

Б - 242



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13 - 11403

Басиладзе  
Сергей Геннадьевич

ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ  
И АППАРАТУРА РЕГИСТРАЦИИ  
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальности: 01.04.01 - экспериментальная физика,  
05.11.10 - приборы для измерения ионизирующих  
излучений и рентгеновские приборы.

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР профессор	ЛОБАШЕВ Владимир Михайлович,
доктор физико-математических наук старший научный сотрудник	КОПЫЛОВ-СВИРИДОВ Виктор Алексеевич,
доктор технических наук профессор	АГАХАНИЯ Татевос Мамиконович.

Ведущее научно-исследовательское  
учреждение: Физический институт  
им.П.Н.Лебедева АН СССР.

Автореферат разослан " " 1978г.

Защита состоится " " 1978г в " " час.  
на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при  
Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных  
исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного совета,  
кандидат физико-математических наук

*М.Ф.Лихачев*

М.Ф.Лихачев

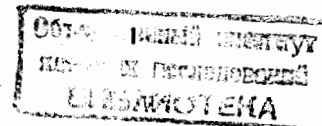
Электронные установки ядерно-физического эксперимента, являясь  
информационно-измерительными системами, имеют определенную специфику,  
выражающуюся в:

- 1) импульсном виде и случайном характере поступления данных,
- 2) наличии большого количества фоновых процессов, т.е. "информационного шума", и вытекающей отсюда проблемы выделения искомого события. Имеется ряд дополнительных особенностей, выделяющих экспериментальную аппаратуру физики высоких энергий в самостоятельную область электронных методов регистрации ядерных излучений. К ним можно отнести:
- 3) специфику, порождаемую используемыми детекторами, видом и распределением сигналов с их выходов.

Значительные масштабы физических установок, особенно последнего десятилетия, обуславливают:

- 4) повышенные требования к быстродействию систем, вызванные большим количеством исходной информации, поступающей в единицу времени,
- 5) повышенные требования к уровню отбора вследствие необходимости выделять события по большому числу признаков,
- 6) большое количество регистрируемой информации об искомом событии и связанные с этим проблемы рационального считывания данных в накопитель,
- 7) повышенные требования к надежности, снижению трудоемкости, габаритов и потребляемой мощности,
- 8) требования обеспечения электронных установок автоматизированными системами контроля в целях повышения эффективности использования дорогостоящего времени эксперимента.

Представленная диссертация основана на материалах исследований и разработок /I+84/, выполненных автором в основном в 1970-77гг. в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.



Целью работы являлось развитие электронных методов регистрации частиц высоких энергий современного автоматизированного физического эксперимента. Предпосылками развития на современном этапе явились: введение мини-ЭВМ третьего поколения непосредственно в структуру экспериментального комплекса, появление быстродействующих интегральных схем, внедрение международного стандарта КАМАК (Вектор), разработка многопроводочных детекторов новых типов.

Актуальность проблемы определяется важностью задач, решаемых электроникой регистрации в физическом эксперименте. Функции, которые выполняет современная аппаратура регистрации, состоят в съеме временной информации с детекторов, отборе исследуемых в данном эксперименте процессов, измерении их основных параметров и преобразовании образа исследуемого события в двоично кодированные числа для последующей передачи их в накопитель (ЭВМ). В силу этого данная аппаратура в значительной степени определяет возможности, несет на себе всю специфику проводимого эксперимента, ею задается достоверность получаемых результатов.

Достижение указанной цели потребовало решения целого комплекса проблем.

Автор защищает настоящей работой:

1. Решение общих теоретических вопросов электронной методики физического эксперимента.
2. Предложенные методы решения ряда задач и разработку оригинальных схемных решений узлов наносекундной ядерной электроники.
3. Разработку и внедрение в эксперимент набора блоков в стандарте КАМАК, полностью охватывающего быстродействующую электронную регистрирующую аппаратуру, а также разработку специализированных интегральных схем для многопроводочных детекторов.
4. Создание крупных электронных комплексов регистрирующей аппаратуры для исследования взаимодействия частиц при высоких энергиях.

Научная новизна и значимость работы заключаются в решении крупной теоретической проблемы выработки принципов построения и нахождения важнейших характеристик регистрирующих комплексов современного электронного эксперимента в физике высоких энергий и состоят в том, что:

1. Найдены отсутствующие в литературе общие решения
  - а) нахождения коэффициента отбора, эффективности регистрации и оценки аппаратурных затрат систем выделения исследуемых событий при произвольном числе детекторов и логике запуска установки;
  - б) проблемы съема временной информации с детекторов, при произвольной форме переднего фронта импульса, с учетом амплитудного распределения сигналов и инерционности схем временной привязки;
  - в) нахождения основных характеристик – просчетов и усредненного мертвого времени электронных систем время-координатных детекторов.
2. Установлены основные принципы рационального проектирования модульной регистрирующей аппаратуры. Предложены: новый тип логики работы формирователей импульсов, новый метод измерения временных интервалов, новый способ передачи импульсов по длинной линии связи, новый принцип построения цифровых мажоритарных схем совпадений.
3. Обеспечены принципиально новые возможности постановки экспериментов путем разработки первого в стране единого и наиболее полного набора блоков электронной регистрирующей аппаратуры нового поколения, ориентированного на применение в автоматизированных установках с прямой и обратной связью с ЭВМ.

Практическая ценность полученных результатов состоит в решении проблем методики постановки эксперимента на новом поколении аппаратуры созданием крупнейших в своей области отечественных электронных регистрирующих комплексов, позволивших получить новые физические данные о фундаментальных свойствах материи.

Кроме того:

1. Данные теоретических расчетов непосредственно применимы для рационального инженерного проектирования систем и блоков быстродействующей электроники регистрации. Предложенные методы обеспечивают значительное улучшение характеристик аппаратуры, снижение затрат на её реализацию.
2. Разработанные специализированные интегральные схемы внедрены в промышленность и являются основой для построения электроники пропорциональных камер в Советском Союзе.
3. Опыт проведенных разработок и они сами применимы для использования в других областях научных исследований, в том числе и в неядерных, таких как радиационная медицина, биология, рентгеноскопия, автоматизация электрофизических установок.

Структура диссертации отвечает избранной теме, содержанию и требованию цельности излагаемого материала. Она состоит из введения, шести глав – одной обзорной, второй теоретической, следующих трех, посвященных электронике соответственно временных, энергетических и координатно-временных детекторов, и заключительной, где описаны экспериментальные комплексы регистрирующей аппаратуры. Работа содержит 250 страниц текста, 97 рисунков, 11 таблиц, библиографический список литературы из 290 названий.

Во введении описаны последовательные этапы развития электронных средств регистрации физического эксперимента, выделена специфика методов регистрации в физике высоких энергий. Кратко изложено то новое, что, по мнению автора, вносится работой в избранную проблему, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выделен необходимый набор параметров сигналов с детекторов, отображающих исследуемые процессы, а также существенных с точки зрения неискаженного съема информации

с их выходов. Для используемых сейчас временных (сцинтилляционные детекторы /36,37/ и пропорциональные камеры), координатно-временных детекторов (пропорциональные и дрейфовые камеры), а также детекторов для измерения энергии (черенковские, сцинтилляционные, с газовым усилением) приведены расчётные либо экспериментальные данные по выделенным параметрам.

Проанализирована вторая важная сторона проблемы создания регистрирующей аппаратуры, а именно: элементная база и её влияние на способы построения и параметры аппаратуры. Выделены три основные специфические функции узлов регистрирующей электронной аппаратуры: усиление-формирование, дискриминация по амплитуде и задание определённой длительности сигналов, отсутствующие непосредственно в стандартном наборе быстродействующих интегральных схем с эмиттерной связью. На основе анализа характеристик и конкретных схемных решений этих интегральных схем, иллюстрации известных разработок показана возможность их использования для подобных специфических применений /61/.

Произведена классификация устройств задания длительности сигналов (одновибраторов) /19/. Схемы оцениваются по трём группам признаков: 1) по типу используемого времязадающего элемента и способу его включения, 2) по виду запуска, 3) по типу и величине мёртвого времени. По третьей группе признаков одновибраторы подразделены на схемы с блокировкой входа на время длительности выходного сигнала (с постоянным мёртвым временем), схемы с продлением выходного сигнала при приходе вторичного запускающего импульса и схемы предложенного автором т.н. счётного типа. Последние, в случае прихода вторичного запускающего импульса, прерывают выходной сигнал на малый интервал, а затем формируют стандартный выходной импульс.

Проведённая систематизация характеристик детекторов служит в работе основой для выработки требований к собственным параметрам

электронной аппаратуры регистрации. Обобщение литературных данных по интегральным схемам ЭСЛ необходимо для детального представления и возможности количественного анализа работы узлов ядерной электроники на их основе.

