных экспериментов с точки зрения организации эффективного и гибкого отбора полезной информации требовали создания новой системы наносекундной логической электроники, а опыт, накопленный в процессе эксплуатации ранее разработанной наносекундной электроники в стандарте NIM, появление современных быстродействующих интегральных микросхем, развитие и внедрение вычислительной техники в физику высоких энергий создали благоприятные условия для ее разработки. При этом были сформулированы основные требования к этой системе:

- совместимость с ранее разработанной наносекундной электроникой для обеспечения возможности параллельной работы аппаратуры;
- максимальное использование современных быстродействующих микросхем;
- возможность изменения параметров модулей (порогов чувствительности, времени задержки, времени разрешения логических схем, включение и выключение каналов) как вручную, так и от ЭВМ;
- блокировка ручных органов управления при переходе на работу от ЭВМ и наоборот;
- максимальное быстродействие не ниже 100 МГц;
- достижение минимального времени задержки в модулях;



- возможно более плотная компоновка схем в модулях с целью уменьшения габаритов и стоимости аппаратуры;
- простота в эксплуатации электронной системы при настройке и проведении физических измерений (минимальное число переключателей, независимость параллельных выходов, мнемоническое изображение функций схем на панелях модулей, индикация прохождения сигналов);
- минимальное количество подстроечных элементов для удобства настройки схем при серийном изготовлении и ремонте.

Разработанная система [11] включает в себя набор модулей формирования и отбора наносекундной электроники, основные параметры которых показаны в табл. 5. Эта электроника выполнена в рамках системы СУММА в соответствии со стандартом КАМАК. Длительность выходных импульсов модулей 128; 132; 134, 135 равна длительности входных сигналов, а длительность выходных импульсов логических модулей 129; 130; 131 равна времени выполнения заданной логической функции Тф над сигналами, поступающими на вход. Электрические параметры всех внешних сигналов модулей соответствуют стандарту NIM. Межмодульные соединения осуществляются коаксиальными кабелями с разъемами типа РЦ-00.

**Таблица 5. Характеристики модулей логической наносекундной электроники.**

№ модуля	Количество и функциональное назначение схем	Ширина модуля, мм	Число вх/вых на схеме	Порог чувствит., мВ	Время задержки на схему, нс	Длительн. выходных имп., нс
128	Два разветвителя на 8 выходов	20	1/8	-400	6	Твх
129	Четыре 2-входовые логические схемы с общим входом	40	2+1общ./ 2пр.+2инв.	-400	6	Тф*
130	Четыре 4-входовые логические схемы	40	4/ 2пр.+2инв.	-400	6	Тф*
131	Две 8-входовые логические схемы	40	8/ 2пр.+2инв.	-400	6	Тф*
132	Восемь усилителей-ограничителей с общим входом ворот и выходом по ИЛИ	40	1+1общ./ 2пр.+2инв. +ИЛИобщ.	-50 -100 -200 -400	8	Твх
133	Четыре формирователя	40	1/ 2пр.+2инв.	-50 -100 -200 -400	8	5 10 20 40
134	Две переключаемые линии задержки	20	1/1	-	3-66 шаг 1 нс	Твх
135	Две переключаемые линии задержки	20	1/1	-400	8-71 шаг 1 нс	Твх

\* Длительность на выходе равна времени выполнения входными сигналами заданной логической функции

Логические импульсные сигналы в системе – биполярные. Ряд модулей имеет соответствующие выходы: прямые (отрицательной) и инверсные (положительной полярности). Это дает возможность при некоторой избыточности выходных разъемов реализовывать различные функции в логических модулях коммутацией сигналов соответствующих полярностей. Логические модули типа 129; 130 и 131 осуществляют функции И, И-НЕ для положительных и ИЛИ, ИЛИ-НЕ – для отрицательных сигналов. Для усиления, ограничения и формирования сигналов от детекторов служат два типа модулей – 132 и 133. Подбор временных задержек для неформированных сигналов производится переключением пассивных задержек в модуле 134. Регулировка задержек логических сигналов с помощью ЭВМ осуществляется управляемым модулем 135, размножение логических импульсов – модулем 128. Основной элементной базой электронных схем модулей являются микросхемы ЭСЛ серии К500 для быстродействующей части и микросхемы ТТЛ серии К155 для управляющей части модулей.

Управление такими параметрами модулей, как порог чувствительности, время задержки, длительность импульсов, включение и выключение входных каналов в модулях логики, осуществляется либо с передних панелей модулей с помощью тумблерных регистров и кабельных соединителей, либо от ЭВМ заданием команд в регистры управления. Переключение режимов работы производится сигналом, поступающим в модули по резервному контакту канала каркаса А1. Низкий “единичный” потенциал на этом контакте соответствует управлению от ЭВМ, при котором органы ручного управления блокируются.

Принципиальная схема 8-входовой логической схемы модуля 131 показана на **рис. 11**. Независимое включение и отключение всех входных каналов производится от управляющего регистра на ИС К155ТМ7. В схеме отсутствуют преобразователи уровней логических сигналов стандарта NIM в уровни сигналов микросхем ЭСЛ. Это согласование достигается смещением питающих напряжений на ИС серии 500 (+0.9 В и -4.3 В), что позволило уменьшить задержку прохождения сигналов через модули до 6 нс. Все выходы схем независимы и не требуют применения согласующих нагрузок. Это обеспечивает удобство в работе, особенно с большими электронными системами. Остальные логические модули типа 129; 130, а также модуль разветвителя 128, не имеющих управления, собраны по аналогичным электронным схемам.

Модули усилителей-ограничителей и формирователей имеют на входе последовательный диодный ограничитель, предохраняющий микросхемы от импульсных перегрузок (максимально допустимая амплитуда входных сигналов 30 В). Усиление и дискриминация сигналов осуществляются на двух усилителях ИС 500ЛП116, к одному из входов этой схемы подводится

напряжение от цифро-аналогового преобразователя для задания порога чувствительности. Резистор 8,2 кОм служит для устранения разброса порогов между схемами в модуле. Изменение порога чувствительности в диапазоне температур от 20°C до 50°C составляет не более 0.15 мВ/град. Схемы имеют светодиодную индикацию прохождения импульсов.

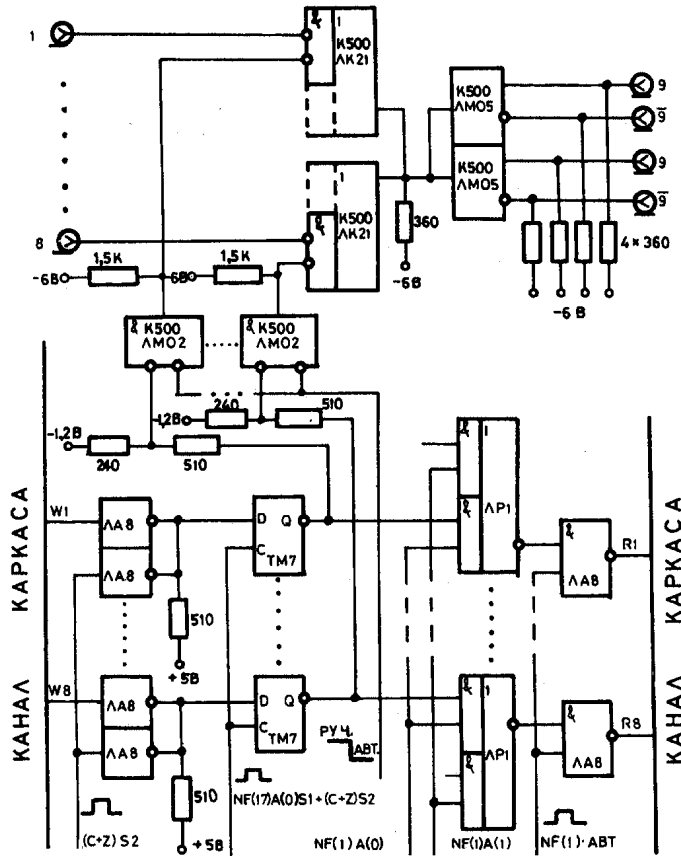
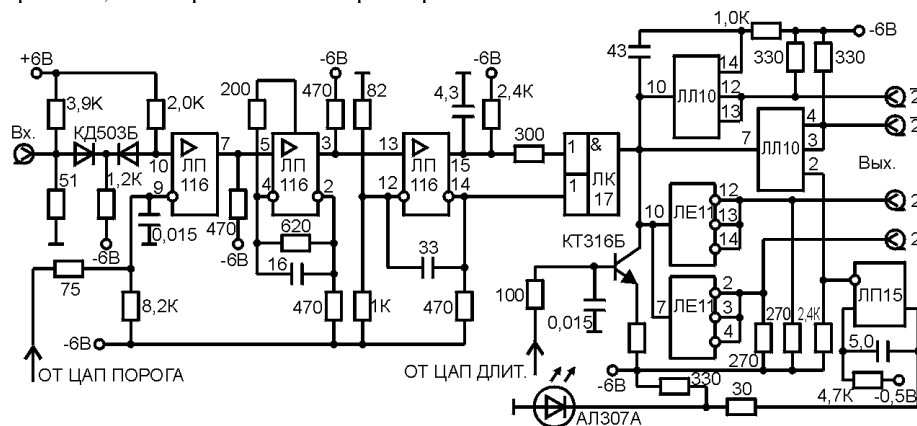


Рис. 11. Принципиальная схема модуля 131.

Усилители-ограничители имеют общий вход ворот, а также схему сборки восьми входных сигналов по ИЛИ. Каждый канал модуля 132 имеет свой драйвер с прямым и инверсным выходами на разъемы. Такая структура схем модуля позволяет эффективно его использовать в многоканальных

охранных системах сцинтилляционных счетчиков, включаемых, как правило, на запрет по ИЛИ триггерных сигналов.



*Рис. 12. Принципиальная схема формирователя.*

В схеме формирователя (рис. 12) второй усилитель включен по схеме триггера Шмитта, что дает возможность получать короткие фронты на выходе усилителя. Для улучшения пороговой характеристики на третьем усилителе собрана схема с емкостной положительной обратной связью, уменьшающая длительность фронта импульса. Проходя через ИС 500ЛК117, входные импульсы укорачиваются до 5 нс из-за рассогласования времени прихода сигналов на входы этой ИС, обусловленного интегрирующей RC-цепью. Так как разряд емкости происходит через эмиттер открытого выходного транзистора этой ИС, время восстановления интегрирующей цепи после окончания входного сигнала равно 3 нс. Это время определяет мертвое время всей схемы формирователя. Длительность выходных импульсов формирователя задается током транзистора КТ316, которым разряжается интегрирующая емкость  $C$ , образующаяся из параллельного соединения входных и выходных емкостей всех элементов, подключенных к прямому выходу ИС 500ЛК117, и емкости 43 пФ. Ко входу транзистора подводится напряжение от ЦАП регулировки длительности импульса.

В модулях усилителей-ограничителей и формирователей величины порогов, длительностей и задержек задаются двоичным кодом одновременно для всех схем в модулях. Питание ИС серии 500 в модулях, как и в логических схемах, осуществляется от напряжений +0.9 В и -4.3 В.

Разработанная система логической наносекундной электроники была освоена в производстве ИФВЭ, и с начала 80-х годов изготовлено и

настроено более 1500 модулей, которые используются практически во всех установках и стендах Института.

#### **4.3. Организация передачи информации на базе протокола МИСС**

В середине 80-х годов стало ясно, что электронная аппаратура в системе СУММА не удовлетворяет в полной мере тем требованиям, которые выдвигаются в связи с планируемыми экспериментами на вновь создаваемых или модернизируемых физических установках типа ВЕС, СФИНКС-М и др. В первую очередь, это резкое увеличение скорости набора статистики и организация возможностей для создания эффективных и гибких триггерных систем. Поэтому была предложена новая система МИСС, имеющая высокие скорости передачи информации и широкие возможности для организации триггерных систем [12].

В основу конструктивов системы МИСС была положена механика системы СУММА, сигналы в магистрали каркаса выбраны однофазные в уровнях ЭСЛ. Каркас был разбит на два сектора по 12 мест каждый, которые можно объединять в один сектор посредством активного экстендера. Сектор может содержать модули регистрации (МР) или буферной памяти (МБП), как правило, однотипные и контроллеры различного назначения.

Система МИСС предполагает наличие двух информационных каналов: быстрого однонаправленного канала сбора данных и относительно медленного двунаправленного канала контроля и управления. С этой целью в секторе располагаются два типа контроллеров: автономный (АК) и сектора (КС). АК является специализированным устройством для одного или нескольких типов модулей МР или МБП и решает следующие задачи:

- быстрое считывание информации из модулей сектора;
- предварительная обработка поступившей информации;
- передача обработанной информации в модули буферной памяти;
- подсчет числа принятых событий и слов в них;
- формирование слов - идентификаторов конца события;
- управление и синхронизация сигналами от системы сбора данных.

КС служит для обеспечения режимов управления при тестировании, настройке и калибровке аппаратуры, осуществления двунаправленного обмена информацией с МР и АК со скоростью, определяемой ЭВМ. Работа АК и КС с магистралью разделена во времени и определяется режимом работы, задаваемым контроллером сектора. При регистрации сигналов с детекторов КС устанавливает сектор в автономный режим, передавая управление АК.

С целью осуществления такой структуры системы коллективом сотрудников ИФВЭ был разработан протокол МИСС, в соответствии с которым магистраль сектора содержит следующий набор линий:

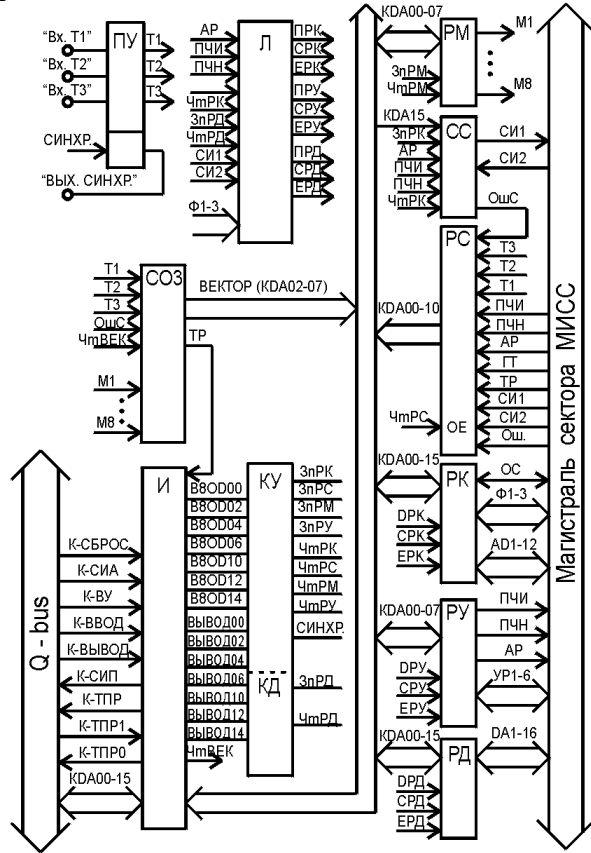
- 12 линий адреса АД для передачи адреса к модулю и от него;
- 16 линий данных ДА для передачи информации внутри сектора;
- 3 линии функций Ф, определяющих тип исполняемой операции;
- 2 линии синхросигналов СИ1 и СИ2, где сигнал запроса СИ1 генерируется контроллером, а сигнал отклика СИ2 - модулем;
- линии требования на обслуживание ТР и готовности к операции модуля ГТ;
- 4 линии для организации последовательного чтения модулей ПЧН, ПЧИ, П1 и П2;
- линии ошибки ОШ, общего ОС и быстрого БС сбросов;
- линия автономной работы АР, указывающая на работу модулей с АК;
- 6 линий УР1 - УР6 для специальных целей.

Протокол МИСС позволяет осуществлять такие операции в секторе, как адресная передача информации (АП) между модулями и контроллером, и операции последовательного чтения номеров модулей (ПЧН) и информации (ПЧИ), предназначенные для быстрого чтения модулей в секторе. Для управления операцией ПЧИ используются линии ПЧИ, ТР и последовательная линия П1. В модулях регистрации имеются схемы, вырабатывающие на линии ТР и П1 единичные сигналы в случае наличия в них значащей информации. Организация последовательной линии П1 предусматривает также в модулях МР схему переноса сигнала П1 от входа к выходу. Разработанный протокол МИСС позволил довести время выполнения операций внутри сектора до величины порядка 100 нс.

С целью реализации канала контроля и управления была проведена разработка соответствующей аппаратуры, исходя из следующего. В конструктиве ЭВМ устанавливается драйвер сигналов канала, а выполнение протокола канала ЭВМ обеспечивают контроллеры соответствующих систем, подключенных к этому драйверу. Протокол наиболее распространенной (в то время) в ИФВЭ микро-ЭВМ “Электроника-60”, канал которой отличается небольшим числом сигнальных линий и простотой протокола работы, был выбран для канала контроля и управления.

Разработанные контроллеры сектора ЛЭ-20И и ЛЭ-51 [13], структурная схема которого показана на рис. 13, предназначены для подключения сектора МИСС к ЭВМ: “Электроника-60” и обеспечивают работу сектора в предусмотренных системой режимах. Рассмотрим принцип работы модуля ЛЭ-51, который содержит канал управления и канал передачи данных. Через канал управления из ЭВМ в сектор передаются команды и управляющие сигналы, а в ЭВМ поступают статусная информация, запросы на

обслуживание, адресная часть информации, получаемой от модулей системы при работе в режимах последовательного чтения.



**Рис. 13. Структурная схема контроллера сектора ЛЭ-51.**

Через канал данных происходит передача данных между ЭВМ и системой. Канал управления и канал передачи данных взаимодействуют с каналом ЭВМ через интерфейсную логику И. Начальный адрес А0 из занимаемых контроллером адресов в адресном пространстве ЭВМ устанавливается кодовым переключателем. Канал управления содержит четыре регистра: команды РК, статуса РС, маски РМ и управления РУ. Регистр РК служит для хранения кода команды, выполняемой в секторе в режиме "Адресная передача". При этом старший разряд регистра содержит код логического "0". В противном случае записанный код вызывает генерацию сигнала ОС независимо от состояния остальных разрядов. Остальные

разряды включают коды номера и подадреса модуля, а также код выполняемой функции.

Синхронизация операции в секторе обеспечивается сигналами СИ1 и СИ2. Начало операции (выдача СИ1) происходит при записи команды в РК, если сектор находится в режиме АП, и по окончании чтения адресной информации из регистра команды в режимах ПЧН и ПЧИ. Если в ответ на СИ1 в узел синхронизации УС не поступит в течение заданного времени сигнал СИ2, то вырабатывается сигнал “Ошибка синхронизации” (ОшС), который обрабатывается либо в режиме прерывания, либо программным опросом регистра статуса. В режиме АР чтение регистра команды позволяет передать в ЭВМ состояние соответствующих линий магистрали сектора, что может использоваться при анализе причин неправильной работы магистрали.

Регистр состояния РС хранит состояние линий магистрали сектора, требующих при определенных условиях работы аппаратуры соответствующей реакции ЭВМ, и запоминает внешние запросы на обслуживание. Алгоритм обслуживания запросов определяется пользователем системы. Регистр маски РМ хранит код маски и обеспечивает разрешение или запрещение прерывания для любого из 8 следующих запросов: три внешних запроса, запросы по сигналу ОшС, при наличии любого из сигналов ТР, ГТ, ОШ и при окончании последовательного чтения. Содержимое разрядов РМ и сигналы запросов поступают на схему обработки запросов СОЗ, которая обеспечивает приоритетное обслуживание незамаскированных требований и выполнение протокола режима прерывания канала ЭВМ. Регистр управления РУ имеет восемь разрядов, два из которых Р1 и Р2 определяют один из четырех возможных режимов работы сектора:

Режим	АП	ПЧН	ПЧИ	АР
Р1	0	1	0	1
Р2	0	0	1	1

Канал передачи данных содержит двунаправленный 16-разрядный регистр данных (РД), информация в который заносится либо из ЭВМ при выполнении операции записи, либо из магистрали сектора при выполнении операции чтения.