Вторая глава открывается анализом основных принципов построения модульной регистрирующей аппаратуры. Выделены три главных структурных иерархических уровня в современных экспериментальных электронных комплексах. Верхний уровень (рис. I, а) включает в себе основные системы комплекса: схемы съёма информации с детекторов; системы отбора событий (в современных установках это – системы предварительного отбора и быстрые цифровые процессоры); системы измерения параметров событий (преобразования данных в двоичный код); схемы считывания в накопитель; системы контроля и управления. Определён также нижний структурный уровень (рис. I, б), на котором реализуются элементарные функции (уровень узлов). Показано, что промежуточный структурный уровень – уровень модулей наиболее рационально строить на основе следующих принципов:

- 1) "горизонтальной интеграции", т.е. заключения в рамки модуля наибольшего количества последовательных функциональных узлов. Ограничивающими факторами являются:
  - а) допустимая сложность модуля, определяемая конструктивами и элементной базой;
  - б) наличие узлов с неопределённым количеством направлений разветвления или объединения (рис. I, б);
  - в) наличие узлов, сильно различающихся конструктивно, например кабельная задержка и электронная схема;
- 2) "вертикальной интеграции", т.е. объединения однотипных модулей, либо каналов регистрации в целом, в блок до уровня допустимой сложности.
- 3) минимизация числа установочных изделий (органов управления, разъёмов) на передней панели;

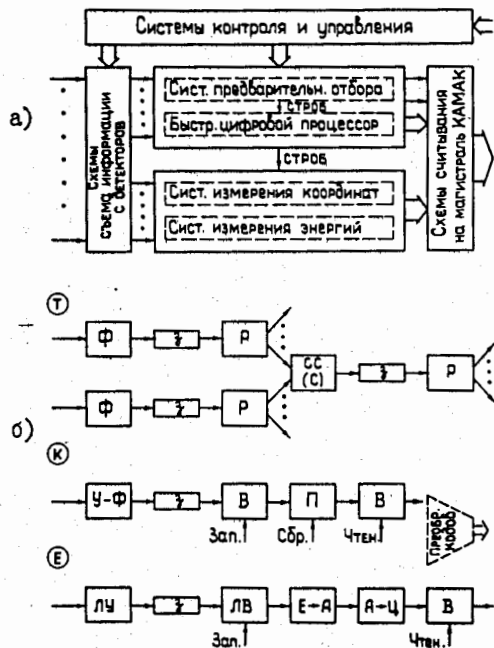


Рис.1. Основные системы электроники регистрации экспериментальных установок физики высоких энергий (а); структурные схемы каналов (б); временных (Т), координатных (К), детекторов для измерения энергии (Е).

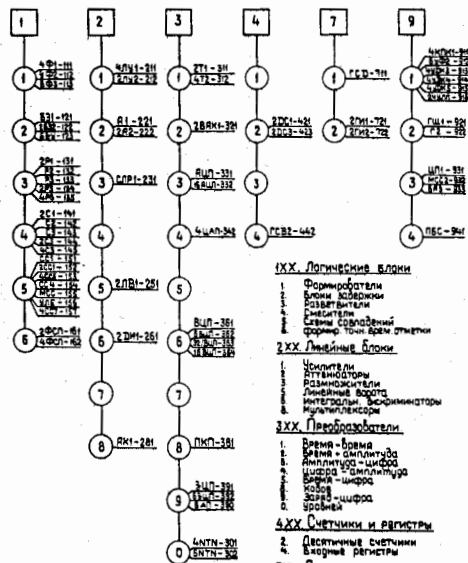


Рис.2. Классификация электронных блоков, описываемых в работе.

4) организация наборов функционально одинаковых модулей, отличающихся коэффициентом разветвления (объединения) по принципу удвоения числа их выходов (входов), начиная с двух. При выборе конструктивов для построения системы модулей необходимо руководствоваться следующим:

- 5) основной функциональной единицей механического стандарта должен быть каркас (корзина, крейт) с автономным питанием;
- 6) конструктивы стандарта должны обеспечивать наивысший коэффициент полезной площади передней панели;
- 7) выбранный стандарт должен обеспечивать перспективу развития электроники регистрации, состоящую в расширении связи с ЭВМ, и удобство совместного использования с цифровыми блоками.

С учётом вышесказанного был выбран единый стандарт КАМАК для всей аппаратуры регистрации (имеющей и не имеющей связи с магистралью). Перечисленные принципы построения отражает классификация блоков<sup>/42/</sup>, описываемых в настоящей работе, приведенная на рис.2.

Выделенные принципы построения модульной регистрирующей аппаратуры, при последовательном применении, позволяют добиться её существенного упрощения, повысить коэффициент использования стандартных электронных модулей (т.е. снизить избыточность стандарта), минимизировать габариты и в целом снизить стоимость, обеспечить программное управление работой аппаратуры.

Во втором параграфе рассмотрена теория электронных систем отбора событий. Введён коэффициент отбора идеальной системы:

$$K_{отб.}^{ид.} = \left( \sum_{j=1}^{2^m-1} N_j \right) / N_c, \quad (1)$$

здесь:  $m$  - количество датчиков сигналов в системе отбора,  
 $N_j$  - интенсивность появления одной из  $(2^m - 1)$  комбинаций сигналов, возможных при данном числе датчиков,  
 $N_c$  - интенсивность селектируемой комбинации сигналов (искомого события).

Показано<sup>/74/</sup>, что коэффициент отбора реальной электронной системы, за счёт конечности разрешающего и мёртвого времён в каждом из электронных каналов, меньше, чем в идеальной системе:

$$K_{отб.} = K_{отб.}^{ид.} \cdot \frac{\bar{t}_{отб.} \cdot (1 - \Delta N_c''' / N_c)}{(1 + \Delta N_c' / N_c) \cdot (1 + \Delta N_c'' / N_c)}, \quad (2)$$

здесь  $\bar{t}_{отб.}$  - среднее "живое время" системы отбора,  
 $\Delta N_c'$  - присчёты к селектируемой комбинации, вызванные мёртвым временем датчиков антисовпадений,  
 $\Delta N_c''$  - случайные и истинно-случайные совпадения, имитирующие искомое событие,  
 $\Delta N_c'''$  - просчёты селектируемой комбинации, вызванные конечностью разрешающего времени электроники датчиков, включённых на антисовпадения.

Выведены формулы для нахождения  $\bar{t}_{отб.}$ ,  $\Delta N_c'$ ,  $\Delta N_c''$ ,  $\Delta N_c'''$  при произвольном числе датчиков в системе отбора. В случае, если искомое событие является суммой нескольких комбинаций сигналов с датчиков:

$$K_{отб.} = K_{отб.}^{ид.} \cdot \sum_c \left[ \frac{(K_{отб.})_j \cdot (N_c)_j}{(K_{отб.}^{ид.})_j \cdot \sum_j N_c} \right]. \quad (3)$$

Показано, что системы выделения событий на основе быстрых процессоров качественно отличаются от систем предварительного отбора существенно большим числом селектируемых комбинаций, имеющих определённую функциональную связь. Принципиальным отличием процессорных систем является необходимость предварительного преобразования данных из линейного позиционного кода с выхода датчиков в двоичный, для сокращения объёма аппаратуры, реализующей алгоритм отбора. Найдено, что время преобразования линейного позиционного кода, имеющего  $2^c$  градаций квантования, равно:

$$t_{пр.} \approx k_t \cdot k_N \frac{D_i \cdot \log_2(1+D_i)}{N_{огр.}} \quad (4)$$

где  $N_{огр.}$  - заданный уровень сложности преобразователя кодов (в числе корпусов интегральных схем). Произведение коэффициентов для схем серии МЕСЛ 10.000 оценено величиной  $\sim 4$  нс.корп, для серии К138 эта величина в 6 раз больше.

С помощью выведенных соотношений можно предсказать, какова будет степень выделения искомым событиям в конкретных условиях эксперимента, выдвигать количественно обоснованные требования к разрешающему и мёртвому времени электронных каналов отбора, оценивать возможности построения и характеристики схем преобразования кодов в быстродействующих процессорах, а также в устройствах считывания информации.

Выделены собственные параметры модульных схем предварительного отбора событий /73/. Собственными названы характеристики от ступенчатого входного сигнала. Показано, что они допускают корректное сравнение разработок и адекватно отражают работу современных электронных устройств отбора в реальных условиях эксперимента. К собственным параметрам, например, модульной схемы совпадений, отнесены:

1. Собственное разрешающее время -  $\tau_c$ .
2. Требуемое время перекрытия входных сигналов (для срабатывания схемы) -  $t_n$ .
3. Дрейф -  $\Delta t_n = \beta(E_{пит}, T^\circ)$ .

Инерционность формирователей выражается, в частности, величиной собственного "гуляния" -  $t_n^c$ . Следует подчеркнуть, что в данном наборе отсутствуют такие параметры, как разрешающее время  $\tau$  и эффективность  $\epsilon$ , правомерные лишь для устройств совпадений, связанных с конкретными детекторами, поскольку они определяются съёмом сигналов с детектора.