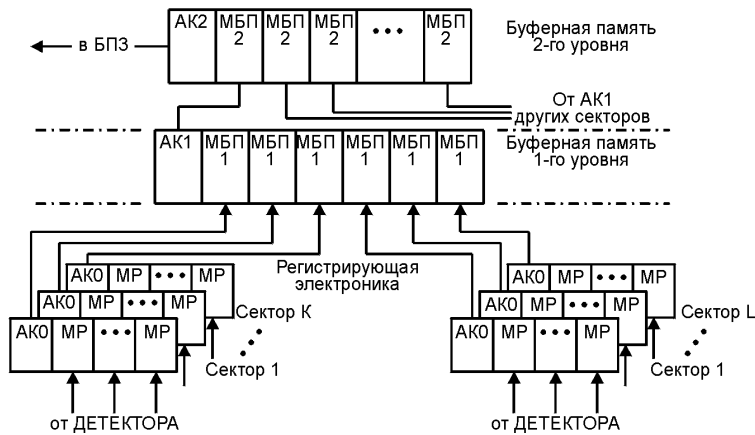
Для подключения контроллера сектора к каналу ЭВМ разработан активный расширитель канала Э-60Д, который позволяет подключать к ЭВМ до восьми контроллеров при общей длине линии связи не более 10 метров [13].

Как отмечалось ранее, быстрый однонаправленный канал предназначен для передачи значащей информации в модули МБП и формирования массива данных о физическом событии. Рассмотрим принцип работы этого канала на основе структурной схемы системы сбора данных, показанной на рис. 14.



Регистрирующая аппаратура (электроника нулевого уровня) располагается в секторах. Каждый сектор содержит модули регистрации МР и автономный контроллер АК0. Этот контроллер управляет работой подчиненных ему модулей во время регистрации принимаемых от детекторов сигналов, опрашивает МР, имеющие информацию, производит ее первичную обработку (фильтрацию, вычитание пьедесталов и т.п.) и передачу в модуль буферной памяти первого уровня МБП1. Передача информации из секторов в МБП1 осуществляется одновременно и завершается записью дополнительного слова - идентификатора конца события.

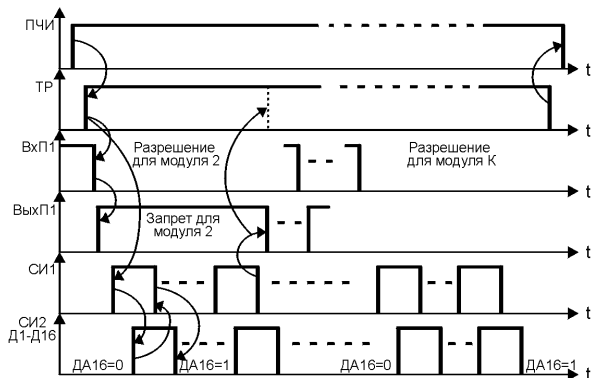
Буферные памяти – памяти типа FIFO емкостью, позволяющей хранить информацию о нескольких физических событиях. Автономный контроллер буферной памяти первого уровня АК1 выполняет опрос модулей памяти так, что из каждого модуля извлекаются данные, относящиеся к одному событию, и передает эту информацию с дополнительным идентификатором конца события в виде одного массива в модуль буферной памяти второго уровня МБП2. Таким образом, разделителем событий в МБП2 являются два соседних слова-идентификатора. Количество уровней буферной памяти определяется условиями конкретной экспериментальной установки.



**Рис. 14. Структурная схема системы сбора данных установки.**

Взаимодействие автономных контроллеров с МР или МБП по магистрали сектора МИСС осуществляется следующим образом (рис. 15). Контроллер АК0 устанавливает режим чтения сигналом ПЧИ, в ответ на который каждый МР выставляет сигнал на линию ТР (по логике ИЛИ). Через определенное время (100 нс) контроллер посылает запрос на чтение слова из МР в виде сигнала СИ1, имеющий приоритетное право. Временная задержка необходима для установления сигнала на приоритетной цепи

ВхП1/ВыхП1. Модуль регистрации, имеющий на линии ВхП1 разрешающий потенциал, отвечает на запрос АК0 выдачей кода данных и сигнала СИ2. Процедура чтения текущего МР завершается, когда он снимает свой сигнал ТР и устанавливает разрешение для следующего модуля по приоритетной цепи. После опроса последнего модуля будет снят сигнал на линии ТР, что приведет к снятию сигнала ПЧИ. Работа контроллеров АК1 и АК2 с МБП имеет одно отличие, а именно, процедура чтения текущего МБП1 завершается при считывании идентификатора конца события (старший разряд кода данных имеет значение "1"), а модуля МБП2 — двух слов-идентификаторов.



**Рис. 15. Временная диаграмма взаимодействия контроллера и модулей по магистрали сектора.**

Передача информации от автономного контроллера в модуль памяти осуществляется по кабельному каналу, содержащему 20 сигнальных линий. Сигналы — однофазные, а их уровни соответствуют уровням ИС ЭСЛ. Временная диаграмма работы кабельного канала представлена на рис. 16. Для передачи информации в память контроллер посылает сигнал требования ТА. Получив разрешение от МБП в виде сигнала готовности памяти ГП, контроллер выставляет на линиях Д1 - Д16 код данных, сопровождаемый синхросигналом СИА. Модуль памяти по переднему фронту СИА записывает полученное слово и отвечает синхросигналом СИП. Передача слова завершается снятием сигналов СИА и СИП. После выдачи всей информации снимаются сигналы ТА и ГП.

Автономные контроллеры и буферная память, используемые совместно с триггерной системой, позволяют стирать информацию негодного события непосредственно в буферной памяти. Решение о годности последнего записанного события должно быть принято до получения модулями памяти

информации следующего события. Для стирания информации события из буферной памяти на любом уровне автономный контроллер устанавливает в магистрали сектора сигнал БС.

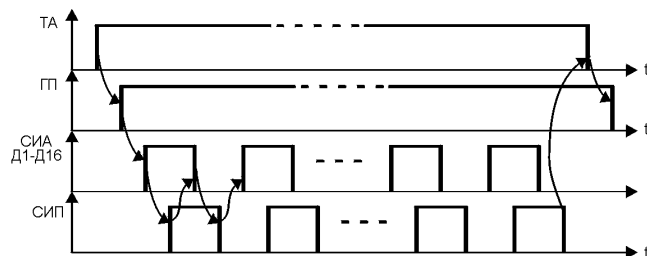


Рис. 16. Временная диаграмма передачи информации по кабельному каналу.

С целью реализации быстрого канала системы МИСС, формирования массива данных о физическом событии и предварительной обработки информации с аналого-цифровых преобразователей были разработаны соответствующие модули памяти и автономные контроллеры, описанные в пунктах 4.4 и 4.5.

#### 4.4. Модули памяти и автономные контроллеры для их управления

В рамках системы МИСС разработаны два типа модулей буферной памяти ЛЭ-56 и ЛЭ-64 [14], основные характеристики которых приведены в табл. 6.

Таблица 6. Характеристики модулей памяти.

Название модуля	Тип используемой микросхемы памяти	Емкость модуля памяти	Время выполнения записи/чтения	Возможность стирания события	ПЧН
ЛЭ-56	K537PY10	2К · 16	~400 нс	есть	нет
	K537PY25		~120 нс		
ЛЭ-64	IDT7203	2К · 16	~80 нс	нет	есть
	IDT7204	4К · 16			
	IDT7205	8К · 16			
	IDT7206	16К · 16			

Необходимо отметить, что время выполнения операции записи определяется как временной интервал между передними фронтами сигналов СИА и СИП, а чтения – между передними фронтами сигналов СИ1 и СИ2. Время выполнения операций также зависит от быстродействия применяемых ИС. Оба модуля могут применяться как на первом, так и на втором уровнях. Модуль ЛЭ-64 отличается от ЛЭ-56 использованием в качестве памяти ИС IDT7203, организованной по принципу FIFO, наличием режима последова-

тельного чтения номеров модулей (ПЧН) и возможностью записи информации в память по магистрали сектора.

Рассмотрим в качестве примера принцип работы модуля ЛЭ-64, структурная схема которого приведена на рис. 17. Информация для записи может поступать со стороны передней панели от АК, опрашивающего регистрирующую электронику, от АК памяти первого уровня или по магистрали сектора. Считывание информации в режиме сбора данных осуществляется АК, а в режиме тестирования – КС для передачи в ЭВМ. При записи по сигналу ТА от АК и при наличии свободного места в памяти узел синхронизации УС1 вырабатывает сигнал ГП. В ответ АК выставляет данные, сопровождаемые сигналом СИА. По этому сигналу формируется строб С для записи информации во входной регистр ВхРД1 и запрос на запись W1. При отсутствии места в памяти на вход УС1 поступает сигнал блокировки записи БЗп, что приводит к запрету сигнала ГП. В тестовом режиме запись ведется в режиме адресной передачи, при котором для записи каждого слова в память требуется выдача команды, содержащей в себе код функции Ф и номер модуля М. Дешифратор команды ДК вырабатывает строб-сигнал записи информации во входной регистр ВхРД2 и запрос на выполнение записи W2.

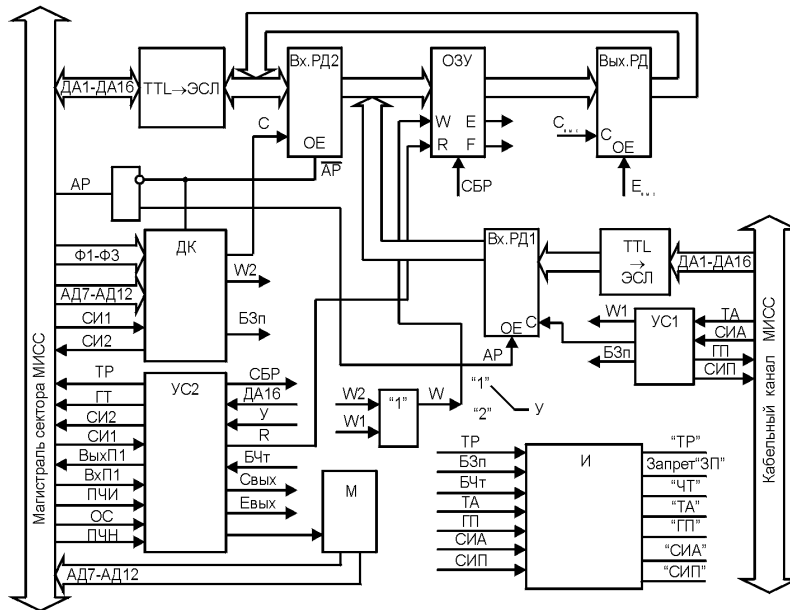


Рис. 17. Структурная схема модуля памяти ЛЭ-64.

Чтение модуля памяти по каналу сектора обеспечивается узлом синхронизации УС2, который вырабатывает все необходимые сигналы. Память FIFO имеет отдельные каналы ввода и вывода информации, сигналы управления (W – запись, R – чтение и др.) и статусные сигналы (E – пусто, F – заполнено). Последние применяются для блокировки соответственно чтения и записи. Режим ПЧН, дополнительно введенный в модуль ЛЭ-64, позволяет проводить проверку конфигурации системы. В этом режиме каждый модуль сектора выдает присвоенный ему номер М на линии АД7 - АД12 магистрали сектора. Уровень памяти задается переключателем У, индикация основных сигналов производится узлом И.

Для управления модулями МБП разработаны автономные контроллеры типа ЛЭ-62 и ЛЭ-65 [14], структурная схема которого показана на рис. 18. Право работы с модулями сектора АК получает при наличии разрешающего потенциала на линии АР магистрали сектора. Этот сигнал устанавливается КС или при его отсутствии переключателем ПЗ. Управление АК осуществляется 4 внешними сигналами “Сброс”, “Старт”, ГТ (готовность) и БС (быстрый сброс), которые имеют уровни сигналов NIM и длительность равную не менее 50 нс.

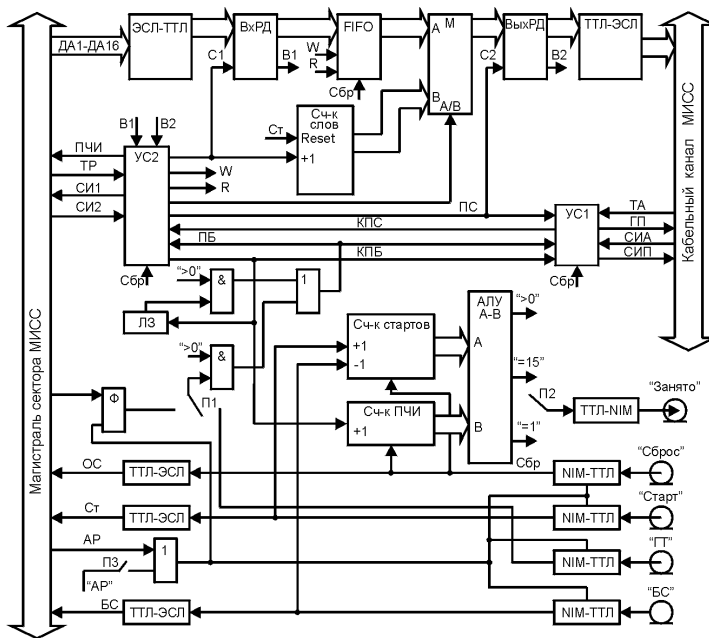


Рис. 18. Структурная схема модуля контроллера ЛЭ-65.

Сигнал “Сброс” предназначен для инициализации контроллера и модулей сектора, а сигнал “Старт” указывает на наличие триггерного события в системе. Сигналы ГТ и БС вырабатываются триггерной системой при годности или негодности данного события для передачи его на следующий уровень буферизации. Если триггерный сигнал не используется, то в качестве ГТ можно использовать задержанный сигнал “Старт”. Сигнал БС вызывает стирание данного события из памяти. Все сигналы, кроме ГТ, при автономной работе транслируются в магистраль сектора.

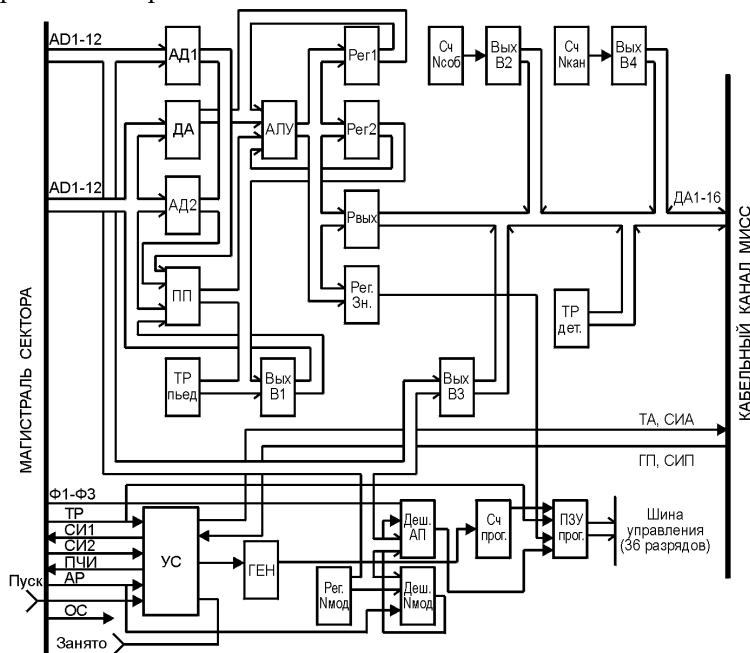
Запуск контроллера на чтение памяти произойдет, если счетчик стартов имеет единичное значение и поступил внешний сигнал ГТ или сигнал Гт из магистрали сектора, а также если счетчик стартов получил два сигнала “Старт” при условии отсутствия сигналов ГТ и Гт. Для реализации этих условий в контроллере имеется 4-разрядное АЛУ, выполняющее операцию А-В. В качестве операнда А выступает содержимое счетчика стартов, а в качестве операнда В — содержимое счетчика ПЧИ. Первый счетчик инкрементируется по сигналу “Старт” и декрементируется сигналом БС, а второй — наращивает свое содержимое по окончанию чтения события. АЛУ вырабатывает сигналы: " 0", "=1", "=2" и "=15". Сигналы "=1" и "=15" могут применяться для формирования сигнала “Занято”.

После запуска контроллер устанавливает режим ПЧИ по сигналу НПБ (начало передачи блока данных). Узел синхронизации УС1 формирует все необходимые сигналы для взаимодействия с модулями памяти по магистрали сектора, для конвейерной передачи каждого слова из магистрали сектора в кабельный канал и для взаимодействия с узлом синхронизации УС2 работы кабельного канала. По окончании передачи блока данных из памяти в кабельный канал выдается слово-идентификатор, старший разряд которого имеет единичное значение, а 15 разрядов содержат количество слов в блоке, включая идентификатор. УС2 вырабатывает сигнал КПБ (конец передачи блока), который нарастит содержимое счетчика ПЧИ, и, если АЛУ сохранит сигнал "0", осуществит запуск нового цикла чтения блока данных. В контроллере для буферизации данных кроме входного ВхРД и выходного ВыхРД регистров используется буферная память типа FIFO, что позволило “развязать” работу магистрали сектора и кабельного канала и повысить скорость передачи данных.

#### **4.5. Автономные контроллеры для предварительной обработки и передачи информации с аналого-цифровых преобразователей**

Для опроса аналого-цифровых преобразователей в системе МИСС были разработаны специализированные АК двух типов ЛЭ-24 и ЛЭ-60, основными задачами которых являются проведение быстрого опроса АЦП, предварительная обработка поступающей информации и пособытийное формирование массива данных для передачи в модули МБП [6, 7].

Модуль ЛЭ-24, структурная схема которого показана на **рис. 19**, осуществляет кроме указанных выше задач вычитание “пьедесталов” из информации, поступившей от зарядочувствительных АЦП, и представляет собой программируемый модуль, способный выполнять набор арифметических и логических операций с 16-разрядными словами. Работа модуля осуществляется с помощью памяти программ ПЗУ*прог* емкостью 256 x 36 разрядов. Эта память управляет входами всех регистров, кроме регистров адреса АД1, АД2 и данных ДА, режимами АЛУ, счетчиками номера события Сч*Нсоб* (12 разрядов) и числа сработавших каналов Сч*Нкан* (10 разрядов), программным счетчиком Сч*прог* (3 разряда) и узлом синхронизации работы внутренних магистралей УС. В процессе обработки принятой информации происходит обмен данными между регистрами контроллера АД1, ДА, тумблерным регистром отклонений “пьедестала” Тр*пед* (4 разряда), регистром результата Рег1 (13 разрядов), регистром результата суммы Рег2 (13 разрядов), выходным регистром Р*вых* (13 разрядов), регистром знака (1 разряд), памятью “пьедесталов” ПП емкостью 1К•512, магистралью сектора и кабельным каналом.