Проблеме съёма временной информации с детекторов посвящён специальный раздел /64, 72/. В расчёте учтены: форма и амплитудное распределение импульсов с детекторов, инерционность схемы временной привязки (по переднему фронту). Для аппроксимации сигналов с произвольной формой переднего фронта предложена формула:

$$A(t) = \frac{A_i}{e^\alpha - 1} \cdot \left[ e^{\frac{\alpha \cdot t}{t_H}} - 1 \right], \quad (5)$$

здесь  $A_i$  - амплитуда сигнала,  
 $t_H$  - время нарастания переднего фронта,  
 $\alpha$  - коэффициент, отражающий форму переднего фронта ( $\alpha = 1/4$  - линейный передний фронт,  $\alpha = -4$  - экспоненциальный с  $\tau \approx t_H/4$ ;  $\alpha \rightarrow -\infty$  - ступенчатый входной сигнал и т.д.).

Найдено, что ширина кривой временного разрешения на относительном уровне  $\bar{h}$ :

$$\Delta t = \frac{\bar{E}_1}{2} \cdot \left[ \ln \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4k \cdot \bar{E}_0}{\bar{E}_1 \cdot e_n^-}} \right) - \ln \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4k \cdot \bar{E}_0}{\bar{E}_1 \cdot e_n^+}} \right) \right], \quad (6)$$

где

$$e_n^\pm = \ln \left[ 1 + \frac{\bar{A}_n \cdot (e^\alpha - 1)}{1 \pm \bar{b}_A \cdot \sqrt{e_n^\pm / h}} \right],$$

$\bar{A}_n$  - порог формирователя временной отметки,

$\bar{b}_A$  - полуширина амплитудного распределения сигналов на

полувысоте;

$$k = \begin{cases} \frac{5\alpha + 31\alpha}{35 + (1,5\alpha \cdot \bar{E}_n^c)^{-1}} > \text{при } \alpha > 0, \\ \frac{5}{3,5 - (1,5\alpha \cdot \bar{E}_n^c)^{-1}} > \text{при } \alpha < 0, \end{cases}$$

$$\bar{E}_0 = \begin{cases} \bar{E}_1 \cdot \ln(1 + 1,5\alpha \cdot \bar{E}_n^c), & \text{при } \alpha > -1/1,5 \bar{E}_n^c, \\ \bar{E}_1 \cdot \ln(1 + \frac{1}{1,5\alpha \cdot \bar{E}_n^c}), & \text{при } \alpha < -1/1,5 \bar{E}_n^c, \end{cases}$$



$$\bar{t}_1 = \begin{cases} 1/d & , \text{ при } d > -1/1.5 \bar{t}_n^c, \\ -1.5 \bar{t}_n^c & , \text{ при } d < -1/1.5 \bar{t}_n^c. \end{cases}$$

Величины в приведённых выражениях нормированы на  $A_i$  и  $t_n$ .

Для практических применений построены графики (см., например, рис.3) зависимости временного разрешения в функции  $\bar{A}_n$  и  $\bar{t}_n^c$ .

Полученные соотношения позволяют, в частности, рассчитывать количественно допустимую величину инерционности формирователя и тем самым минимизировать его потребляемую мощность, обоснованно выбирать элементную базу для его построения.

Третий параграф посвящён теории систем для измерения параметров событий, а именно: методике многоканальных время-координатных детекторов /63/, какими являются дрейфовые камеры. Для устройств регистрации, имеющих  $K$  входов и  $N$  измерительных каналов, найден коэффициент просчётов, вызванных ограниченностью  $N$ :

$$\eta_N = \frac{n_0 - N + \left[ N \sum_{n=0}^N \frac{(n_0)^n}{n!} - \sum_{n=1}^N \frac{(n_0)^n}{(n-1)!} \right] \cdot e^{-n_0}}{n_0} \quad (7)$$

здесь  $n_0$  - среднее число частиц, поступающих за время дрейфа  $T$  на участок дрейфовой камеры, охваченный  $N$  измерителями.

Найдена средняя величина мёртвого времени такого набора кодировщиков:

$$\bar{t}_M = \gamma_3 \cdot T \cdot e^{-n_0} \cdot \left[ 1 + \sum_{n=1}^N (n_0)^n \frac{n}{(n+1)!} \right], \quad (8)$$

где  $\gamma_3$  - коэффициент временной растяжки в системах с временным экспандером.

Из приведённых расчётов, в частности, следует, что требование малости  $\eta_N$  выполняется при  $N = 2 + 3 n_0$ .

Выведенные формулы позволяют рационально выбрать соотношения между числом входов и измерительных каналов регистрирующих

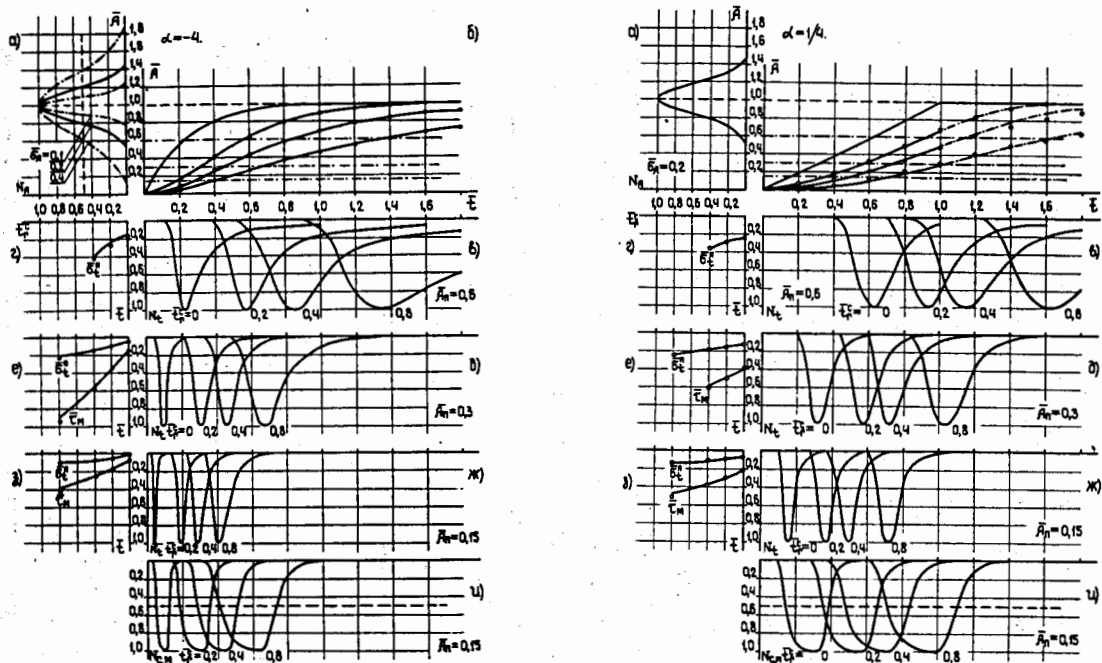


Рис.3. Зависимости:  $\bar{A}_n(\bar{t})$  - напряжения на выходе интегрирующего звена дискриминатора;  $N_{\bar{t}}^c$  - распределения выходных сигналов дискриминатора и  $N_{\bar{t}}^m$  - схемы совпадений; ширины этих распределений на полувысоте ( $\bar{b}_{\bar{t}}^n$  и  $\bar{\tau}_m$ ) для различных  $\bar{A}_n$  и  $\bar{t}_r^c$ , соответственно при экспоненциальном (слева) и линейном (справа) фронтах входного импульса.

устройств для дрейфовых камер, а также обоснованно задавать быстродействие кодировщиков.

Четвёртый параграф первой главы посвящён вопросам теории контроля электронных логических устройств. Найден алгоритмы /53/ определения близких к минимальному наборов тестовых комбинаций входных сигналов из табличной формы представления логики работы устройств. Развита аналитический метод нахождения серии тестовых комбинаций на основе логического уравнения, характеризующего работу устройства. Показано, что аналитический метод обеспечивает минимальный набор тестовых комбинаций, если логическое уравнение схемы минимизировано.

Найденные алгоритмы могут быть использованы для нахождения наборов тестовых комбинаций "вручную" при числе входов логического устройства до 5 + 6, либо использованы как основа для создания специальных машинных тестовых программ.

Наконец, в последнем параграфе описан метод вычисления положения прямой, аппроксимирующей реальную передаточную характеристику аналогового модуля, нахождения погрешности аппроксимации, а также метод вычисления интегральной нелинейности цифро-аналогового преобразователя /40/.

Разработанный метод позволяет сравнительно быстро и с высокой степенью точности, по сравнению с обычно принятым графическим способом, находить аппроксимации передаточных характеристик и их погрешности для аналого-цифровых блоков.

В третьей главе описывается разработанная под руководством автора аппаратура предварительного отбора событий и сопутствующие ей блоки регистрации наносекундных импульсов и управления.