**Рис. 19.** Структурная схема модуля контроллера ЛЭ-24.

Для обеспечения программированной работы в контроллере существуют две внутримодульные магистрали, а именно, магистрали первого и второго операндов. Для осуществления межмагистральных подключений и подключения к кабельному каналу счетчиков предназначены выходные ворота ВыхВ1-ВыхВ4. Все регистры модуля управляются по выходам и входам записи, кроме тумблерных регистров ТР $\bar{п}ед$  и ТР $\bar{дет}$ .

Принцип работы модуля заключается в следующем. Вначале происходит запись “пьедесталов” в память ПП, а затем начинается опрос модулей АЦП в соответствии с протоколом МИСС. По переднему фронту СИ2 запускается внутренний генератор ГЕН и начинается программируемая работа ЛЭ-24. Информация с АЦП поступает на один вход АЛУ, а на другой – значение “пьедестала”. Результат вычитания через регистр РЕГ2 поступает снова на АЛУ для сравнения с порогом, который устанавливается тумблерным регистром ТР $\bar{п}ед$  и немного превышает максимальное значение “пьедестала”. При положительном решении величина заряда за вычетом “пьедестала” передается в кабельный канал, а при отрицательном – разница заносится в регистр РЕГ1, в котором суммируются значения этих разниц по всем каналам, что позволяет анализировать стабильность работы АЦП в секторе.

В результате работы модуля ЛЭ-24 информация в кабельный канал поступает в формате, изображенном на **рис. 20**, где "1" в 15-м разряде есть признак амплитуды, а "1" в 16-м разряде – признак последнего слова. Время обработки информации в контроллере не превышает 300 нс, максимальная разрядность слова данных равна 16, и максимальное число обслуживаемых каналов составляет 1024.

16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
0	0			№ модуля						подадрес					
0	1			заряд											
⋮															
0	0			регистр суммы остатков											
0	0			номер события											
1				тип детектора		количество сработавших каналов									

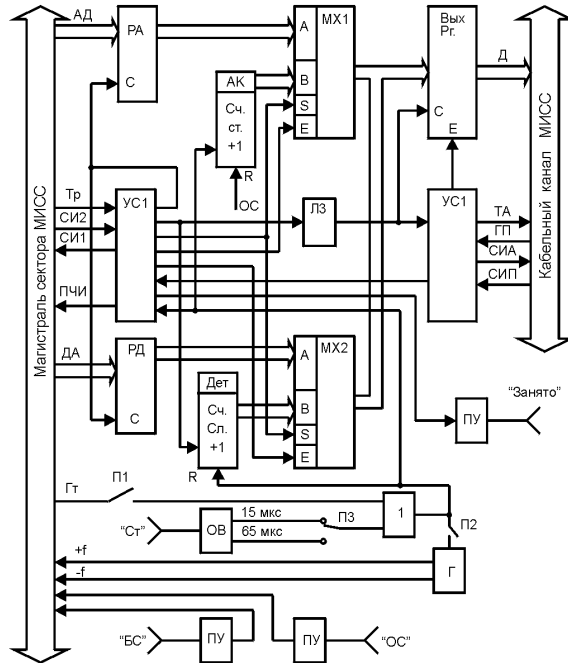
**Рис. 20.** Формат сообщения, передаваемого модулем контроллера ЛЭ-24.

Автономный контроллер ЛЭ-60 предназначен для опроса модулей аналого-цифровых и время-цифровых преобразователей и передачи прочитанной информации в модуль МБП. Структурная схема контроллера, представленная на **рис. 21**, содержит регистры адреса РА и данных РД, мультиплексоры МХ1 и МХ2, счетчики для подсчета числа переданных событий Сч1 и слов текущего события Сч2, а также переключатели для задания номера контроллера АК, типа детектора Дет и режима работы П1 и П2,



выходной регистр *Р<sub>вых</sub>* и устройства синхронизации УС1 и УС2, обеспечивающие синхронизацию операций магистрали сектора и кабельного канала.

Управление контроллером осуществляется сигналами, подаваемыми на соответствующие разъемы передней панели. Сигнал “Общий сброс” (ОС) устанавливает контроллер и модули регистрации в исходное состояние. По сигналу “Старт” (Ст) модуль ЛЭ-60 вырабатывает сигнал “Занято” и через заданный промежуток времени, выбираемый переключателем П2 (15 мкс – для ВЦП, 65 мкс – для АЦП), начинает опрос модулей МР и передачу прочитанной информации в модуль МБП. Если применяемые преобразователи после окончания преобразования снимают сигнал готовности ГТ, то включение переключателя П1 вызовет начало опроса сразу же после завершения операции преобразования "аналог-код" всеми преобразователями сектора. При выключенном переключателе П1 опрос преобразователей сектора будет начинаться по концу сигнала Ст.



**Рис. 21. Структурная схема модуля контроллера ЛЭ-60.**

Опрос преобразователей осуществляется в режиме ПЧИ. Если сектор содержит значащую информацию, в магистрали сектора устанавливается

сигнал требования ТР, который инициирует протокол чтения. В случае отсутствия сигнала ТР в течение 200 нс контроллер начнёт передачу служебных слов. Принимаемый из магистрали сектора код, содержащий адрес источника и выданное им слово данных, передается в память двумя словами: 1-е слово – адрес, второе – данные. Нечетные слова поступают в выходной регистр через мультиплексор МХ1, а четные – через МХ2. После передачи зарегистрированной информации контроллер добавляет два служебных слова и снимает сигнал “Занято”. Информационные и служебные слова имеют следующий формат:

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| а) 1-е информационное слово (адресное)    | в) 1-е служебное слово            |
| Разряд 16 15 14 13 12 ..... 7 6 5 4.....1 | Разряд 16 15...11 10.....1        |
| 0 0 0 0 № модуля 0 0 № канала             | 0 № АК № событ.                   |
| б) 2-е информационное слово (данные)      | г) 2-е служебное слово            |
| Разряд 16 15.....1                        | Разряд 16 15 14...12 11.....1     |
| 0 код данных                              | 1 0 Детект.К-во слов<br>в событии |

Сигнал “Быстрый сброс” (БС) транслируется в магистраль сектора и предназначается для модулей регистрации. Этот сигнал может поступать только во время преобразования. При его получении передача данных из магистрали сектора в буферную память не производится, не наращивается счетчик событий и контроллер снимает сигнал “Занято”. Все входные сигналы управления ОС, БС и Ст имеют уровни, соответствующие стандарту NIM. Длительность сигналов ОС и Ст равна 100 нс, длительность сигнала БС определяется используемыми преобразователями. При использовании автономного контроллера ЛЭ-60 минимальное время передачи данных из преобразователей в модуль буферной памяти составляет 300 нс.

Контроллеры и модули памяти, описанные в п.4.3–4.5, нашли применение при создании систем сбора данных экспериментальных установок на базе регистрирующей аппаратуры в системе МИСС. Это позволило значительно повысить быстродействие этих систем, создать многоуровневые триггерные системы и довести скорость потока полезной физической информации во внешние устройства до 4-8 Мбайт/сек.

## **5. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ОТБОРА ФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В УСТАНОВКАХ ИФВЭ**

Описанная система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации внедрялась в экспериментальные установки по мере создания и развития как установок, так и электронной

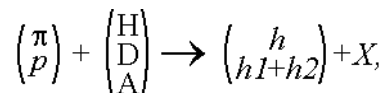
аппаратуры системы, и широко используется в настоящее время в физических и методических исследованиях на пучках частиц ускорителя ИФВЭ. В качестве иллюстрации ниже приводится описание систем сбора данных ряда установок, созданных на основе этой системы.

### 5.1. Система сбора данных экспериментальной установки ФОДС-2

Установка ФОДС-2 представляет собой поворотный двухплечевой магнитный спектрометр и позволяет реализовать следующие возможности:

- способность работать на пучках протонов и пионов при интенсивностях до  $10^9 \text{ с}^{-1}$ ;
- идентификация одной и более вторичных частиц ( $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$ ,  $\rho$ ) обоих знаков заряда в каждом плече спектрометра;
- раздельное измерение импульса и проекции угла вылета частицы на горизонтальную плоскость;
- изменение в широком диапазоне углов, под которыми регистрируются вылетающие из мишени частицы.

Установка предназначена для систематического исследования процессов одиночного и парного образования частиц с большими поперечными импульсами под углами от 0 до 320 мрад в лабораторной системе координат в реакциях



где H, D, A – водородная, дейтериевая и твердые ядерные мишени; h – одиночный адрон ( $\pi$ ,  $K$ ,  $\rho$  или  $p$ );  $h_1+h_2$  – пара из образовавшихся в реакции заряженных адронов, разлетающихся в противоположные стороны в системе центра масс (с.ц.м.) взаимодействующих частиц.

Установка расположена на канале № 22 ускорителя ИФВЭ, позволяющем формировать пучки протонов с импульсом до 70 ГэВ/с и других заряженных частиц (как положительных, так и отрицательных) в диапазоне импульсов  $10 \div 60$  ГэВ/с. Схема установки ФОДС-2 показана на **рис. 22** и включает в свой состав:

- сцинтилляционные счетчики S1 ÷ S6 (28 каналов);
- пучковые годоскопы Г1 ÷ Г3 на 64 канала;
- дрейфовые камеры ДК в количестве 14 штук размером  $256 \cdot 512 \text{ мм}^2$  и  $512 \cdot 512 \text{ мм}^2$  для измерения траекторий заряженных частиц (192 канала);
- пропорциональные камеры ПК в количестве 6 плоскостей размером  $240 \cdot 640 \text{ мм}^2$  и  $512 \cdot 1216 \text{ мм}^2$  для измерения траекторий заряженных частиц (800 каналов);

- спектрометр колец черенковского излучения СКОЧ на 24 канала для идентификации зарядов;

- адронный калориметр на 62 канала для амплитудного анализа и выработки триггерного сигнала.

Необходимо отметить, что в приведенном перечне указано число детекторов и каналов регистрации для одного плеча установки, так как оба плеча симметричны относительно оси пучка частиц.

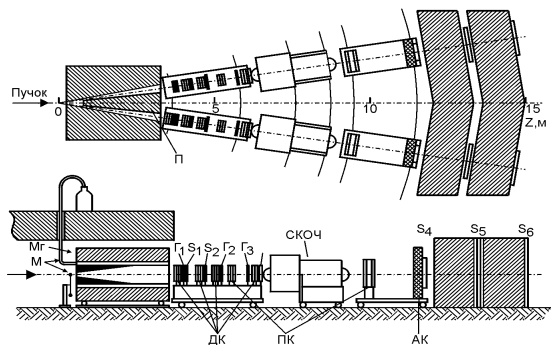
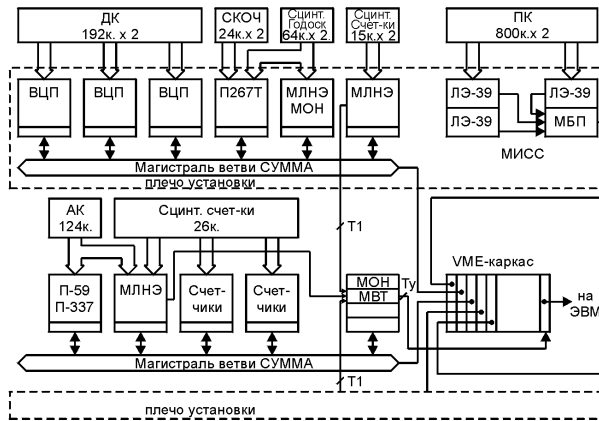


Рис. 22. Схема установки ФОДС-2.

Система сбора данных установки ФОДС-2 (рис. 23) создана на базе электронной аппаратуры в системе СУММА, за исключением регистрирующей электроники для пропорциональных камер, размещенной в каркасах системы МИСС. Информация с дрейфовых камер поступает на электронику время-цифровых преобразователей для определения координаты траектории частиц, которая измеряет времена до 400 нс и регистрирует до 4 импульсов по каждому каналу регистрации. С помощью этой электроники точность измерения времени была получена равной 1.8 нс. Временные измерения использовались также для определения координаты фотона черенковского излучения в СКОЧ и в измерении совпадений между плечами спектрометра на основе информации с пучковых годоскопов. Для этих целей были применены модули ВЦП типа П-267Т, которые позволили получить точность измерения времени  $2\tau = 1.2$  нс.

С адронного калориметра информация поступает на АЦП для амплитудного анализа и логическую наносекундную электронику с целью выработки триггерного сигнала. В качестве АЦП до последнего времени использовались модули П-59, а в настоящее время они заменены на модули П-337. Регистрирующая электроника для пропорциональных камер размещается в 4 каркасах системы МИСС, разделенных на секторы, по 2 каркаса в каждом плече спектрометра. В трёх секторах находятся 32-

канальные регистры типа ЛЭ-39, а в четвертом секторе – модули буферной памяти типа ЛЭ-56.



**Рис. 23. Блок-схема системы сбора данных установки ФОДС-2, где МЛНЭ – модули логической наносекундной электроники; МОН – модули общего назначения; МБТ – модуль выработки триггера установки.**

Система выработки триггера построена на модулях логической наносекундной электроники и организована следующим образом. Информация с адронного калориметра, сцинтилляционных годоскопов и счетчиков поступает на соответствующие модули наносекундной электроники. Для отбора частиц с импульсами  $> 5 \text{ ГэВ/с}$  вырабатывается сигнал триггера  $T_1$  в каждом плече при условии срабатывания сцинтилляционных счетчиков S1-S4. Сигнал триггера для регистрации двух частиц  $T_2$  вырабатывается схемой совпадений триггерных сигналов обоих плеч спектрометра. Время выработки сигнала  $T_2$  составляет 50 нс. По этому сигналу запускается электронная аппаратура аналого-цифрового преобразования. Для формирования триггерного сигнала установки  $T_y$  кроме сигнала  $T_2$  используется информация с пучковых годоскопов о прохождении частицы и с адронного калориметра о срабатывании определенного числа каналов регистрации. Общее время выработки сигнала  $T_y$  о полезности данного события равно 150 нс.

Электронная аппаратура для дрейфовых камер ДК, адронного калориметра АК, спектрометра СКОЧ, сцинтилляционных годоскопов и счетчиков, расположенная в 16 каркасах системы СУММА, объединена в три ветви. Информация с ДК, АК и СКОЧ считывается, обрабатывается и буферизуется в модулях буферной памяти при помощи специализированных

контроллеров в системе СУММА, а информация с пропорциональных камер — в системе МИСС. Затем этот массив данных по 5 каналам связи поступает в приемные регистры, расположенные в VME-каркасе, и далее в ЭВМ посредством микропроцессорного контроллера. Благодаря упаковке информации средняя длина упакованного события с одного плеча спектрометра составляет от 100 до 150 16-разрядных слов в зависимости от интенсивности падающего пучка и множественности частиц в детекторах установки. При работе с инклюзивным триггерным сигналом, когда независимо считывается информация с каждого плеча спектрометра, скорость приема информации для каждого плеча может составлять до 250 событий/цикл.

Созданная система сбора данных позволяет регистрировать до 2000 событий/сек при объеме информации в событии до 1.0 Кбайт и соответственно иметь поток информации, поступающей в ЭВМ, равный 2 Мбайт/сек. Эта система продемонстрировала высокую надежность и эффективность в работе в течение продолжительного времени.

С использованием описанной системы сбора данных на установке ФОДС-2 был выполнен ряд экспериментов, а именно:

- инклюзивное и парное образования адронов с большими  $p_T$  в зависимости от угла в  $pp$ - и  $p\bar{p}$ -взаимодействиях;
- инклюзивное и парное образования адронов с большими  $p_T$  в  $pA$ - и  $\bar{p}A$ -взаимодействиях;
- инклюзивное образование адронов с большими  $p_T$  на поляризованном пучке протонов с энергией 40 ГэВ в  $pp$ -взаимодействиях.

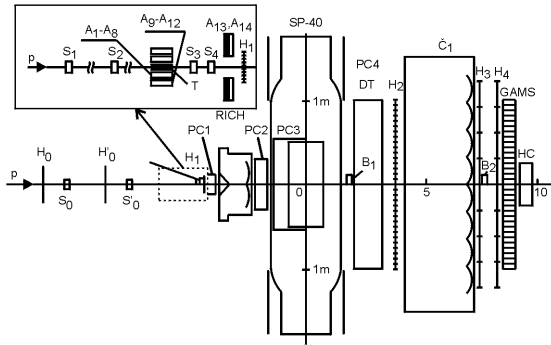
## 5.2. Система сбора данных экспериментальной установки СФИНКС-М

Экспериментальная установка СФИНКС-М предназначена для проведения на 70-ГэВ протонном пучке ускорителя ИФВЭ широкой программы исследования дифракционного образования барионных состояний, поиска тяжёлых экзотических барионов в реакциях с нуклонами и лёгкими ядрами и других барионных состояний в области эффективных масс  $M \leq 4.5$  ГэВ. Она размещается на канале № 21, который обеспечивает транспортировку и фокусировку пучка протонов на мишень установки интенсивностью  $4 \cdot 10^6$  протонов/цикл. Установка является широкоапертурным магнитным спектрометром со сцинтилляционными годоскопами, пропорциональными камерами, дрейфовыми трубками, многоканальным гамма-спектрометром и адронным калориметром. Для регистрации заряженных частиц в конечном состоянии используются черенковский спектрометр RICH и пороговый многоканальный черенковский счетчик.

Схема установки, представленная на **рис. 24**, включает:

- пучковые сцинтилляционные счетчики  $S_0+S_4$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  и годоскопы  $H_0$   $H_0'$ ;
- мишень  $T$  с "veto"-системой, состоящей из счетчиков  $A_1+A_{14}$ ;

- сцинтилляционные годоскопы Н1÷Н4 для выработки триггера;
- магнитный спектрометр на базе магнита SP-40 с однородным магнитным полем объёмом  $150 \times 100 \times 70 \text{ см}^3$  и  $P_1 = 0.7 \text{ ГэВ}$ ;
- система пропорциональных камер PC1÷PC4, состоящих из 11 плоскостей с размерами  $70 \times 60 \text{ см}^2$ ;
- система дрейфовых трубок DT диаметром 6 см, состоящая из 18 плоскостей;
- многоканальный гамма-спектрометр GAMS, включающий 1059 счетчиков с размерами  $5 \times 5 \times 40 \text{ см}^3$ ;
- многоканальный адронный калориметр HC;
- черенковский многоканальный спектрометр RICH;
- пороговый многоканальный черенковский счетчик С1.



*Рис. 24. Схема установки СФИНКС-М.*

По сравнению с ранее действующей установкой СФИНКС была проведена некоторая модернизация самой установки: введен адронный калориметр, дрейфовые камеры заменены на дрейфовые трубки, увеличено число годоскопических систем и улучшена трековая система самой установки. Наиболее существенной модернизации подверглась электронная система установки. Система сбора данных на базе системы СУММА практически полностью была заменена на новую, основой которой явилась электронная аппаратура, разработанная и созданная в рамках системы МИСС. В частности, внедрена новая регистрирующая электроника для пропорциональных камер и амплитудного анализа.

Система сбора данных установки, показанная на **рис. 25**, включает в себя регистрирующую электронику и электронику предварительной обработки и передачи информации в системе МИСС, а также модули общего назначения, логическую наносекундную и дополнительную регистрирующую электронику в системе СУММА. Электронная аппаратура в системе МИСС

располагается в 21 каркасе, часть из которых разбита на сектора, а аппаратура в системе СУММА — в 7 каркасах.