Первой описывается созданная в 1970 + 71 гг. система транзисторных наносекундных логических блоков /10,15,16/. Она состоит

из следующих блоков (см.рис.2): 4Ф1-III<sup>6,7/</sup>, 2ФС1-161<sup>13,14/</sup>, БЗ1-121, 2Р1-131, 2С1-141, СС1-151, 2СС1-152, 4СС3-153. Блоки имеют входы аналогового управления рядом параметров, что позволяет с помощью встраиваемой платы специализированного 4-канального ЦАП<sup>25/</sup> обеспечить управление аппаратурой со стороны ЭВМ<sup>33/</sup>. Отличительной особенностью системы является также использование унифицированного выходного формирователя с предложенным автором счетным типом (см.выше) логики работы - ФС<sup>6/</sup>, обеспечивающим минимум просчетов. В системе достигнут высокий уровень электрических характеристик, в частности быстродействия, подтверждаемый для ведущих блоков системы (счетверенного формирователя по переднему фронту 4Ф1-III и сдвоенного формирователя со следящим порогом 2ФС1-161) сравнительными данными, приводимыми в Таблице 1 и Таблице 2.

Первая отечественная разработка наносекундных логических блоков на интегральных схемах<sup>11/</sup> завершилась созданием функционально полной системы<sup>66/</sup>. В состав серии входили блоки (см.рис.2): 8Ф3-113<sup>65/</sup>, 4ФС2-162<sup>65/</sup>, 2БЗ2-122, Р2-132, Р3-133, 2Р3-134, 4Р3-135, С2-142, С3-143, 2С3-144, 4С3-145, СС4-154, 4СС7-157. Её отличают улучшенные (в целом в 2+4 раза) по сравнению с другими разработками показатели, которые можно отнести к эксплуатационным: потребляемая мощность; количество активных, пассивных компонентов и паек (определяющих надежность); стоимость, а также уменьшенные габариты (в 4+6 раз). В блоки впервые введена встроенная электронная задержка. Электрические характеристики (см. Таблицу 1 и Таблицу 2) по чувствительности и точности временной привязки отвечают лучшим разработкам. Описываются также первые отечественные наносекундные цифровые мажоритарные схемы совпадений МСС-155<sup>18/</sup> и МСС2-932<sup>29/</sup>.

В третьем параграфе описывается первая система блоков наносекундной логической электроники на интегральных схемах с цифровым

Таблица 1

Сравнительные характеристики формирователей по переднему фронту (литература по ссылкам диссертации).

Литерат.	Разработчик	Тип	Цп, МВ	t <sub>ср</sub> , нс	t <sub>м</sub> , нс	Тип логики	t <sub>вых.</sub> , нс	t <sub>з</sub> , нс	P, Вт	S <sub>пл</sub> , см <sup>2</sup>	Накт, шт.	Электр. управл.	Примечания
125	ЕВГ	T-120	100	1	10	ФА	5+150	13	2,9	38	23	Запрет	1969г.
126	Le Clay	151	100	1	7	ФА	3+150	8	4,9	76	23	Запрет	1969г.
164	SEN	FE 250	50	3	10	ФБ	3...15	7	1,1	76	15	—	1969г.
115	CERN	N2168	50	1,8	10	ФБ	3,5...100	7	1,1	76	14	—	1969г.
165	Исц.Ентел	NE 4635	150	?	10	ФБ	4+16	12	8,9	76	?	—	1970г.
174	ИФВЭ	Ф101	250	2,5	10	ФБ	5	6	1,1	64	6	—	1967г.
118	ЦАФ СОЯН		50	1,8	40	ФБ	5...20	?	?	64	21	—	1971г.
123	ИТЭФ		50	?	10	ФБ	5...15	?	?	?	16	—	1971г.
119	ЛЯП ОЛЯЦ	003	100	?	15	ФБ	5,7...18	8	4,1	64	14	—	1972г.
127	ФЦАН		100	?	15	ФБ	5+30	6	0,6	?	8	—	1973г.
136	СНШП	БТ32-90	100	?	10	ФБ	5,0...50	14	4	96	?	—	1974г.
10	ЛВЭ ОЛЯЦ	4Ф-111	50	1,5	9	ФБ	4+40	16	1,8	19	15	Улт.упр.	1971г.
166	Le Clay	623	30	1	9	ФА	5+150	11	1,4	9,5	?	Запрет	См. табл.
167	L.B.L., USA	50	?	?	3	ФБ	2+100	?	2,5	76	33	Запрет	МЕСЛ-III
132	ИФВЭ	Ф103	100	4	10	ФБ	6...30	15	~1	64	13	—	МЕСЛ-II
133	ЛЯП ОЛЯЦ	057	25	?	10	ФБ	5...20	20	1,4	32	15	—	K138
85	ЛВЭ ОЛЯЦ	8Ф-113	20	3,5	10	ФБ	5+80	17	1,2	8,5	9	—	См. табл.
41	ЛВЭ ОЛЯЦ	УФ-112	25	3	10	ФБ	4+67	20	1,4	38	8,5	—	См. табл.

Таблица 2

Сравнительные характеристики формирователей со следящим порогом.

Литература	Разработчик, тип	Порог, МВ	Угловое разрешение, град.	Эффектив. фронт, нс	(Цп) макс. В	Угловое разрешение, град.	Сдвиг по частоте, МГц	t <sub>м</sub> , нс	t <sub>вых.</sub> , нс	Δt <sub>1</sub> , нс	Δt <sub>2</sub> , нс	Δt <sub>3</sub> , нс	Δt <sub>4</sub> , нс	Р <sub>плп</sub> , Вт	S <sub>плп</sub> , см <sup>2</sup>	Накт, шт.
168	D. Gedcke	30	600	60	6	240	?	?	?	?	?	?	?			
169	L. Karlsson			150	15	240	?	?	?	?	?	?	?			
170	Л. Ондриш	80		150	10	200	?	?	?	?	?	?	?			
171	Е.А.Мелешко	100	2000	500	5	200	?	?	?	?	?	?	?			
15	2 ФСП - 161	100	400	200	10	200	?	?	?	?	?	?	?	5	38	20
172	M. Malet			~300	~5	120	?	?	?	?	?	?	?			
173	ОРТЕС, 473А			50	5	400	?	?	?	?	?	?	?	4	76	
174	F. Gabriel	10	>1000	50	6	300	?	?	?	?	?	?	?	10		
175	Б.Ю.Балдин			50	5	150	?	?	?	?	?	?	?	4,5	64	24
176	Вик.Е.А.Мелешко			50	5	400	?	?	?	?	?	?	?	2	10	12
65	4 ФСП - 162	100	200	150	5	150	?	?	?	?	?	?	?	2,5	8,5	8

управлением основными параметрами /51,54/, завершённая в 1974 году. Этим вторым шагом (после внедрения конструктивов КАМАК) видоизменён традиционный подход к построению блоков наносекундной электроники. В состав системы входил формирователь УФ2-И2 /41/ (см.Таблицу 1) с цифровым управлением порогом (от 25 мВ до 2В), задержкой (от 1 до 63 нс, мёртвое время 13 нс) и длительностью выходного сигнала (от 4 до 67 нс). Разрядность управляющих регистров - 6 бит (63 градации), линейность регулировочных характеристик лучше 1,5%. Сдвоенный блок задержки 2БЗУ-123 /28/ аналогичен схеме задержки в формирователе. Управляемый логический блок УЛБ-156 /35/ по программе может переводиться в режим работы схемы совпадений, антисовпадений, смесителя, разветвителя, коммутатора логических сигналов (имеет по 4 отключаемых независимо входа и выхода). Систему дополняет 24-канальный управляемый генератор импульсов для светодиодов ГСД-7И /44/, обеспечивающий рекордную частоту световспышек - до 80 МГц. В работе /67/ показаны перспективные области, в которых использование наносекундных логических блоков с цифровым управлением даёт существенные и принципиальные преимущества, такие как: ускорение и улучшение качества отладки блоков и установок в целом; стабилизация режимов работы установок; одновременные измерения по нескольким каналам реакции; доступность измерений, требующих оперативных переключений; автоматизация рутинных операций и т.д.

Благодаря конструктивной, электрической и логической совместимости всех трёх систем их блоки могут использоваться в наилучших сочетаниях, а также совместно с цифровыми блоками КАМАК.

В числе блоков регистрации и управления разработаны: 32-канальная годоскопическая система ворот с памятью и выводом данных на магистраль КАМАК ГСВ-442 /60/, с собственным разрешающим временем ~ 1 нс и чувствительностью каналов регистрации ~ 100 мВ;

первые быстрые десятичные счетчики с индикацией 2ДС1-421 /38/ и 2ДС3-423 /58/ на 8 десятичных разрядов и быстродействием 120 + 160 МГц; набор генераторов 2Г1-721 /7,10/, 2Г2-722 /79/ и таймеров 2Т1-311 /4,10/, 4Т2-312 /59/, отличающихся высоким быстродействием либо широкими функциональными возможностями.

Половина из более чем 30 типов описываемых в первой главе блоков разработана автором лично, а остальные – при непосредственном личном участии и руководстве. Им предложен ряд оригинальных схемных решений узлов наносекундной логической электроники: формирующий канал устройства совпадений на транзисторах одного типа проводимости /1/; схемы унифицированных выходных формирователей на дискретных транзисторах и интегральных схемах /6,7,11/; преусилитель для формирователя на интегральных схемах /65/; ряд кольцевых потенциальных счетчиков высокого быстродействия /26/; узел точной временной привязки /65/, отличающихся улучшенными характеристиками либо качественно новыми функциональными возможностями.

Под руководством автора создан набор необходимой технической документации для производства всех описанных блоков. Выпущено и внедрено в эксперимент свыше 2400 модулей, в том числе свыше 250 модулей со связью с магистралью КАМАК. В заключение в первой главе описаны применения разработанной аппаратуры: в системе мониторинга пучка магнитного спектрометра "Альфа", во время-пролетном спектрометре установки "Диск", в системе запуска 2-метровой стримерной камеры СКМ-200.

Четвертая глава посвящена разработкам систем аналоговых и аналого-цифровых блоков. Приводится краткое описание системы наносекундных линейных блоков на транзисторах, разработанной совместно с системой транзисторных логических блоков /10,16/ в 1970+1971 гг.

Она включает в себя блоки (см.рис.2): 4УС1-211 /3/, 2УС2-212 /55/, А1-221, 2А2-222, СМР1-231, 2ДП1-251 /7/, 2ЛВ1-261 /9/, 2ВК1-321 /9/. Отличительной особенностью системы являлось высокое быстродействие, рекордный диапазон рабочих сигналов (от 0 до -6В на 50 Ом), возможность регулировки основных параметров с помощью встраиваемого 4ЦАП-342 /25/. Данная система позволяет собирать любые устройства аналоговой селекции и измерений (совместно с амплитудно-цифровым преобразователем АЦП-331 /24/).

Показано, однако, что существенного улучшения эксплуатационных показателей измерительной аппаратуры можно добиться лишь путём перехода к блокам, содержащим в себе полный канал измерения амплитуды, заряда импульса или временного интервала. Мерой оценки схемной простоты (и надёжности), потребляемой мощности, стоимости, простоты связи с ЭВМ выбрано количество измерительных каналов, которое размещается в крейте КАМАК. Описываются первые отечественные быстродействующие преобразователи: АЦП-331 /24,32/, ЗЦП-391 /21/ и ВЦП-361 /30/. Их разработка позволила в несколько раз улучшить показатели аппаратуры (см.Таблицу 3) и тем самым открыла возможность построения систем с десятками измерительных каналов.

Следующим этапом пятикратного улучшения показателей аппаратуры явилась разработка многоканальных измерителей: 6ЗЦП-392 /45/ и 6ВЦП-362 /46/ (а также аналогового коммутатора АК-281 /22/). Их внедрение обеспечило возможность создания установок с количеством измерительных каналов, исчисляемых сотнями, причём показатели аппаратуры вышли на уровень, сравнимый с имевшимися в то время (в 1974 г.) мировыми разработками. Дальнейшее улучшение показателей и, в частности, рекордная плотность размещения каналов, были достигнуты разработкой 16-канальных измерителей на основе аналоговой памяти: 16АЦП-332 /77/ и 16ВЦП-364 /81/ (см.Таблицу 3).



ЭСЛ либо ТТЛ. Автором разработаны первые в стране усилители-формирователи для дрейфовых камер /48/; схема 4УДК-914 с порогом 4+6 мКА имела рекордно малую величину собственного "гуляния" - 3,0 нс.

Во втором параграфе описывается электроника регистрации сигналов МЦД, размещаемая в крейтах КАМАК. Для пропорциональных камер разработано два блока: 32-канальный блок регистрации со структурой "задержка + память" - Г2-922 /47/ и 16-канальный блок ПП-921 /27/ с быстрым цифровым шифратором номера сработавшей проволоочки в двоичный код (скорость кодирования  $\sim 0,6$  нс/проволочку), предназначенный для процессорных систем. Регистрация сигналов с дрейфовых камер может осуществляться блоком 6ВЦП-362 либо его модификацией 32/6ВЦП-363 /50/, снабжённой коммутатором, увеличивающим число входов до 32. Блоки имеют высокие электрические и эксплуатационные показатели, подтверждаемые сравнительными данными Таблицы 4.

В следующем параграфе описана электроника регистрации, размещаемая непосредственно на пропорциональной камере. Сюда относится первая отечественная разработка на интегральных схемах 4КПК-911 /20/, использованная в эксперименте /49/, а также 16-канальная плата регистрации 16КПК-917А /76/ на основе специализированной большой гибридной интегральной схемы К405ХП1 /78/. Схема её разработана автором, работа проводилась совместно с Лабораторией ядерных проблем ОИЯИ и ОКБ при заводе "Экситон" /39/. Структура БГИС: "усилитель-задержка-память", в немагнитном корпусе 24 x 36 x 5 мм<sup>3</sup> размещено 2 независимых канала; основные параметры аппаратуры, разработанной на основе этой схемы, приведены в Таблице 4.

Считывание информации с систем регистрации в стандарте КАМАК, в принципе, может быть осуществлено стандартным образом. Однако в этом случае, так как количество сработавших проволоочек невелико,

90 + 95% считанного массива будут содержать "пустые"-нулевые разряды. Специализированный блок считывания информации с годоскопических систем регистрации ПКП-381 /68/ "фильтрует" эти нулевые разряды, а номера сработавших проволоочек переводит в двоичный код, позволяя в 3 раза сократить время передачи данных (до  $\sim 45$  нс/проволочку) и в  $\sim 10$  раз уменьшить требуемый объём памяти ЭВМ. Отличительной особенностью блока от аналогичных зарубежных разработок является его универсальность, поскольку он применим для считывания информации и с годоскопических систем, где регистраторами являются аналого-цифровые преобразователи. Для электроники регистрации, размещаемой на пропорциональной камере, также разработана система считывания /76/, позволяющая при небольших аппаратурных затратах обеспечить весьма высокую скорость считывания - до 5 нс/проволочку.

Далее описываются быстродействующие цифровые процессоры для наиболее типичных задач физики высоких энергий. Создано устройство для быстрого отбора событий по углу рассеяния частиц в мишени /31/. Процессор реализует алгоритм отбора:  $(A X_1 - B X_2 + C X_3 - D) > \theta$ , где  $X_1, X_2, X_3$  - координаты сработавших проволоочек трёх пропорциональных камер; А, В, С, Д - коэффициенты, зависящие от геометрии опыта,  $\theta$  - требуемый угол отклонения. Отличительной особенностью процессора помимо быстродействия является применимость практически для любой геометрии опыта <sup>х)</sup> благодаря возможности варьирования коэффициентов А, В, С, Д. Второе устройство /71/ отбирает события по разности чисел частиц, прошедших через 2 пропорциональные камеры, и применяется для отбора нейтральных частиц, распавшихся на заряженные частицы в объёме между этими камерами, в условиях

х) см. описание процессорного блока: З.Гузик, С.Г.Басиладзе, ОИЯИ П13-6917, Дубна, 1973.

фона сквозных заряженных частиц. Блоки регистрации и шифровки количества частиц в двоичный код собраны на платах ГСВ-442 /60/ и МСС2-932 /29/, скорость кодирования 2 нс/проволочку. Собственно процессор, тип БАЗ-933, реализует алгоритм  $A < N_2 - N_1 \leq B$ , где  $0 \leq A \leq 7$ ,  $0 \leq B \leq 15$ , за время 60 нс.

Седьмой параграф посвящен аппаратуре для машинной проверки электроники МПЦ. Для этих целей разработан, в частности, 32-канальный тестовый блок ТБ1-901 /53/.

В заключение приводятся результаты методических измерений характеристик МПЦ с помощью описанной аппаратуры.

Из двадцати типов блоков, описываемых в данной главе, более трети разработано автором, а оставшиеся - при его непосредственном личном участии и руководстве. Автором предложен /84/ способ передачи стандартных импульсов по длинной линии связи, позволяющий в 3-6 раз увеличить её предельную длину без введения специализированных передатчиков и приемников. Предложен ряд оригинальных схемных решений: усилители для съема сигналов с МПЦ /20,48/; схема дискриминирующего одновибратора в БГИС К405ХП /83/; схема универсального выходного каскада в тестовом блоке /53/; схема компенсации дрейфа задержки в блоке Г2-922 /47/, позволяющие улучшить характеристики аппаратуры.

Создана необходимая техническая документация и организован выпуск разработанных блоков в опытном производстве ОИЯИ и в объединении ПОЛОН. Изготовлено ~10.000 каналов регистрации на основе усилителя-формирователя К243АГ1. Разработка БГИС К405ХП открыла возможность для создания отечественных установок с количеством каналов, исчисляемым десятками тысяч.

Шестая глава открывается описанием электроники 90-канального черенковского спектрометра /69/ установки "Фотон" - рис.4, созданной для исследования процессов рождения частиц электромагнитной

природы. Основу спектрометрических каналов составляют блоки аналоговой памяти /12/. Преобразование информации в цифровой код ведётся четырьмя АЦП-331. В системе имеется специальный 90-входный линейный сумматор на основе усилителей /3/ для аналоговой селекции событий по величине энергии, выделенной в спектрометре. В системах запуска и управления установкой использованы блоки /4, 10,66/. Электроника спектрометра охвачена системой автоматического измерения характеристик, контролирующей линейность, "пьедесталы", рабочий динамический диапазон каналов /70/. Используется также 160-канальный генератор наносекундных реперных световспышек /43/, имеющий 64 выхода для контроля сцинтилляционных детекторов и 96 выходов для контроля спектрометрических трактов, со стабильностью световспышек в пределах 0,35%.