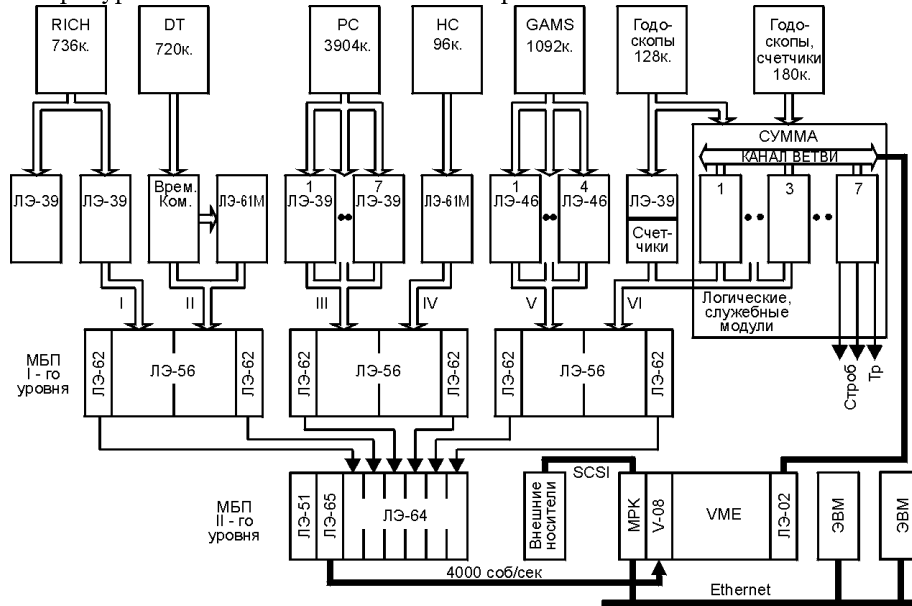


Рис. 25. Блок-схема системы сбора данных установки СФИНКС-М.

Структурно система сбора данных построена следующим образом. В трех каркасах СУММА располагаются модули общего назначения и дополнительная регистрирующая электроника, с которых информация читается в ЭВМ в общем массиве данных. В четырех каркасах СУММА находятся модули логической наносекундной электроники, управление которыми осуществляется по каналу ветви СУММА. Эта электроника вырабатывает строб-сигналы для регистрирующей электроники и триггерный сигнал о полезности данного события. Вся основная регистрирующая электроника разбита на 6 независимых подсистем. Информация с черенковского спектрометра RICH и 11 плоскостей пропорциональных камер PC поступает на 32-канальные регистры типа ЛЭ-39 (I и III подсистемы), с дрейфовых трубок DT через временные коммутаторы, измеряющие времена дрейфа, — на 16-канальные АЦП типа ЛЭ-61М (II подсистема), с адронного калориметра HC и гамма-детектора GAMS — на АЦП типа ЛЭ-46 и ЛЭ-61М (IV и V подсистемы). В шестую подсистему включены регистры типа ЛЭ-39, на которые поступают сигналы со сцинтилляционного годоскопа на 128 каналов, счетчики импульсов типа ЛЭ-57, регистрирующие неблокированные сигналы с пучковых счетчиков, а также три каркаса



системы СУММА с регистрирующей электроникой, на которые поступает информация со сцинтилляционных годоскопов и счетчиков (180 каналов).

Управление и контроль за модулями регистрации МР в системе МИСС осуществляется контроллерами сектора типа ЛЭ-51. Предварительная обработка и передача полезной информации из модулей МР в модули памяти МБП первого уровня типа ЛЭ-56 производится автономными контроллерами АР различного типа в зависимости от типа регистрирующей электроники. Передача завершается записью дополнительного слова — идентификатора конца события.

Передача информации из модулей МБП первого уровня в модули памяти второго уровня типа ЛЭ-64 осуществляется контроллерами АК типа ЛЭ-62, которые передают массив данных, относящийся к одному событию, и добавляют идентификатор конца события в виде второго дополнительного слова. Информация из модулей памяти второго уровня вычитывается контроллером типа ЛЭ-65 в каркас VME через адаптер МИСС-VME типа V-08, а затем — микропроцессорным контроллером МПК в ЭВМ или на внешние носители памяти. Такая организация системы сбора данных позволяет проводить параллельное считывание информации с подсистем, настройку и тестирование каждой подсистемы независимо, а также организовывать многоуровневую триггерную систему установки.

Система сбора данных установки работает следующим образом. Синхронимпульс ускорителя “Начало пучка” устанавливает систему сбора данных в исходное состояние и снимает программную блокировку приёма данных. Отбор требуемых событий осуществляется в два этапа. На первом этапе вырабатываются необходимые строб-сигналы для регистрирующей электроники, а на втором — триггерный сигнал о полезности данного события. Процесс генерации строб-сигналов и триггерного решения сопровождается соответствующими аппаратными блокировками. Набор требуемых строб-сигналов задаётся системой логической наносекундной электроники, в которую подаются сигналы с пучковых счётчиков и охранной системы. Логическое "ИЛИ" полученных строб-сигналов используется для регистрации импульсов с годоскопических счетчиков, РС и RICH.

Информация о типе строб-сигнала, данные с определенного набора годоскопов, а также информация об энерговыделении в GAMS для так называемого нейтрального триггера поступают в модуль триггерной логики, где и производится окончательное решение о типе события. В случае отрицательного решения происходит быстрый сброс регистрирующей электроники, задействованной на этом этапе, и последующее снятие блокировок. При положительном решении регистрируются сигналы в НС, GAMS и DT, и запускается цикл опроса регистрирующей электроники, сопровождаемый дополнительным блокированием входной логической

электроники на все время опроса. После снятия всех блокировок система сбора данных готова к приему следующего события.

Созданная система сбора данных позволяет записывать на внешние носители информации до 4.0 тысяч событий/цикл. Это означает, что при объёме информации в одном событии равном 1.6 Кбайт, поток информации с установки составляет ~6.4 Мбайт/цикл. Так, за время весеннего сеанса работы ускорителя ИФВЭ в 1999 г. на установке СФИНКС-М было записано  $\sim 6 \cdot 10^8$  событий. За время работы установки был выполнен ряд интересных физических исследований [15, 16].

Наиболее существенные результаты связаны с поисками новых барионных состояний в УК системах и с обнаружением бариона  $X(2000) \rightarrow \Sigma K$ , характеризующегося рядом аномальных свойств и являющегося кандидатом в экзотический пентакварковый барион со скрытой странностью. Обнаружено также значительное нарушение правила сохранения кварковых линий (“правило OZI”) в протонных процессах.

На базе разработанной электронной аппаратуры были созданы аналогичные системы сбора данных экспериментальных установок ВЕС, РАМПЕКС и ИСТРА-М. Необходимо отметить, что система сбора данных установки ВЕС [17] явилась первой системой, в которой была широко использована электронная аппаратура, созданная в рамках системы МИСС. Это дало возможность довести быстродействие системы сбора данных установки до 8000 тысяч событий/цикл и создать многоуровневую триггерную систему, что позволяет одновременно регистрировать и затем реконструировать свыше ста различных реакций.

В результате физических исследований на установке ВЕС получены следующие результаты [18+20]:

- впервые наблюдается образование системы  $\eta\pi(1^{-})$  в кулоновском поле;
- впервые наблюдаются особенности в экзотической волне  $J^{\text{pc}} = 1^{-+}$ ;
- обнаружен ряд резонансных состояний либо не наблюдававшихся ранее, либо считавшихся ненадёжно установленными;
- впервые наблюдаются или измерены следующие распады:  
 $a_2 \rightarrow \eta' \pi$ ,  $a_2 \rightarrow \omega \pi$ ,  
 $f_1(1285) \rightarrow \rho \gamma$ ,  $f_1(1285) \rightarrow \epsilon \eta$ ,  
 $\pi_2(1670) \rightarrow \omega \rho$ ,  
 $a_4(2000) \rightarrow \omega \rho$ ,  $a_4(2000) \rightarrow \rho \pi$ ,  $a_4(2000) \rightarrow f_2 \pi$ ,  
 $\rho_3(1690) \rightarrow a_2 \pi$ ,  
 $\pi(1800) \rightarrow \epsilon \pi$ ,  $\pi(1800) \rightarrow f_0 \pi$ ,  $\pi(1800) \rightarrow \eta \pi$ ,  $\pi(1800) \rightarrow K K \pi$ ,  $\pi(1800) \rightarrow \omega \rho$ .

Исходя из рассмотренных примеров систем сбора данных экспериментальных установок, можно сделать следующий вывод. Разработанная

система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации обеспечивает полный набор регистрирующей электроники и электронной аппаратуры предварительной обработки, хранения и передачи информации для создания систем сбора данных. Эта система позволяет легко модифицировать системы сбора данных и создавать многоуровневые триггерные системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы **основные результаты диссертации**:

1. В результате анализа экспериментальной базы для проведения физических исследований на 70-ГэВ ускорителе ИФВЭ сформулированы требования к системе функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации.
2. Разработана, создана и внедрена в эксплуатацию система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации, насчитывающая 27 электронных модулей различного назначения.
3. На основе разработанной системы функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации созданы системы сбора данных экспериментальных установок ФОДС-2, ВЕС, СФИНКС-М, РАМПЕКС и ИСТРА-М.
4. Разработан и создан широкий набор аналого-цифровых преобразователей типа "заряд-цифра", "напряжение-цифра" и "время-цифра".
5. Впервые разработана и внедрена в промышленность специализированная интегральная схема преобразования "заряд-время" типа КР1101ПД1; изготовлено более 150 тысяч микросхем.
6. Разработаны и широко применяются в составе систем сбора данных модули 32-разрядных регистров с мажоритарной логикой, которых насчитывается в настоящее время более 700 штук на 22 тысячи каналов регистрации.
7. Впервые предложена, разработана и внедрена в состав физических установок оригинальная система наносекундной логической электроники, насчитывающая 8 типов модулей; в настоящее время находится в эксплуатации более 1500 модулей.
8. Разработана и создана электронная аппаратура многоступенчатой скоростной системы предварительной обработки и передачи информации, поступающей от детекторов частиц, на базе протокола МИСС.