Основные характеристики спектрометра: 1) чувствительность спектрометрических каналов - 300 пКл на всю шкалу; 2) длительность строба записи в аналоговую память - 600 нс (определяется длительностью импульсов с ФЭУ-49); 3) средняя интегральная нелинейность каналов - 0,6%; 4) разрешающее время системы запуска - не более 50 нс; 5) задержка в системе запуска - 490 нс; 6) мёртвое время спектрометра - 1,2 мс (при считывании данных), не более 15% от общего мёртвого времени, определяемого искровыми камерами.

С помощью установки "Фотон" исследована реакция:  $\pi^- \gamma \rightarrow \eta^0 \pi^0$  в области переданных импульсов от  $t_{мин}$  до  $0,3$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> для отрицательных пионов с импульсом 3,3 ГэВ/с.

Вторым крупным экспериментальным электронным комплексом является магнитный спектрометр установки "Альфа" для исследования рассеяния адронов и релятивистских ядер /49/ - рис.5. Электроника сцинтилляционных детекторов состоит из блоков /10,66/, используемых для предварительного отбора событий и аналого-цифровых блоков



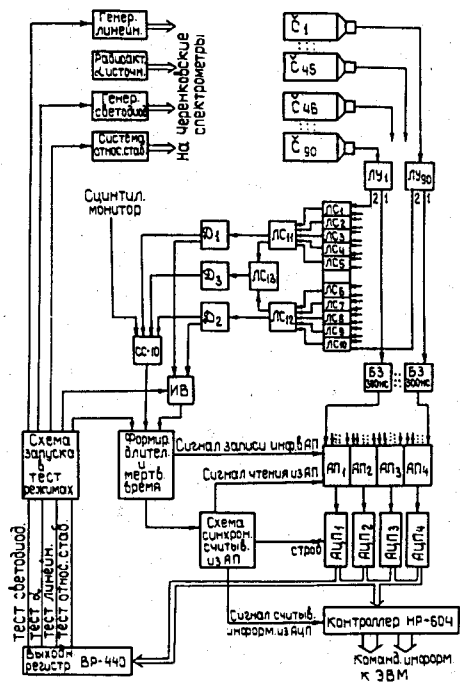


Рис.4. Блок-схема спектрометрической аппаратуры установки "Фотон".

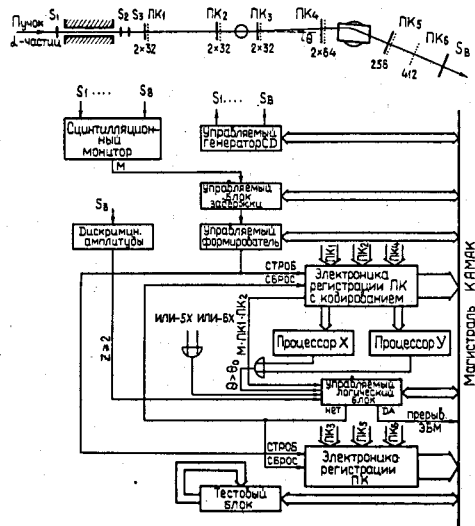


Рис.5. Упрощенная структурная схема электронной аппаратуры установки "Альфа".

/45/ для отбраковки частиц по величине ионизационных потерь.

Электроника пропорциональных камер используется для определения кинематических характеристик исследуемых процессов. Выделение событий рассеяний производится описанным выше быстродействующим цифровым процессором.

При создании данной установки впервые планомерно использовались блоки наносекундной электроники с цифровым управлением /67/. Например, непосредственно в процессе эксперимента использовано переключение логики запуска установки (УЛБ - рис.5). Это позволило параллельно накапливать информацию по разным каналам реакции в том соотношении, которое наиболее выгодно для получения оптимальной статистики, а также периодически осуществлять "триггер", используемый для контроля аппаратуры. Контроль эффективности производится с помощью блоков ЗБЗУ и УФЗ (рис.5).

Основные характеристики спектрометра: геометрическая эффективность при угле отсечки 4 мрад изменяется от 100% до 0% в диапазоне углов рассеяния  $\sim 2$  мрад. Разрешение по углу рассеяния, измеренное на пустой мишени по мониторным трекам, составляет  $\sim 0,75$  мрад. Импульсное разрешение, при угле отклонения в магните  $\sim 160$  мрад, составляет  $\sim 0,7\%$ . Все электронные системы спектрометра обладают высоким быстродействием и эффективностью, что позволяет работать в пучках с интенсивностью до  $10^6$  частиц/с (скважность пучка  $\sim 10$ ). Коэффициент отбора систем селекции настолько высок, что сравнительно большое время считывания данных с установки (определяемое ЭВМ БЭСМ-4) не ограничивает скорости набора статистики. Электронная аппаратура спектрометра занимает II крейтов КАМАК.

С помощью спектрометра на синхрофазотроне ОИИИ проведены исследования взаимодействия релятивистских ядер с ядрами Н, He, C, Ac, Cu, Nb. Результаты по абсолютной величине дифференциальных и полных сечений  $dA$  - рассеяния являются первыми для диапазонов энергий в несколько ГэВ/нуклон.

В третьем параграфе описывается крупнейшая 912-канальная система диагностики профиля пучка в канале сепарирования и транспортировки частиц жидководородной камеры "Людмила" в ИФВЭ, Протвино /80/ - рис.6. Ввиду малой длительности импульса частиц (до 10 нс) информация о пространственном распределении интенсивности получается путём измерения величин сигналов с каждой проволочки 10 пропорциональных камер, расположенных на канале. Высокая чувствительность блоков 63ЦП-392 позволяет производить съём сигналов без усиления их по напряжению. 24-канальные предусилители типа 916А (см. 1 канал - рис.6) являются управляемыми истоковыми повторителями, т.е. служат одновременно коммутаторами плоскостей четных или нечётных проволочек, подключаемых к преобразователям аналог-цифра. Данное решение позволило вдвое сократить число активных элементов по сравнению с системой ЦЕРН. Второй особенностью системы является отсутствие подстроек, поскольку операция нормирования коэффициентов передач каналов производится ЭВМ ТРА-И с помощью специального реперного генератора. Предусмотрены также перекрёстные способы поиска неисправностей с помощью ЭВМ, позволяющие быстро определять номер вышедшего из строя канала. Следующим положительным отличием системы является большая стойкость к низкочастотным наводкам от силовых элементов канала, так как постоянная дифференцирования в цепи съёма сигнала в 50 раз меньше по сравнению с известными системами.

Разработанная аппаратура имеет высокую чувствительность

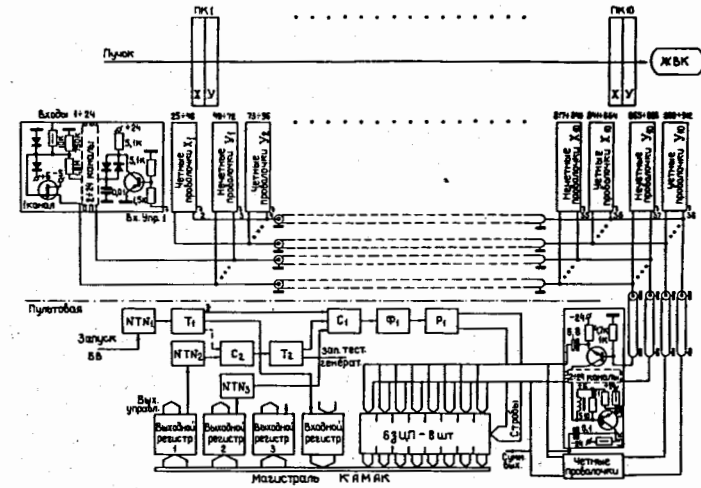


Рис. 6. Обобщенная схема электроники для измерения профилей в канале пучка жидководородной пузырьковой камеры "Людмила".

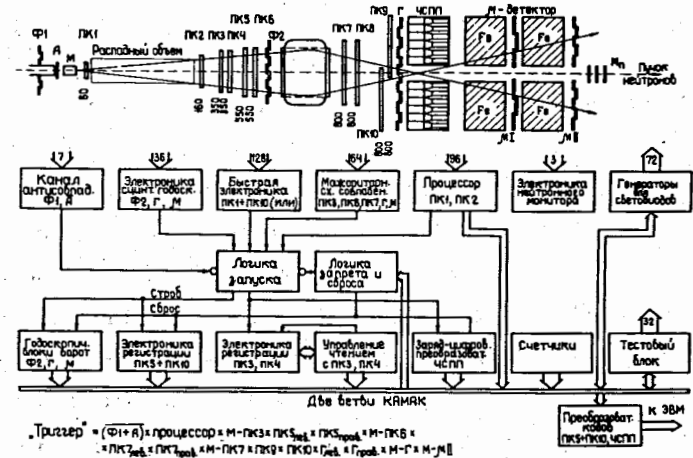


Рис. 7. Структурная схема электроники запуска и регистрации данных установки БИС-II.