### **Основные результаты опубликованы в работах:**

1. Сенько В.А. *Системы сбора и обработки данных в электронных физических экспериментах и их развитие*. В сб.: "Тезисы докладов 3-го Всесоюзного семинара по обработке физической информации". ЦНИИАтоминформ, Ереван, 1985, с.7-8.
2. Сенько В.А. *Система ФАСТБАС (обзор)*. Препринт ИФВЭ 82-12, Серпухов, 1982; В сб.: "Вопросы атомной науки и техники", серия "Информация и системы управления", вып.5, 1982, стр.23-24.
3. Бушнин Ю.Б., Сенько В.А., Солдатов М.М., Якимчук В.И. *Многоканальный аналого-цифровой преобразователь для ФЭУ*. Препринт ИФВЭ 86-31, Серпухов, 1986.
4. Бушнин Ю.Б., Исаев А.Н., Сенько В.А., Солдатов М.М. *Многоканальный АЦП для измерения медленно-меняющихся напряжений*. Препринт ИФВЭ 86-32, Серпухов, 1986.
5. Бельский В.И., Бушнин Ю.Б., Зимин С.А., Пунжин Ю.Н., Сенько В.А., Солдатов М.М., Токарчук В.П. *Монолитная интегральная схема стробируемого преобразователя заряд-время*. Препринт ИФВЭ 85-60, Серпухов, 1985; *Электронная промышленность*, вып.9, стр.147; В сб.: "12-ый Международный симпозиум по ядерной электронике", Дубна, Д13-85-359, 1985, стр.58-59.
6. Бушнин Ю.Б., Зимин С.А., Сенько В.А., Солдатов М.М. *Аналого-цифровая электроника многоканальных калориметрических детекторов*. В сб.: "Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях. Тезисы докладов 5-го Всесоюзного семинара", изд-во ФАН Узбекской ССР, Ташкент, 1988, стр.86-88.
7. Васильев М.В., Сенько В.А., Солдатов М.М., Якимчук В.И. *Электронная аппаратура регистрации информации со сцинтилляционных калориметров*. Препринт ИФВЭ 95-88, Протвино, 1995.
8. Васильев М.В., Сенько В.А., Солдатов М.М. *16-канальный зарядочувствительный АЦП для сцинтилляционных калориметров*. Препринт ИФВЭ 99-49, Протвино, 1999.
9. Буянов О.В., Васильев М.В., Конопляников А.К., Сенько В.А., Солдатов М. М., Якимчук В.И. *16-канальный модуль высокоточных время-цифровых преобразователей*. Препринт ИФВЭ 94-12, Протвино, 1994; ПТЭ, №6, 1994, стр. 99-100; *Instruments and Experimental Techniques*, v.37, 1994, p.728-729.
10. Медовиков В.А., Сенько В.А., Шаланда Н.А. *Электронная аппаратура регистрации и триггирования наносекундного диапазона*. Препринт ИФВЭ 99-60, Протвино, 1999.
11. Бушнин Ю.Б., Денисенко А.А., Дунайцев А.Ф., Леоненко Д.А., Марчихин Н. К., Сенько В.А. *Модули системы наносекундной логической электроники с управлением от ЭВМ*. Препринт ИФВЭ 86-12,

- Серпухов, 1986; В сб.: "Тезисы докладов 3-го Всесоюзного совещания по автоматизации научных исследований в ядерной физике", изд-во "Наука" Казахской ССР, Алма-ата, 1987, стр.17-19.
12. Бушнин Ю.Б., Ваньев В.С., Гончаров П.И., Зимин С.А., Исаев А.Н., Конопляников А.К., Марчихин Н.К., Медовиков В.А., Макаров Г.П., Разумов А.А., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. *Быстродействующая система регистрирующей и триггерной электроники для экспериментальных исследований в ИФВЭ*. Препринт ИФВЭ 88-47, Серпухов, 1988.
  13. Сенько В.А., Якимчук В.И. *Аппаратура сопряжения электронных систем МИСС, СУММА и VME с микро-ЭВМ "Электроника-60"*. Препринт ИФВЭ 95-105, Протвино, 1995.
  14. Исаев А.Н., Сенько В.А., Якимчук В.И. *Аппаратура для буферизации данных в системе МИСС*. Препринт ИФВЭ 99-31, Протвино, 1999.
  15. Балац М.Я., Беляев И.М., Васильев М.В., Викторов В.А., Вишняков В.Е., Головкин С.В., Гришкин Ю.Л., Грицук М.В., Гужавин В.М., Дзюбенко Г.Б., Дорофеев В.А., Ермолин Ю.В., Жилин А.В., Каменский А.Д., Клигер Г.К., Кожевников А.П., Колганов В.З., Конопляников А.К., Константинов А.С., Корчагин Ю.В., Кубаровский В.П., Кульман Н.Ю., Кулявцев А.И., Куршецов В.Ф., Лакаев В.С., Ландсберг Л.Г., Лебедев А.А., Ломкаци Г.С., Матвеев Н.Ю., Молчанов В.В., Мухин В.А., Нилов А.Ф., Новожилов Ю.Б., Петров В.С., Пруцкой В.А., Семин С.Ф., Сенько В.А., Ситников А.И., Смолянкин В.Т., Солдатов М.М., Соляник В.И., Сытин А.Н., Фролов С.В. *Исследования полуклассических процессов с глубокой фрагментацией на установке "СФИНКС" (сотрудничество СФИНКС)*. Препринт ИТЭФ 85-92, Москва, 1992.
  16. Golovkin S.V., Kozhevnikov A.P., Kubarovsky V.P., Kurshetsov V.F., Landsberg L.G., Molchanov V.V., Mukhin V.A., Petrenko S.V., Senko V.A., Vavilov D.V., Victorov V.A., Kolganov V.Z., Lomkatsi G.S., Nilov A.F., Smolyankin V.T. *New data on the  $p+N \rightarrow [\Sigma^0 K^+] + N$  reaction at  $E_p=70$  GeV and the search for exotic baryons*. Eur. Phys. J., A5, 1999, pp. 409-411.
  17. Битюков С.И., Бушнин Б.Ю., Ваньев В.С., Вишневецкий Н.К., Власов Е.В., Гончаров П.И., Гуз Ю.П., Дзелядин Р.И., Екимов А.В., Зайцев А.М., Зимин С.А., Иванюшенков Ю.М., Исаев А.Н., Карюхин А.Н., Ключников Г.А., Конопляников А.К., Копиков С.В., Костриков М.Е., Матвеев В.Д., Медовиков В.А., Образцов В.Ф., Останков А.П., Сенько В.А., Солдатов М.М., Соловьянов О.В., Старченко Е.А., Хохлов Ю.А., Чернявский Н.Р., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. *Система сбора данных установки вершинный спектрометр ИФВЭ (установка ВЕС)*. Препринт ИФВЭ 94-101, Протвино, 1994.

18. Bitukov S.I., Borisov G.V., Vishnevskii N.K., Vlasov E.V., Gouz Yu.P., Dzhelyadin R.I., Zaitsev A.M., Ivanyushenkov Yu.M., Karyukhin V.V., Kachaev I.F., Klyuchnikov G.F., Konstantinov V.F., Kostrikov V.V., Kostyukhin M.E., Kriushin A.A., Lapin V.V., Matveev V.D., Obraztsov V.F., Ostankov A.P., Ryabchikov D.I., Semenov V.K., Senko V.A., Soldatov M.M., Starchenko E.A., Khokhlov Yu.A., Chernyavskii N.N., Beladidze G.F., Lomtadze T.A., Tskhadadze E.G. *Study of the reaction  $\pi^- p \rightarrow \omega n$  at  $P(\pi^-)=36$  GeV/c*. Preprint IHEP 91-156, Protvino, 1991; Zeitschrift fur Physik, C54, 1992, p. 367.
19. Zaitsev A.M., Berdnikov E.B., Bitukov S.I., Borisov G.V., Gouz Yu.P., Dzhelyadin R.I., Ekimov A.V., Ivanyushenkov Yu.M., Karyukhin V.V., Kachaev I.A., Khokhlov Yu.A., Klyuchnikov G.F., Konoplyannikov A.K., Konstantinov V.F., Kryushin A.A., Kostrikov M.E., Kostyukhin V.V., Matveev V.D., Ostankov A.P., Ryabchikov D.I., Senko V.A., Soldatov M.M., Starchenko E.A., Vishnevskii N.K., Vlasov E.V., Beladidze G.M., Lomtadze T.A., Tskhadadze E.G. *Latest results from the VES experiment*. Nuovo Cim. 107A, 1994, pp. 1941-1943.
20. Amelin D.V., Derdnikov E.B., Gouz Yu.P., Dorofeev V.A., Dzhelyadin R.I., Fenyuk A.B., Kachaev I.A., Karyukhin A.N., Khokhlov Yu.A., Konstantinov V.F., Kopikov S.V., Kostyukhin V.V., Likhoded S.A., Matveev V.D., Nikolaenko V.I., Ostankov A.P., Polyakov B.F., Ryabchikov D.I., Senko V.A., Solodkov A.A., Solodkov A.V., Solovianov O.V., Starchenko E.A., Vlasov E.V., Zaitsev A.M., Tskhadadze E.G. *Study of exotic and high spin resonances in reaction  $\pi^+ A \rightarrow \pi^+ \pi^- A$* . Report on Conference "HADRON99", Beijing, August, 1999.

*Рукопись поступила 10 марта 2000 г.*

В.А. Сенько.

Система функциональных модулей преобразования, регистрации и отбора физической информации установок ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 10.03.2000. Формат 60x84.16.      Офсетная печать.  
 Печ.л. 3,68.      Уч.-изд.л. 4,2.      Тираж 100.      Заказ 47.      Индекс 3649.  
 ЛР №020498 06.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий.  
 142284. Протвино, Московской обл.

---

ДИССЕРТАЦИЯ 2000–5 , ИФВЭ, 2000

---