$\sim 0,01$  пКл/отсч., что позволяет иметь по 5 отсчетов на одну частицу. Введение данной системы в эксплуатацию позволило с существенно более высокой степенью точности определять оптические характеристики канала частиц и обеспечило сепарирование антидейтонов, относительная доля которых в пучке составляла  $10^{-6}$ .

В заключительной части главы описывается электроника запуска и регистрации данных бесфилмового магнитного спектрометра БИС-II, созданного для экспериментов по поиску "очарованных" частиц /75/ - рис.7. Электроника сцинтилляционных детекторов ( $\Phi 1, \Phi 2, \Gamma, \mu 1, \mu 2, M_n$ ) состоит из набора блоков /10,54,66/, в том числе с цифровым управлением (всего  $\sim 100$  модулей). Отбор многочастичных событий ведется мажоритарной логикой (64 канала), реализованной на цифровых мажоритарных схемах совпадений МСС-155 /18/ и МСС2-932 /29/ и блоках наносекундной логики ( $\sim 50$  модулей). Отбор ведется при условии регистрации 3 или более частиц в одной из гооскопических плоскостей. В установке имеется описанный выше быстрый цифровой процессор для отбора событий по разности чисел частиц, прошедших через пропорциональные камеры ПК1 и ПК2. Логика запуска ( $\sim 100$  модулей /10,54,66/) позволяет вырабатывать 8 вариантов "триггера", из них 5 используются для запуска установки (см. уравнение на рис.7), а остальные являются контрольными. Электроника регистрации сигналов с ФЭУ-110 черенковского спектрометра (ЧСП) реализована на блоках 63ЦП-392 производства объединения ПОЛОН. Электроника регистрации с выходом на магистраль КАМАК размещена в 14 крейтах, объединенных в две ветви. Чтение данных в ЭВМ Р-40 производится через блок кодирования ПКП-381. Крейт со счетчиками 2ДС-421 /38/ образует автономную систему с выводом данных на цифробумах. Аппаратура охвачена системой контроля, включающей в себя тестовый блок ТБ-901 /53/ и 3 генератора для светодиодов ГСД-711 /44/. Работой этих блоков управляет малая ЭВМ ТРА-И, находя-

щаяся непосредственно в экспериментальном помещении. В установке имеется также автономная система контроля источников питания /8/ (так же как на установках "Фотон" и "Альфа").

Принципы построения, характеристики и процедура контроля перечисленных систем близки к уже описанным. Полное количество электронных каналов в установке: 50 - сцинтилляционных, 160 - черенковских и 5000 - пропорциональных камер (расширяемых в настоящее время до 7500). Аппаратура запуска и регистрации данных занимает 28 крейтов КАМАК. Описанная электроника прошла этап комплексной настройки и методических исследований на пучке и подготовлена к физическим измерениям.

Заключение. Основные результаты представленной работы кратко можно сформулировать следующим образом.

I. Установлены основные принципы построения модульной регистрирующей аппаратуры, позволяющие добиться существенного улучшения ее эксплуатационных характеристик. Решены общие теоретические проблемы электронных методов регистрации, а именно:

- а) проведен обобщенный анализ электронных систем отбора событий; выведены расчетные соотношения для нахождения коэффициента отбора систем селекции с учетом разрешающего и мертвого времен реальных электронных каналов;
- б) найдены основные соотношения, позволяющие оценивать быстродействие и сложность систем преобразования дискретной информации в двоичный код;
- в) дано общее решение задачи о съеме временной информации с детекторов, учитывающее форму импульса с детектора, величину амплитудного разброса сигналов и инерционность схем временной привязки;
- г) получены формулы для расчета эффективности регистрации и просчетов электронных систем для дрейфовых камер, позволяющие обосновать

выбор быстродействия кодировщиков и соотношения между числом входов и количеством измерительных каналов.

Пользуясь развитыми теоретическими методами, можно оценивать возможности построения, рассчитывать важнейшие характеристики, проводить теоретическое сравнение различных вариантов, минимизировать затраты на создание быстродействующей электронной регистрирующей аппаратуры.

2. Разработаны алгоритмы: тестов многоканальных логических блоков, на основе логического уравнения, либо табличной формы представления логики их работы; нахождения линейных аппроксимаций и погрешности прецизионных аналоговых схем.

3. Предложен ряд новых методов решения задач электроники регистрации, в частности:

- а) новый тип логики работы формирователей, обеспечивающий минимум просчетов;
- б) "иерархический" принцип построения цифровых мажоритарных схем совпадений, обеспечивающий малое мертвое время и сравнительную простоту реализации схем;
- в) новый метод измерения временных интервалов, сочетающий пикосекундное временное разрешение с широким динамическим диапазоном измеряемых интервалов;
- г) способ передачи импульсов по длинной линии связи, позволяющий в 3-6 раз увеличить её предельную длину;
- д) способ считывания данных, обеспечивающий максимальную скорость кодирования и передачи их в накопитель.

Впервые внедрен стандарт КАМАК в наносекундную аппаратуру физического эксперимента. Введено сначала аналоговое, а затем цифровое управление параметрами в системы блоков быстродействующей электроники регистрации.

4. Предложено значительное количество (~ 20 вариантов) оригинальных схемных решений узлов ядерной электроники, отличающихся улучшенными характеристиками либо более широкими функциональными возможностями.

5. Впервые в стране разработаны и внедрены в промышленность специализированные гибридные интегральные схемы для ядерной электроники, составляющие основу для построения электроники пропорциональных камер в Советском Союзе.

6. Разработано около 70 типов блоков, полностью охватывающих современную быстродействующую электронику регистрации, находящихся по параметрам на современном мировом уровне. Многие из них созданы впервые в Советском Союзе, а система наносекундных логических блоков на интегральных схемах с цифровым управлением не имела аналогов в мировой практике. Создана необходимая техническая документация и организован выпуск свыше 3700 модулей, что позволило широко внедрить указанные разработки во все электронные установки Лаборатории. Часть разработок производится за рубежом объединением ЮЛОН.

7. Созданы экспериментальные электронные комплексы:

- а) 90-канального черенковского масс-спектрометра установки "Фотон";
- б) магнитного спектрометра для исследования рассеяния адронов и релятивистских ядер установки "Альфа";
- в) бесфильмового магнитного спектрометра для экспериментов по поиску "очарованных" частиц установки БИС-II;
- г) системы диагностики профиля пучка канала частиц жидководородной пузырьковой камеры "Людмила".

Каждый из этих комплексов являлся крупнейшим в своей области в Советском Союзе и по параметрам отвечал мировому уровню экспериментальной техники.

Разработанная аппаратура использовалась также в таких важнейших установках Лаборатории, как: установка по исследованию кумулятивных эффектов "Диск", двухметровая стримерная камера СКМ-200, в системах контроля и управления синхрофазотрона. С помощью указанной аппаратуры получены физические результаты о природе взаимодействия частиц при высоких энергиях. Она составляет основу ряда электронных физических установок, создаваемых в настоящее время.

8. Работы автора получили высокую оценку отечественных и зарубежных специалистов, широко отражены в монографиях по ядерной электронике. Описанные разработки нашли применение в других Лабораториях ОИЯИ и в ряде научно-исследовательских институтов Советского Союза, а также в институтах Польши, Чехословакии и Болгарии.

Результаты работы докладывались на Всесоюзных и Международных симпозиумах (Дубна - 1967 г., Будапешт - 1973 г., Дубна - 1975 г., Киев - 1976 г., Варна - 1977 г.), опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах (Приборы и техника эксперимента, Nuclear Instruments and Methods, Nukleonika), в Сообщениях ОИЯИ, защищены авторскими свидетельствами /82\*84/.

#### Л и т е р а т у р а :

1. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ № 2339, Дубна, 1965 г.; ПТЭ № 5, 1966, 123.
2. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ № 2683, Дубна, 1966 г.; ПТЭ № 4, 1967, 85.
3. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-5413, Дубна, 1970.
4. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-5414, Дубна, 1970 г.; ПТЭ № 3, 1971, 104.
5. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-5730, Дубна, 1971 г.; ПТЭ № 5, 1971, 92.
6. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-5732, Дубна, 1971 г.;
7. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-6331, Дубна, 1972; ПТЭ № 6, 1972, 116.

8. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-6332, Дубна, 1972.
9. С.Г.Басиладзе, В.А.Гвоздев, П.К.Маньяков, В.Тлачала, ОИЯИ 13-6382, Дубна, 1972.
10. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ 13-6383, Дубна, 1972.
11. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-6594, Дубна, 1972.
12. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-6742, Дубна, 1972; ПТЭ № 4, 1973, 95.
13. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, ОИЯИ 13-6852, Дубна, 1972; ПТЭ № 5, 1973, 128.
14. В.Тлачала, С.Г.Басиладзе, Nukleonika, XVII-NR11/72, 607.
15. S.G.Basiladze et al., Nucl. Instr. and Meth., Vol. 106, 1973, 157.
16. С.Г.Басиладзе и др., ПТЭ № 3, 1973, 88.
17. С.Г.Басиладзе, Нгуен Куанг Минь, ОИЯИ 13-10922, Дубна, 1977.
18. С.Г.Басиладзе, П.К.Маньяков, А.Н.Парфенов, ОИЯИ 13-7056, Дубна, 1973; ПТЭ № 3, 1974, 86.
19. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, ОИЯИ 13-7166, Дубна, 1973.
20. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-7250, Дубна, 1973; ПТЭ № 3, 1974, 99.
21. С.Г.Басиладзе, П.К.Маньяков, ОИЯИ 13-7251, Дубна, 1973; ПТЭ № 2, 1974, 82.
22. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-7252, Дубна, 1973; ПТЭ № 2, 1974, 79.
23. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, З.Гузик, А.Н.Парфенов, Аннотация доклада на совещании по методике пропорциональных камер, Дубна, III-1973 г., ОИЯИ, 13-7154, Дубна, 1973, 113.
24. С.Г.Басиладзе, П.К.Маньяков, ОИЯИ 13-7387, Дубна, 1973.
25. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-7388, Дубна, 1973; ПТЭ № 4, 1974, 58.
26. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ 13-7491, Дубна, 1973; ПТЭ № 5, 1974, 74.
27. С.Г.Басиладзе, З.Гузик, ОИЯИ 13-7492, Дубна, 1973; S.G.Basiladze, Z.Guzik, Nucl. Instr. and Meth., Vol. 118, 1974, 285.

28. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, ОИЯИ I3-7601, Дубна, 1974; ПТЭ № 6, 1974, 83; Nukleonika, XIX-NR 9/74, 785.
29. С.Г.Басиладзе, В.Я.Гвоздев, ОИЯИ I3-7603, Дубна, 1973; ПТЭ № 6, 1974, 78.
30. С.Г.Басиладзе, В.А.Смирнов, В.Тлачала, I3-7608, Дубна, 1973; ПТЭ № 6, 1974, 86; Nukleonika, XIX-NR 9/74, 777.
31. С.Г.Басиладзе, и др.; ОИЯИ I3-7613, Дубна, 1973.
32. С.Г.Басиладзе, П.К.Маньяков, В.Тлачала, Доклад на УП Межд. Симп. по ядерной электронике, Будапешт IX-1973 г., ОИЯИ Д13-7616, Дубна, 1974, 305.
33. В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе, Доклад на Междунар. Симп. по ядерной электронике, Будапешт IX-1973 г., ОИЯИ Д13-7616, Дубна, 1974, 311.
34. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, Nukleonika, XIX-NR 6/74, 551.
35. С.Г.Басиладзе, А.Н.Парфенов, ОИЯИ I3-7672, Дубна, 1974; ПТЭ № 1, 1975, 81.
36. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-7955, Дубна, 1974.
37. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-7957, Дубна, 1974.
38. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-8044, Дубна, 1974; ПТЭ № 3, 1975, 89.
39. С.Е.Бару, С.Г.Басиладзе и др., ИЯФ СОАН 74-81, Новосибирск, 1974; ПТЭ № 4, 1975, 105.
40. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-8296, Дубна, 1974.
41. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-8336, Дубна, 1974; ПТЭ № 4, 1975, 96; Nukleonika, XX-NR 5/75, 457.
42. С.Г.Басиладзе, И.Ф.Колпаков, Е.Хмелевски, ОИЯИ IO-8372, Дубна, 1974.
43. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-8386, Дубна, 1974; ПТЭ № 4, 1975, 92.

44. С.Г.Басиладзе, Ли Ван Сун, А.Н.Парфенов, ОИЯИ I3-8485, Дубна, 1974; ПТЭ № 6, 1975, 83.
45. С.Г.Басиладзе, П.К.Маньяков, ОИЯИ I3-8548, Дубна, 1975.
46. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, ОИЯИ I3-8609, Дубна, 1975; ПТЭ № 5, 1975, 78; Nukleonika, XX-NR 10/75, 937.
47. В.Г.Аблеев, В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе и др., Доклад на II Международном совещании по методике проволочных камер, Дубна У1-1975; ОИЯИ I3-8829, Дубна, 1975.
48. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-8911, Дубна, 1975.
49. В.Г.Аблеев, С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-10256, Дубна, 1976.
50. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, Доклад на II Международном совещании по методике проволочных камер, Дубна, У1-1975; ОИЯИ Д13-9164, Дубна, 1975, 256.
51. С.Г.Басиладзе и др., Доклад на VIII Международном симпозиуме ОИЯИ по ядерной электронике, Дубна, У1-1975; ОИЯИ Д13-9287, Дубна, 1975, 43.
52. С.Г.Басиладзе, В.И.Иванов, ОИЯИ I3-9172, Дубна, 1975; ПТЭ № 3, 1976, 175.
53. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ IO-9173, Дубна, 1975.
54. S.G.Basiladze et al., Nucl.Instr.and Meth., Vol.103, 1975, 301.
55. С.Г.Басиладзе, Ли Ван Сун, ОИЯИ I3-9344, Дубна, 1975; ПТЭ № 5, 1976, 130.
56. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-9345, Дубна, 1975; ПТЭ № 5, 1976, 164.
57. С.Г.Басиладзе, В.К.Юдин, Сообщение ОИЯИ I3-9517, Дубна, 1976.
58. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ IO-9520, Дубна, 1976; ПТЭ № 1, 1977, 90.

59. С.Г.Басиладзе, А.Н.Парфенов, ОИЯИ I3-9550, Дубна, 1976;  
ПТЭ № I, 1977, 83.
60. С.Г.Басиладзе, Ли Ван Сун, ОИЯИ I0-9583, Дубна, 1976;  
ПТЭ № 6, 1976, 50.
61. С.Г.Басиладзе, Лекции для молодых учёных, Вып.9, ОИЯИ I3-9744,  
Дубна, 1976; ПТЭ № 6, 1976, 7.
62. С.Г.Басиладзе. З.Гузик, А.Н.Парфенов, ОИЯИ I3-99I9, Дубна, 1976.
63. С.Г.Басиладзе, В.Тлачала, ОИЯИ I3-994I, Дубна, 1976, Nucl.  
Instr. and Meth., Vol. 145, No 3, 1977, 565.
64. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-9942, Дубна, 1976.
65. С.Г.Басиладзе, В.К.Юдин, ОИЯИ I3-I00I6, Дубна, 1976.
66. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-I00I7, Дубна, 1976.
67. В.Г.Аблеев, С.Г.Басиладзе и др., Доклад на I Всесоюзном сове-  
щании по автоматизации научных исследований в ядерной физике,  
Киев X-I976; ОИЯИ I3-I0025, Дубна, 1976.
68. С.Г.Басиладзе, В.А.Смирнов, В.К.Юдин, ОИЯИ I3-I0026, Дубна,  
1976; Nucl. Instr. and Meth., Vol. 146, No 3, 1977, 587.
69. Р.Г.Асцвацатуров, С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-I0282, Дубна,  
1976.
70. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-I0299, Дубна, 1976.
71. С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-I0407, Дубна, 1977.
72. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-I0408, Дубна, 1977.
73. С.Г.Басиладзе, ОИЯИ I3-I0457, Дубна, 1977.
74. С.Г.Басиладзе, I3-I05I2, Дубна, 1977.
75. Айхнер, В.А.Арефьев, С.Г.Басиладзе и др., Доклад на IX Между-  
народном симпозиуме ОИЯИ по ядерной электронике, Варна, 1977;
76. С.Г.Басиладзе, В.К.Юдин, Доклад на IX Международном симпозиуме  
ОИЯИ по ядерной электронике, Варна, 1977; ОИЯИ I3-I0527,  
Дубна, 1978.

77. С.Г.Басиладзе, Ли Ван Сун, Доклад на IX Международном симпозиу-  
ме ОИЯИ по ядерной электронике, Варна, 1977; ОИЯИ I3-I0536,  
Дубна, 1978.
78. Ю.А.Афанасьев, С.Г.Басиладзе и др., ОИЯИ I3-I0554, Дубна, 1977.
79. С.Г.Басиладзе, Нгуен Куанг Минь, ОИЯИ P13-I0622, Дубна, 1977.
80. С.Г.Басиладзе, и др., ОИЯИ I3-I0825, Дубна, 1977.
81. С.Г.Басиладзе, Ли Ван Сун, ОИЯИ I3-I0826, Дубна, 1977.
82. С.Г.Басиладзе, Авторское свидетельство № 445I27, Бюллетень  
Изобретений № 36, 1974, I29.
83. С.Г.Басиладзе, Авторское свидетельство № 54I266, Бюллетень  
Изобретений № 48, 1976, I57.
84. С.Г.Басиладзе, Авторское свидетельство № 5527II, Бюллетень  
Изобретений № I2, 1977, I57.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1978 года.